

Для цитирования: Хураמיшина Р.А. Параметрическая диагностика технического состояния центробежного нагнетателя в эксплуатации. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44(4):72-86. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-72-86

For citation: Khuramshina R. A. Parametric diagnostics of the centrifugal supercharger's technical condition during operation. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (4): 72-86. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-72-86

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 629.7.036

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-4-72-86

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Хураמיшина Р.А.

Уфимский государственный нефтяной технический университет,
450062, г.Уфа, ул.Космонавтов 1,Россия,
e-mail: Khuramshina.regina@mail.ru

Резюме: *Цель.* Основной задачей является разработка математической модели центробежного компрессора и параметрическая диагностика технического состояния центробежного нагнетателя в эксплуатации. *Метод.* Предложена модель расчета термодинамических свойств природного газа, приведения параметров центробежного компрессора к начальным условиям и к частоте вращения, а также и интегральных показателей технического состояния нагнетателя. Методом параметрической диагностики определено техническое состояние газового тракта центробежного нагнетателя компрессорной установки. *Результат.* Выполнена программная реализация математическая модели rotating центробежного компрессора в ПК DVIgWT. В отличие от существующей методики ВНИИГАЗ, анализ проведенных расчетов показал, что математическая модель адекватная, наличие погрешности связано с учетом свойств газов изо-бутана и и-гексана. Выполняемые исследования по оценке технического состояния центробежного компрессора способны указать на наличие или отсутствие дефектов центробежного компрессора. *Вывод.* Существует ряд методов диагностики центробежного нагнетателя, но самым эффективным методом является вибродиагностика. Однако поиск неисправностей и зарождающихся дефектов в проточной части центробежного компрессора не может ограничиваться только данными вибродиагностики, которая дает около 60% достоверной информации о состоянии газоздушного тракта. Около 20% неисправностей компрессора и примерно половина опасных режимов работы проточной части нагнетателя обнаруживаются с помощью анализа термогазодинамических параметров (параметрическая диагностика). Основная сложность контроля технического состояния проточной части центробежного нагнетателя заключается в трудности количественной оценки процессов, протекающих в нагнетателе, что приводит к проблемам установления достоверного диагноза за приемлемый промежуток времени.

Ключевые слова: математическая модель, центробежный компрессор, термодинамические свойства, центробежный нагнетатель, параметрическая диагностика

TECHNICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

PARAMETRIC DIAGNOSTICS OF THE CENTRIFUGAL SUPERCHARGER'S
TECHNICAL CONDITION DURING OPERATION

Regina A. Khuramshina

Ufa State Petroleum Technological University,
1 Kosmonavtov Str., Ufa 450062, Russia,
e-mail: Khuramshina.regina@mail.ru

Abstract. Objectives The main aim is to develop a mathematical model of a centrifugal compressor and carry out a parametric diagnostics of a centrifugal supercharger's technical condition during operation. **Methods** A model is proposed for calculating the thermodynamic properties of natural gas, reducing the parameters of a centrifugal compressor to the initial conditions and to the rotation frequency, as well as the integral indicators of the supercharger's technical state. The technical state of the gas path of the centrifugal supercharger of the compressor unit is determined by the parametric diagnostic method. **Results** The software implementation of the mathematical model of centrifugal compressor is carried out using a DVIGwT PC. The analysis of calculations indicates that the model is appropriate, with the error being due to taking into account the properties of iso-butane and i-hexane, in contrast with the VNIIGAZ technique. The evaluation studies of a centrifugal compressor's state are indicative of the presence or absence of its defects. **Conclusion** Among a number of the diagnostic methods for evaluating a centrifugal supercharger, the most effective is vibrodiagnostics. However, the search for malfunctions and nascent defects in the flowing part of the centrifugal compressor cannot be limited only to vibrodiagnostic data, which provides about 60% of the reliable information about the state of the gas-air tract. About 20% of the compressor's malfunctions and approximately half of the dangerous modes of the supercharger's flow-through part is detected using thermogasdynamic parametric analysis (parametric diagnostics). The main difficulty of the control over the technical state of the flow-through part of the centrifugal supercharger is in the complication of the quantitative evaluation of the processes taking place in the supercharger, which leads to problems in providing reliable diagnosis during a reasonable period of time.

Keywords: mathematical model, centrifugal compressor, thermodynamic properties, centrifugal supercharger, parametric diagnostics

Введение. В процессе эксплуатации газоперекачивающих агрегатов (ГПА) существуют проблемы, связанные с контролем и оценкой их технического состояния. В частности, одной из важных проблем является диагностический контроль центробежного нагнетателя (ЦБН), который предназначен, как для контроля технического состояния собственно ЦБН, так и для повышения достоверности и глубины диагностирования ЦБН. Поэтому актуальной является параметрическая диагностика ЦБН на основе широкого использования вычислительных комплексов.

Постановка задачи. Техническая диагностика – наука о распознавании состояния технической системы, включающая широкий круг проблем, связанных с получением и оценкой диагностической информации [1-2].

Целью технической диагностики являются определение возможности и условий дальнейшей эксплуатации диагностируемого оборудования и в конечном итоге повышение промышленной и экологической безопасности [3-5].

Задачами технической диагностики, которые необходимо решить для достижения поставленной цели, являются [6-10]:

- обнаружение дефектов и несоответствий, установление причин их появления и на этой основе определение технического состояния оборудования;

- прогнозирование технического состояния и остаточного ресурса (определение с заданной вероятностью интервала времени, в течение которого сохранится работоспособное состояние оборудования).

Существуют следующие виды диагностирования газоперекачивающих агрегатов [11-21]:

1. Динамические методы;
2. Дефектоскопия;
3. Контроль загрязнений;
4. Анализ тенденций;
5. Анализ предпосылок.

Решение перечисленных задач, особенно для сложных технических систем и оборудования, позволяет получить большой экономический эффект и повысить промышленную безопасность соответствующих производственных объектов.

Техническая диагностика, благодаря раннему обнаружению дефектов, позволяет предотвратить внезапные отказы оборудования, что повышает надежность, эффективность и безопасность промышленных производств, а также дает возможность эксплуатации сложных технических систем по фактическому техническому состоянию.

Методы исследования. Методы диагностики технического состояния можно разделить на два принципиально отличающихся типа [22]:

1. Разрушающие;
2. Неразрушающие.

К методам разрушающего контроля обычно относят предпусковые или периодические гидравлические испытания аппаратов, а также механические испытания образцов металла, вырезанных из их элементов.

Неразрушающие методы контроля предполагают применение физических методов контроля качества, не влияющих на работоспособность конструкции аппарата.

В настоящее время для обнаружения и идентификации дефектов используется широкий спектр методов неразрушающего контроля (НК). Современная классификация методов НК включает девять видов контроля: электрический, магнитный, вихретоковый, радиоволновой, тепловой, визуально-измерительный, радиационный, акустический и контроль проникающими веществами.

Каждый из видов НК подразделяют на методы, отличающиеся следующими признаками [23]:

- характером взаимодействия поля или вещества с объектом, определяющим соответствующие изменения поля или состояния вещества;
- параметром поля или вещества (первичным информативным параметром), измеряемым в процессе контроля;
- способом измерения параметра поля или вещества.

Методы НК основаны на использовании физических явлений для обнаружения и определения параметров дефекта. В свою очередь неразрушающие методы контроля подразделяются на – пассивные (интегральные) и активные (локальные).

К активным методам НК относятся методы, в которых измеряется изменение возбуждаемого физического поля, а к пассивным методам относятся методы, использующие свойства физического поля, возбуждаемого самим контролируемым объектом.

Локальные методы позволяют обнаружить дефект лишь на ограниченной площади, а интегральные методы способны проконтролировать весь крупногабаритный объект в целом.

Активными методами являются: визуальный и измерительный контроль, ультразвуковая дефектоскопия, магнитные методы, радиографические капиллярные методы, метод вихревых токов, электрический метод.

К пассивным методам относятся: тепловизионный, виброакустические методы и метод акустической эмиссии.

При выборе методов неразрушающего контроля конкретных элементов конструкций

необходимо учитывать следующие основные факторы: характер (вид) возможных дефектов и их расположение; возможности методов контроля; виды деятельности, при которых применяется неразрушающий контроль (изготовление, ремонт, техническое диагностирование); формы и размеры контролируемых элементов конструкций; материалы, из которых изготовлены контролируемые элементы; состояние и шероховатость контролируемых поверхностей конструкций [15].

При определении технического состояния системы необходимо с высокой степенью достоверности установить начальные состояния входящих в нее элементов – то есть следует провести диагностику агрегата непосредственно после окончания ремонтных операций. Необходимо так же, с достаточной степенью точности, установить рабочий отрезок времени функционирования технической системы, поскольку режимы работы компрессорных установок при пуске и остановке могут создавать разного рода опасные условия, отличающиеся от установившихся режимов работы.

С помощью того или иного метода диагностики ГПА можно и весьма целесообразно прогнозировать изменение технического состояния агрегата с целью вынужденных остановок ГПА, повышения эффективности их эксплуатации, определения видов и сроков проведения ремонта [1].

Техническое состояние газоперекачивающего агрегата сказывается на всей технологии транспортировки газа по газопроводу. Можно утверждать что, если при данном расходе топливного газа по агрегату снизилась производительность нагнетателя, то при прочих равных условиях это могло произойти из-за ухудшения состояния ГПА, нагнетателя или того и другого вместе.

Сравнительный анализ преимуществ и недостатков существующих методов диагностики текущего состояния компрессорной установки показал, что большая часть дефектов и неисправностей, примерно 60%, может быть установлена методами вибродиагностики, пригодными для обнаружения дефектов практически во всех элементах агрегата; около 20% неисправностей компрессора и примерно половина опасных режимов работы проточной части нагнетателя обнаруживается только анализом термогазодинамических параметров (параметрическая диагностика); примерно 20% неисправностей элементов компрессора, обнаруженных методами вибродиагностики можно подтвердить анализом термогазодинамических параметров машины и около 20% неисправностей можно зарегистрировать по изменению температуры, состава, уровню загрязнений смазочного масла.

Распределение методов активного контроля ГПА представлено на рис. 1.



Рис.1. Распределение методов активного контроля ГПА

Fig.1. Distribution of methods for active monitoring of gas-turbine engines

Одним из основных направлений технической диагностики ГПА является метод параметрической диагностики, как наиболее перспективный и имеющий значительный опыт.

использования в авиационной и других отраслях промышленности. Основой метода параметрической диагностики является определение изменения параметров технического состояния агрегата или его отдельных элементов по изменению его технических и топливоэнергетических показателей – мощности, производительности, КПД привода и нагнетателя в процессе эксплуатации [17-20].

Об изменении технического состояния агрегата или его отдельных элементов судят по изменению характеристик их рабочих режимов. Самоизменение оценивается сравнением характеристик, построенных для данного момента, и времени, принятого за исходное.

В качестве исходного может быть принято время проведения стендовых, сдаточных или других видов испытаний агрегата. Неизменность характеристик агрегата будет говорить о его нормальном состоянии; «расслоение» характеристик будет свидетельствовать об изменениях, происходящих в ГПА.

Комплексная оценка технического состояния потенциально опасных элементов технической системы в период эксплуатации в основном базируется на структурном анализе надежности ее компонентов, динамических безраборных методов контроля (диагностика по параметрам вибрации и термогазодинамическим характеристикам) и анализе загрязнений [18]. Успех диагностирования в значительной мере обусловлен правильностью выбора информативных компонентов для построения принципиальных диагностических моделей объекта и моделей распознавания, а также идентификации сигналов измерительных систем.

Обсуждение результатов. Определение политропного КПД и мощности ЦБН природного газа выполняется в соответствии с методическими указаниями по проведению теплотехнических и газодинамических расчетов при испытаниях газотурбинных газоперекачивающих агрегатов ПР 51-31323947-43-99, разработанные ВНИИГАЗ [2].

Основой системы определений мощности, эффективности и других показателей ЦБК и их приводов, является термодинамический анализ сжатия газа, предусматривающий использование различных термодинамических и калорических функций реального газа.

В качестве эталонной (полезной) работы для ЦБН природного газа применяется политропная работа.

Показатели и характеристики ЦБН определяются по статическим параметрам компримируемого газа (давлению и температуре), измеренных в сечениях входного и выходного фланцев (патрубков).

Для определения плотности компримируемого газа используется следующее уравнение:

$$p_{1H} = \frac{p_{1H} \cdot 10^3}{Z_{1H} \cdot R \cdot T_{1H}}, \quad (1)$$

где Z_{1H} - функция сжимаемости, поправка реального газа.

Функция сжимаемости определяется с использованием базового уравнения состояния. В качестве базового уравнения состояния применено модифицированное (упрощенное) уравнение состояния «Бенедикта-Вэбба-Рабина» (BWR), представленное в приведенной форме, и на его основе определены формулы для расчета других функций сжимаемости.

Базовое уравнение состояния:

$$Z = 1 + \left(\frac{\alpha_1}{\tau} - \frac{\alpha_2}{\tau^2} - \frac{\alpha}{\tau_4} \right) \cdot \frac{\pi}{4} + \left(\frac{\alpha_4}{\tau^2} - \frac{\alpha_5}{\tau^3} + \frac{\alpha_6}{\tau^5} \right) \cdot \frac{\pi^2}{Z^2}. \quad (2)$$

Приведенный объемный расход газа на входе к начальным условиям:

$$Q_{1пл.н.у} = Q_{1H} \cdot p_{1H} \cdot z_{1HH} \cdot R_0 \cdot T_{1HH} / (p_{1HH} \cdot 10^3). \quad (3)$$

Приведенный объемный расход газа через нагнетатель:

$$Q_{1н.пр} = Q_{пр.н.у} \cdot \frac{n_0}{n_{ст}}, \quad (4)$$

где $n_0 = 5300 \frac{об}{мин}$.

Приведенная относительная внутренняя мощность ЦБН. Для расчетов режимов работы КС применяются характеристики ЦН, представляющие зависимость степени повышения давления ε , политропического КПД, $\eta_{пол}$ и приведенной относительной внутренней мощности

$$\left[\frac{N_t}{p_{1H}} \right] = \frac{N_t}{p_{1H}} \cdot \left(\frac{n_0}{n_{ст}} \right)^3 \quad (5)$$

Приведенная степень сжатия:

$$\varepsilon_{пр} = \left(\frac{m_{v_0} \cdot H_{n_{пр}}}{Z_{1H_0} \cdot R_0 \cdot T_{1H_0}} + 1 \right)^{\frac{1}{m_0}} \quad (6)$$

где $m_{v_0} = \frac{K-1}{K}$ – объемный показатель политропы,

$H_{n_{пр}} = H_n \cdot \left(\frac{n_0}{n_{см}} \right)^2$ – приведенный политропный напор.

Коэффициент технического состояния проточной части ЦБН по отклонению политропного КПД [3]:

В качестве количественных оценок смещения характеристик ГПА, ГТУ или нагнетателя иногда принимаются коэффициенты технического состояния по КПД K_η или по мощности.

$$K_\eta = \frac{\eta_{пол}}{\eta_{пол макс}} \quad (7)$$

где $\eta_{пол макс} = 0,835$.

Удаленность режима ЦБН от помпажа:

$$K_{зап} = \frac{Q_{пр.н.у} - Q_{п.}}{Q_{п.}} \cdot 100\% \quad (8)$$

где $Q_{п.}$ – помпажный расход, принимается по ГДХ.

Техническое состояние центробежного нагнетателя оценивается по табл.1.

Таблица 1. Классы технического состояния проточной части центробежного нагнетателя
Table 1. Classes of technical condition of the flowing part of a centrifugal supercharger

Значение коэффициента технического состояния	Без дефектов	Наличие эксплуатационного износа и восстанавливаемых дефектов	Наличие дефектов на ранней стадии развития	Наличие существенных дефектов	Классы технического состояния
K_η	0,98...1,0				Исправное
		0,90...0,98			Удовлетворительное
			0,85...0,90		Удовлетворительное
				<0,85	Эксплуатация нежелательна

Реализация математической модели нагнетателя в виде отдельного модуля проводилась в программе «Система математического моделирования тепловых, энергетических и комбинированных установок (DVIGwT)» [3]. В DVIGwT. введена паспортная характеристика ЦБН для номинального, летнего и зимнего режимов с помощью приложения SgarEdit.

Оценка адекватности математической модели нагнетателя выполнена в сравнении с данными ВНИИГАЗ [4] (табл. 2). Анализ результатов расчета показывает, что максимальная погрешность в определение политропического КПД составляет 0,695%. Погрешность в определение политропического КПД зависит от погрешности определения полного напора, на который влияет состав газа.

Если значение КПД в результате расчета получается выше КПД максимального, равного, то следует считать, что замеренные данные имеют большую погрешность и данную точку не следует включать в расчет.

Система компьютерного моделирования DVIGwT предназначена для проведения структурного и параметрического анализа газотурбинных двигателей, составления и расчёта тепловых схем паротурбинных и парогазовых установок.

Таблица 2. Результаты расчета
Table 2. Results of calculation

Параметр	Размерность	ВНИИГАЗ			КС, режим 1			КС, режим 2		
		КС	DVIwT	Δ, %	КС	DVIwT	Δ, %	КС	DVIwT	Δ, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Коэффициент сжимаемости на входе	–	0,881	0,881	0,016	0,895	0,895	0	0,897	0,897	0
Коэффициент сжимаемости на выходе	–	0,891	0,891	0,022	0,903	0,903	0	0,904	0,904	0
Полный напор	кДж/кг	59,444	59,847	0,674	34,200	34,610	0,41	42,45	42,98	-0,5939
Политропный КПД замеренным параметрам	–	0,829	0,823	0,695	0,702	0,693	-0,01	0,797	0,787	0,010
Внутренняя мощность компрессора	кВт	11,865	11,946	0,02	11,39	11,53	-1,22	14,34	14,5195	-0,182
Степень повышения давления в компрессоре, приведенная	–	1,484	1,458	-1,75	1,269	1,271	0,15	1,320	1,310	0,009

В системе DVIGwT математическая модель создается из типовых элементов посредством их соединения типовыми информационными связями через соответствующие соединительные звенья элементов.

Построение модели осуществляется на визуальном уровне, отображаемом в соответствующем окне на мониторе компьютера, при этом информационное построение модели происходит автоматически. Интерфейс системы выполнен в многооконном режиме, состоящим из главного меню, панели инструментов, окон: «Модели», «Доступные типы элементов», и приближен к стандартному виду операционной системы Windows. После запуска системы на экране появляется главное меню.

При создании новой модели или открытии существующей модели из имеющегося набора моделей в каталоге «MOD» появляются окно «Модель» и окно «Доступные типы элементов». При просмотре файла результатов в виде графиков появляется окно модуля вывода графиков со своим интерфейсом.

Система оснащена возможностью вызова справки. Вызов справочной информации по системе осуществляется нажатием клавиши F1; вызов справочной информации по элементам, входным и выходным параметрам – одновременным нажатием комбинации клавиш Alt+F1. Создание новой модели выполняется любым из следующих способов. Окно «Модель» появляется на экране монитора при выполнении команды: «Открыть» [Файл – Открыть] или при нажатии соответствующих кнопок на панели инструментов. Результат выполнения команды показан на рис.2.

Окно «Модель», при активной закладке «Иерархия», разделено на два окна: «Иерархия» и «Текущий уровень». В окне «Иерархия» отражается иерархическая структура модели. Заметим, что всегда первым элементом иерархической структуры является пункт «Начальные условия» а последним – «Общие результаты».

В окне «Текущий уровень» отображается расчетная схема модели установки, которая

конструируется из доступных элементов, путем их перетаскивания мышью из окна «Доступные типы элементов». Нажатие курсором мышки на название «Иерархия» или «Текущий уровень» вызывает разворачивание соответствующего окна до размеров, соответствующих окну «Модель». Повторное нажатие на соответствующее название приводит к возврату окон в исходное состояние.

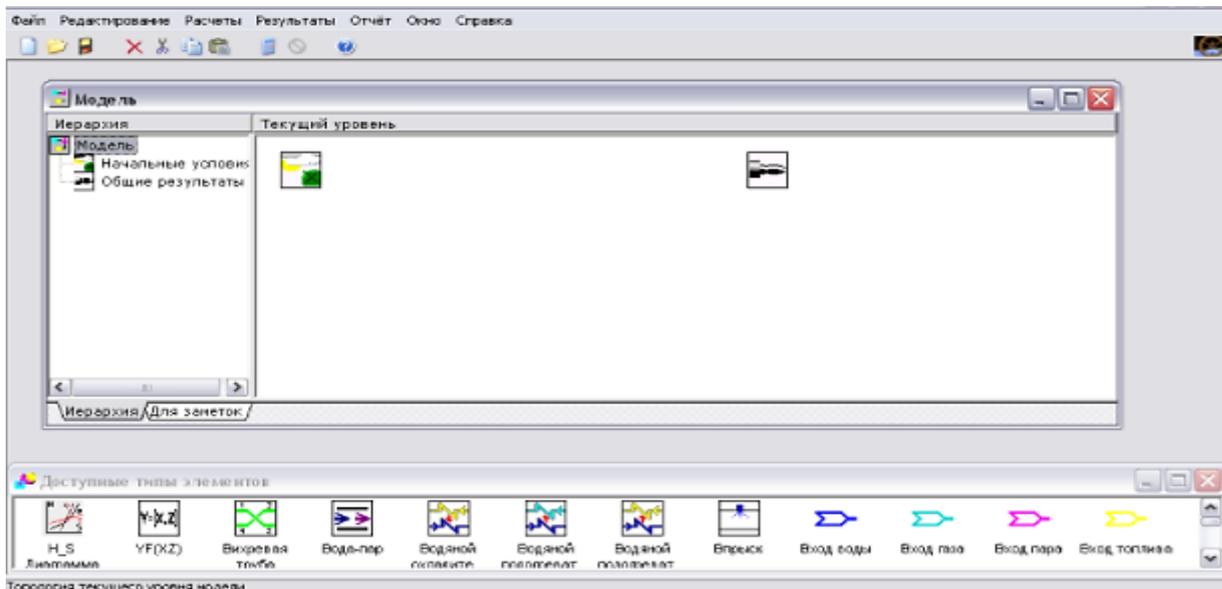


Рис. 2. Окно «Модель»
Fig.2. Model Window

Окно «Доступные типы элементов» появляется на экране монитора при выполнении команды «Новая модель» или «Открыть» [Файл – Открыть] или при нажатии соответствующих кнопок на панели инструментов и содержит набор типовых элементов, необходимых для конструирования схемы установки. Изображение окна «Доступные типы элементов» показано на рис. 3.

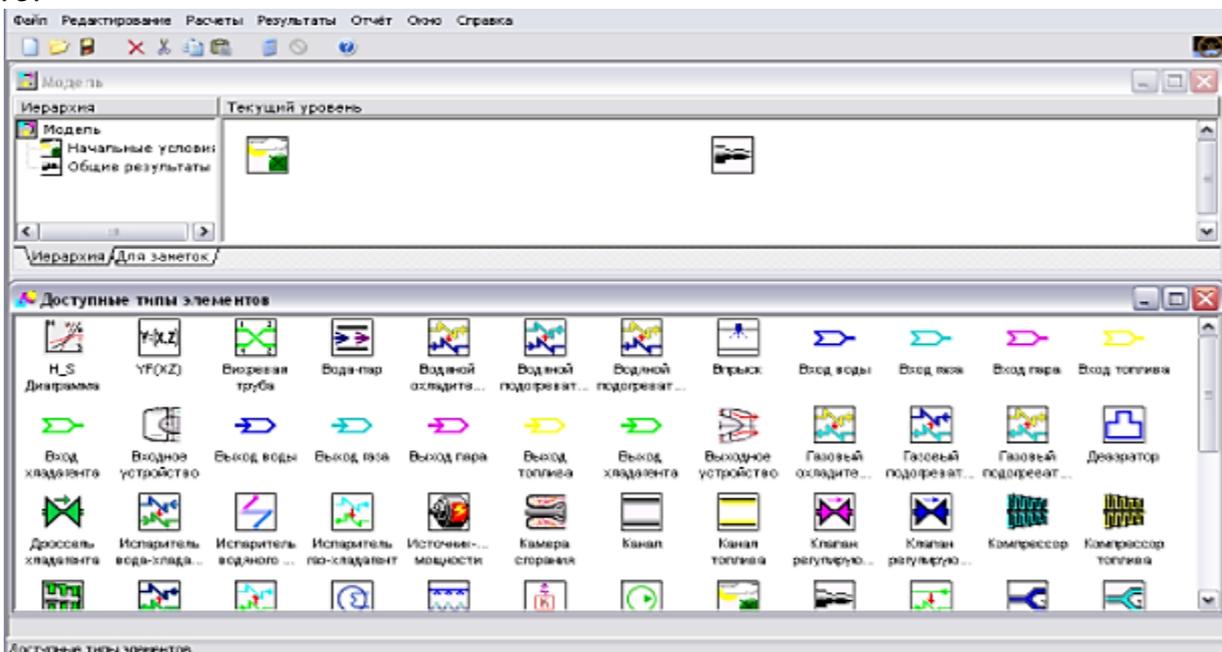


Рис. 3. Окно «Доступные типы элементов»
Fig. 3. The Available Element Types Window

Типовые элементы представлены в виде «иконок» со схематическим изображением, отражающим суть элемента. Для удобства пользования элементы расположены в алфавитном

порядке. Добавление нового элемента осуществляется путём его перетаскивания в поле правой части окна «Модель» – окно «Текущий уровень».

Для задания исходных данных по элементам модели, выполняется двойное нажатие левой клавишей мыши по элементу модели, которое открывает окно элемента модели с одноименным названием (например, для элемента «Входное устройство» открываем окно «Входное устройство»). В закладке «Входные параметры» задаются исходные данные. Данная операция повторяется для всех элементов модели. В этих элементах значения входных параметров задаются в первом приближении.

При затруднениях в задании исходных данных необходимо сделать активным интересующий входной параметр и нажать сочетание клавиш Alt+F1, вызвав тем самым справку по данному параметру. На экране появится окно справки с соответствующим пояснением.

Пример вызова справки для параметра «Теплотворная способность топлива [кДж/кг]» во вкладке «Входные параметры» элемента модели «Начальные условия» представлен на рис. 4.

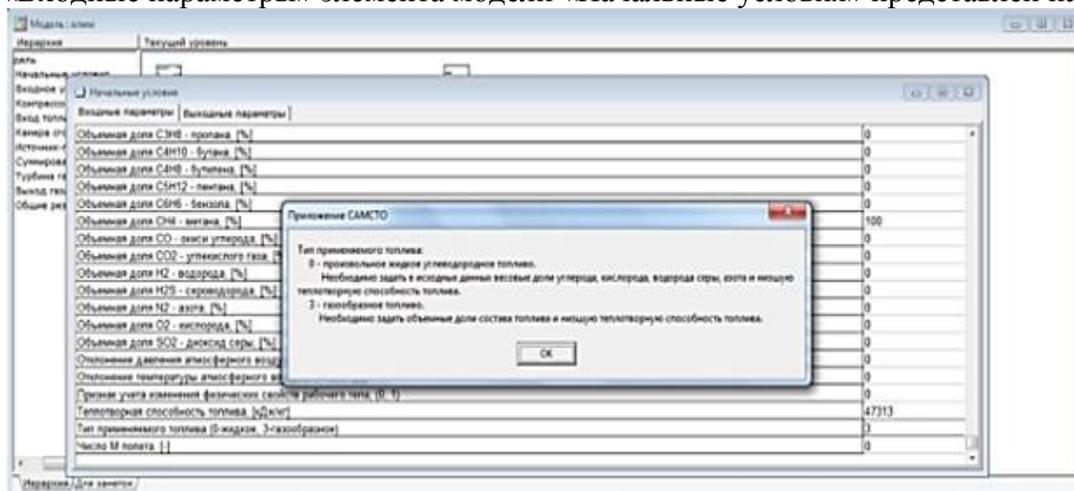


Рис.4.Окно справки
Fig.4. Help Window

Ниже представлен процесс задания исходных данных для всех элементов модели, отражающий особенности формирования каждого элемента.

Элемент модели «Начальные условия». При двойном клике мышью на элементе модели открывается следующее окно (рис. 5):

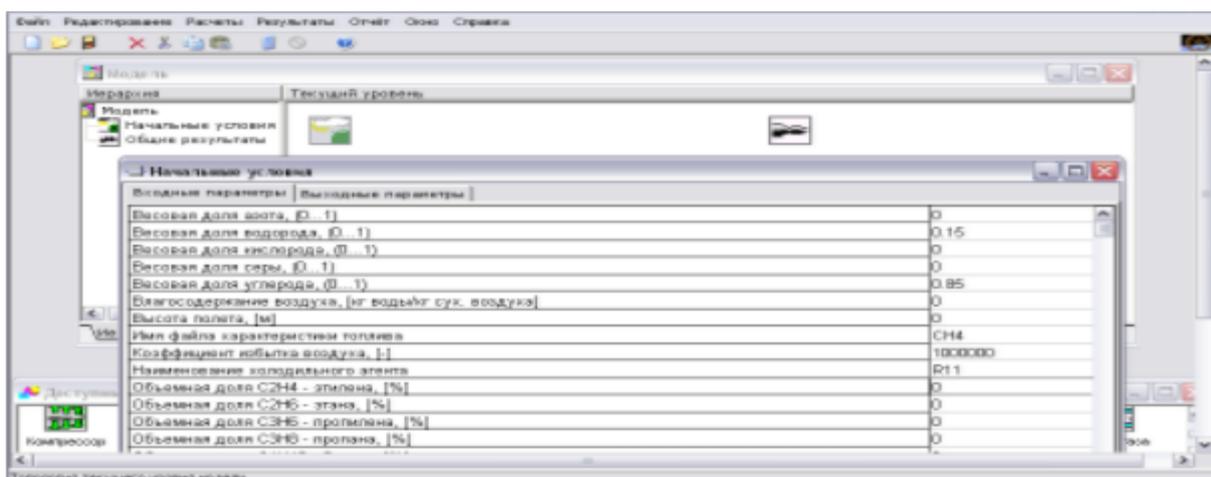


Рис. 5. Исходные данные к элементу модели «Начальные условия»
Fig. 5. Initial data to the element of the model «Initial conditions»

Во вкладке «Входные параметры» в соответствующих строках указывается тип топлива, применяемого в ГТУ и его теплотворная способность.

Элемент модели «Входное устройство». В расчёте принимается значение коэффициента

полного давления входного устройства (ВУ) равным единице и задается расход воздуха на входе в ВУ в соответствие с исходными данными.

Окно исходных данных для элемента «Входное устройство» представлено на рис. 6.

Входные параметры	Выходные параметры
Заданное значение коэффициента полного давления ВУ [-]	1
Имя файла характеристики коэффициента полного давления ВУ	Signalx
Номер входного устройства [1,2,3...]	1
Приведенная скорость на выходе ВУ [-]	0.6
Приведенный расход воздуха на входе ВУ, [кг/с]	408.897
Признак задания коэффициента полного давления ВУ (0, 1, 2, 3)	0

Рис.6. Исходные данные к элементу модели «Входное устройство»

Fig.6. Input data to the «Input device» model element

Элемент модели «Компрессор». Для элемента «Компрессор» задаются следующие параметры:

1. Адиабатический КПД компрессора (0,83...0,88);
2. Относительный расход воздуха 1 и 2 отборов;
3. Частота вращения ротора ГТУ;
4. Расход воздуха через ГТУ;
5. Степень повышения полного давления в компрессоре.

Окно формирования исходных данных элемента модели «Компрессор» представлено на рис.7.

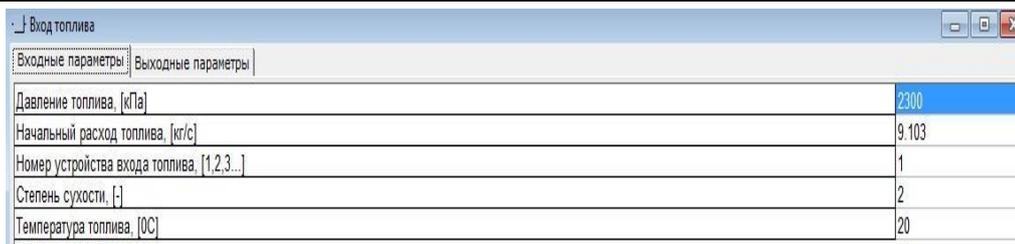
Входные параметры	Выходные параметры
Адиабатический (политропный) КПД в точке образумеряния хар-ки компрессора [-]	0.88
Имя файла зависимости коэффициента влияния Kкрд	Неизвестно
Имя файла зависимости коэффициента влияния Kкр	Неизвестно
Имя файла характеристики компрессора	kom10
Номер компрессора [1,2,3...]	1
Окружная скорость, [м/с]	Неизвестно
Относительная адиабатическая работа компрессора до 1 отбора [-]	1
Относительная адиабатическая работа компрессора до 2 отбора [-]	1
Относительный расход воздуха 1 отбора [-]	0.11
Относительный расход воздуха 2 отбора [-]	0
Приведенная скорость на входе в компрессор [-]	0.5
Приведенная скорость на выходе из компрессора [-]	0.5
Приведенная частота вращения в точке образумеряния характеристики	3000
Приведенный расход воздуха в точке образумеряния характеристики, [кг/с]	408.897
Признак учета влияния числа Re на характеристики компрессора: 0 - нет, 1 - да	0
Расчет компрессора: 0 - стандартного, 1 - дозимного	0
Расчет: 0-без поправок, 1-с поправками на Пик и КПД от влажности	0
Расчет: 0-без хар-к, 1-со станд. хар-кой, 2-с АВНА, 3-КПД политропный	1
Рисование характеристики: 0 - нет, 1 - да	1
Средний диаметр первого рабочего колеса, [м]	Неизвестно
Степень повышения давления в рабочей точке [-]	13.82
Степень повышения давления в точке образумеряния характеристики [-]	13.82
Теоретический напор	Неизвестно
Угол установки ВНА в рабочей точке [град]	Неизвестно
Угол установки ВНА в точке образумеряния характеристики компрессора [град]	Неизвестно
Хард пополок на среднем диаметре, [м]	Неизвестно
Частота вращения в точке завязки	3000

Рис.7. Исходные данные элемента модели «Компрессор»

Fig.7. Initial data of the element of the «Compressor» model

Элемент модели «Вход топлива». Для элемента «Вход топлива» необходимо задать давление подаваемого в камеру сгорания топлива, расход топлива, степень сухости и его температуру.

Окно формирования исходных данных представлено на рис. 8.



Входные параметры	Выходные параметры
Давление топлива, [кПа]	2300
Начальный расход топлива, [кг/с]	9.103
Номер устройства входа топлива, [1,2,3...]	1
Степень сухости, [-]	2
Температура топлива, [°C]	20

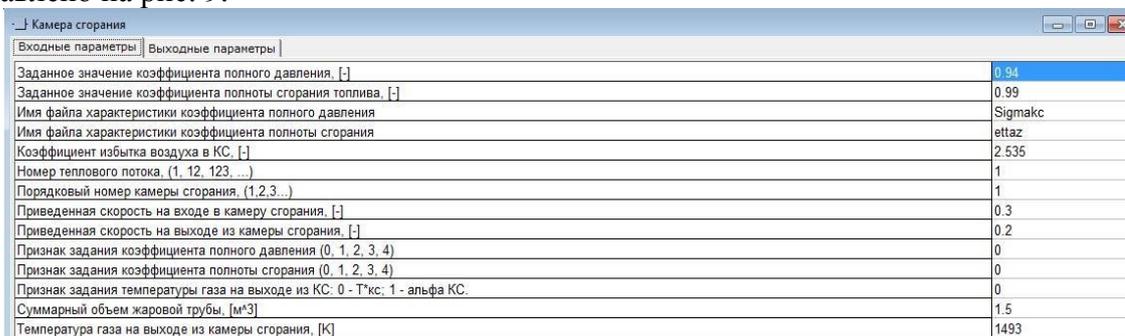
Рис.8. Исходные данные элемента модели «Вход топлива»

Fig.8. Initial data of the model element «Fuel input»

Элемент модели «Камера сгорания». Для элемента «Камера сгорания» задаются следующие параметры:

1. Значение коэффициента полного давления (0,94...0,96);
2. Значение коэффициента полноты сгорания топлива (0,985...0,995);
3. Температура газа на выходе из камеры сгорания.

Окно формирования исходных данных элемента модели «Камера сгорания» представлено на рис. 9.



Входные параметры	Выходные параметры
Заданное значение коэффициента полного давления, [-]	0.94
Заданное значение коэффициента полноты сгорания топлива, [-]	0.99
Имя файла характеристики коэффициента полного давления	Sigmakc
Имя файла характеристики коэффициента полноты сгорания	ettaz
Коэффициент избытка воздуха в КС, [-]	2.535
Номер теплового потока, (1, 12, 123, ...)	1
Порядковый номер камеры сгорания, (1,2,3...)	1
Приведенная скорость на входе в камеру сгорания, [-]	0.3
Приведенная скорость на выходе из камеры сгорания, [-]	0.2
Признак задания коэффициента полного давления (0, 1, 2, 3, 4)	0
Признак задания коэффициента полноты сгорания (0, 1, 2, 3, 4)	0
Признак задания температуры газа на выходе из КС: 0 - Т'кс; 1 - альфа КС.	0
Суммарный объем жаровой трубы, [м³]	1.5
Температура газа на выходе из камеры сгорания, [K]	1493

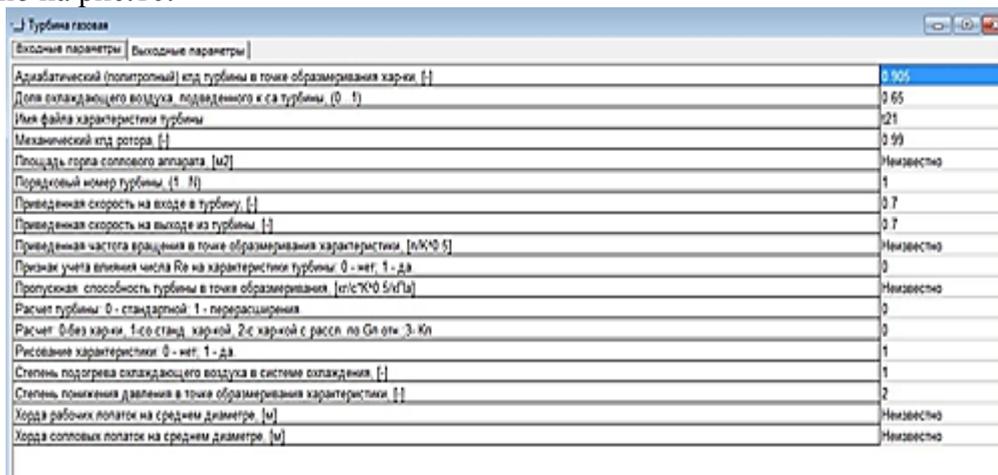
Рис.9. Исходные данные элемента модели «Камера сгорания»

Fig.9. Initial data of the combustion chamber element

Элемент модели «Турбина газовая» Для элемента «Турбина газовая» задаются следующие параметры:

1. Адиабатический КПД турбины (0,9...0,925);
2. Доля охлаждающего воздуха, подведенного к СА турбины 0,11;
3. Механический КПД ротора;

Окно формирования исходных данных элемента модели «Турбина газовая» представлено на рис.10.



Входные параметры	Выходные параметры
Адиабатический (политропный) КПД турбины в точке образумеривания жарки, [-]	0.905
Доля охлаждающего воздуха, подведенного к са турбины, (0 - 1)	0.11
Имя файла характеристики турбины	21
Механический КПД ротора, [-]	0.99
Площадь горла соплового аппарата, [м²]	Неизвестно
Порядковый номер турбины, (1 - 3)	1
Приведенная скорость на входе в турбину, [-]	0.7
Приведенная скорость на выходе из турбины, [-]	0.7
Приведенная частота вращения в точке образумеривания характеристики, [1/с*0.5]	Неизвестно
Признак учета влияния числа Re на характеристики турбины: 0 - нет; 1 - да	0
Пропускная способность турбины в точке образумеривания, [кг/с*0.5/кПа]	Неизвестно
Расчет турбины: 0 - стандартной; 1 - перераширенная	0
Расчет: 0 - без жарки; 1 - со станд жаркой; 2 - с жаркой с рассл по Блоти; 3 - Кп	0
Рисование характеристики: 0 - нет; 1 - да	1
Степень подогрева охлаждающего воздуха в системе охлаждения, [-]	1
Степень понижения давления в точке образумеривания характеристики, [-]	2
Хорда рабочих лопаток на среднем диаметре, [м]	Неизвестно
Хорда сопловых лопаток на среднем диаметре, [м]	Неизвестно

Рис.10. Исходные данные элемента модели «Турбина газовая»

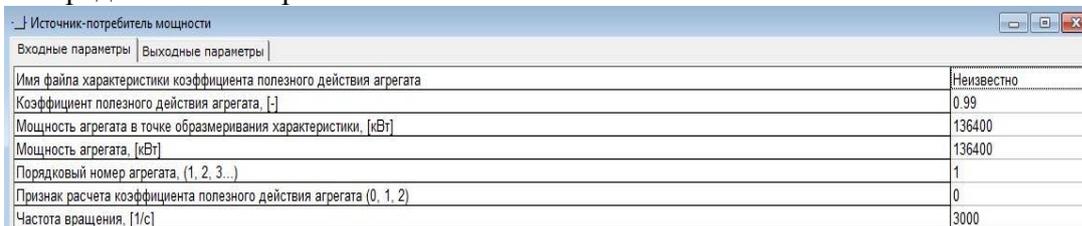
Fig.10. Initial data of the element of the model «Turbine gas»

Элемент модели «Суммирование мощности». Входные параметры данного элемента модели остаются неизменными.

Элемент модели «Источник-потребитель мощности». Для элемента «Источник-потребитель мощности» задаются следующие параметры:

1. КПД турбогенератора;
2. Мощность агрегата;
3. Частота вращения.

Окно формирования исходных данных элемента модели «Источник-потребитель мощности» представлено на рис. 11.



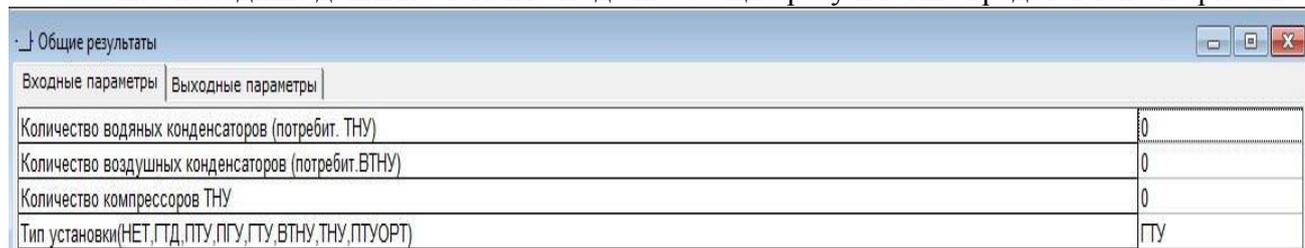
Входные параметры	Выходные параметры
Имя файла характеристики коэффициента полезного действия агрегата	Неизвестно
Коэффициент полезного действия агрегата, [-]	0.99
Мощность агрегата в точке образмеривания характеристики, [кВт]	136400
Мощность агрегата, [кВт]	136400
Порядковый номер агрегата, (1, 2, 3...)	1
Признак расчета коэффициента полезного действия агрегата (0, 1, 2)	0
Частота вращения, [1/с]	3000

Рис.11. Исходные данные элемента модели «Источник-потребитель мощности»

Fig.11. Source data of the «Source-consumer power» model element

Элемент модели «Общие результаты». В данном элементе необходимо указать тип рассчитываемой установки. В нашем случае в строку параметра «Тип установки» с клавиатуры в русской раскладке вбивается тип установки «ГТУ».

Окно исходных данных элемента модели «Общие результаты» представлено на рис.12.



Входные параметры	Выходные параметры
Количество водяных конденсаторов (потребит. ТНУ)	0
Количество воздушных конденсаторов (потребит. ВТНУ)	0
Количество компрессоров ТНУ	0
Тип установки(НЕТ, ГТД, ГТУ, ПГУ, ГТУ, ВТНУ, ТНУ, ПТУОРТ)	ГТУ

Рис.12. Исходные данные элемента модели «Общие результаты»

Fig.12. Initial data of the element of the model «General results»

После задания исходных данных для всех элементов модели, можно приступить непосредственно к её расчёту.

Запуск термодинамического расчёта производится любым из предложенных способов: нажатием на панели управления кнопки «Начать расчет» или через пункт меню «Расчеты» [Расчеты – Начать расчет], при этом выполняется простой расчет двигателя без подбора и оптимизации параметров. При нормальном окончании расчета и указании в команде «Настройки» «Выдавать сообщения об окончании расчета», появится информационное окно с сообщением – «Расчет окончен» (рис.13).

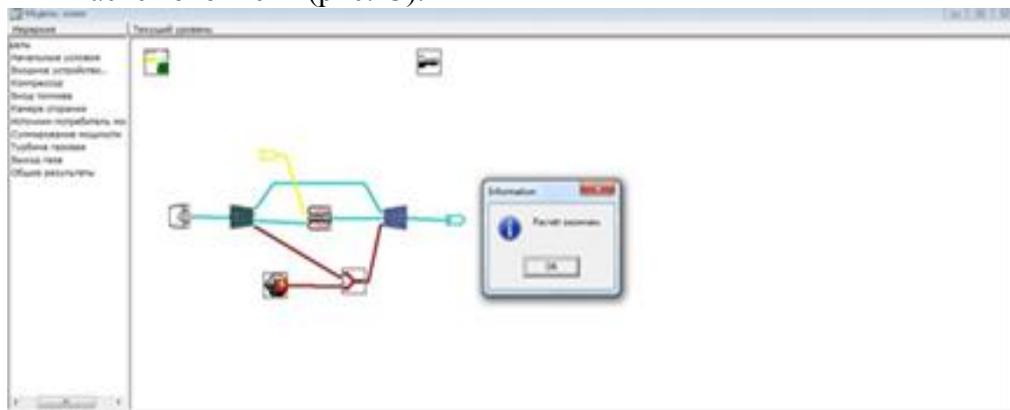
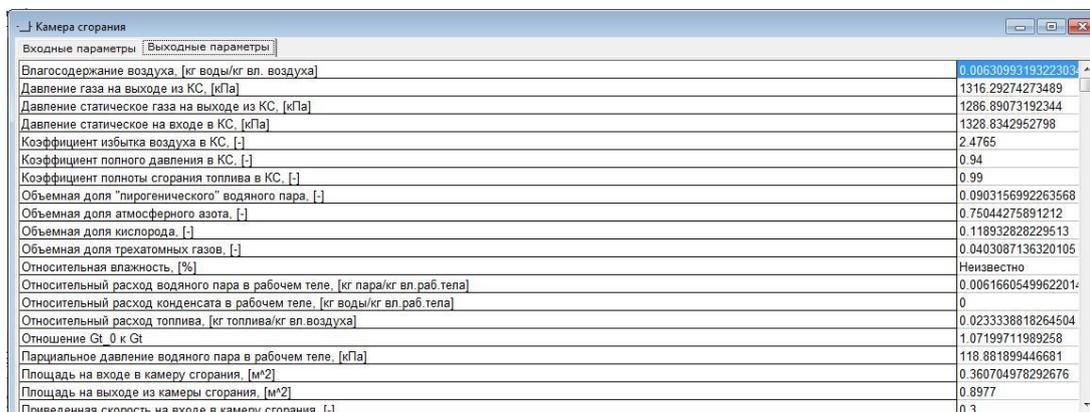


Рис.13. Сообщение об окончании расчета
Fig.13. Report about the end of the calculation

Получившиеся результаты отображаются в закладке «Выходные параметры» по всем элементам модели (двойное нажатие левой клавишей мыши на элементе модели и выбор соответствующей закладки в окне модели).

На рис.14 представлены результаты расчёта элемента модели «Камера сгорания».



Параметр	Значение
Влагосодержание воздуха, [кг воды/кг вл. воздуха]	0.0063099319322303
Давление газа на выходе из КС, [кПа]	1316.29274273489
Давление статическое газа на выходе из КС, [кПа]	1286.89073192344
Давление статическое на входе в КС, [кПа]	1328.8342952798
Коэффициент избытка воздуха в КС, [-]	2.4765
Коэффициент полного давления в КС, [-]	0.94
Коэффициент полноты сгорания топлива в КС, [-]	0.99
Объемная доля "пирогенического" водяного пара, [-]	0.0903156992263568
Объемная доля атмосферного азота, [-]	0.75044275891212
Объемная доля кислорода, [-]	0.118932828229513
Объемная доля трехатомных газов, [-]	0.0403087136320105
Относительная влажность, [%]	Неизвестно
Относительный расход водяного пара в рабочем теле, [кг пара/кг вл. раб. тела]	0.0061660549962201
Относительный расход конденсата в рабочем теле, [кг воды/кг вл. раб. тела]	0
Относительный расход топлива, [кг топлива/кг вл. воздуха]	0.0233338818264504
Отношение G_f к G_t	1.07199711989258
Парциальное давление водяного пара в рабочем теле, [кПа]	118.881899446681
Площадь на входе в камеру сгорания, [м ²]	0.360704978292676
Площадь на выходе из камеры сгорания, [м ²]	0.8977
Повышенная скорость на выходе из камеры сгорания, [-]	0.3

Рис.14. Закладка «Выходные параметры» с результатами расчёта в окне элемента «Камера сгорания»

Fig.14. «Output parameters» tab with calculation results in the «Combustion chamber» element window

Погрешность в определении, по сравнению с данными, должна составлять менее 3%.

В случае превышения заданной погрешности, необходимо скорректировать исходные данные по элементам модели. Корректируются значения параметров элементов ГТУ, выбираемых из диапазона (КПД компрессора, газовой турбины, турбогенератора; значение коэффициента полного давления и коэффициента полноты сгорания топлива; относительные величины отборов охлаждающего воздуха в компрессоре).

Вывод. Основная сложность контроля технического состояния проточной части центробежного нагнетателя заключается в трудности математического моделирования или количественной оценки процессов, протекающих в нагнетателе, что приводит к сложным проблемам установления достоверного диагноза за определенный промежуток времени.

Разработана математическая модель центробежного компрессора, включающая расчет термодинамических свойств природного газа, приведение параметров центробежного компрессора к начальным условиям и к частоте вращения; определены интегральные показатели технического состояния нагнетателя.

Выполнена программная реализация математической модели центробежного компрессора в ПК DVIwT. Анализ расчетов показывает, что математическая модель адекватная, наличие погрешности связано с учетом свойств газов изо-бутана и и-гексана (в отличие от методики ВНИИГАЗ).

Выполняемые исследования по оценке технического состояния центробежного компрессора, эксплуатируемой на КС, способны указать на наличие или отсутствие дефектов центробежного компрессора.

Комплексное использование методов технической диагностики обеспечивает возможность, при наличии современных универсальных аппаратных средств, эффективного контроля работоспособности энергетических установок, совершенствования системы обслуживания, снижения затрат на ремонтные операции, оптимизации управления компрессорными станциями в составе автоматизированной системы управления газопроводов.

Математическое моделирование центробежного компрессора создает возможность для автоматизации оценки технического состояния газоперекачивающего агрегата. Это поможет своевременно обнаружить и устранить проблемы, что позволит обеспечить нормальную эксплуатацию газоперекачивающего агрегата.

Библиографический список:

1. Козаченко коэффициент А.Н. Эксплуатация компрессорных проточной станций адекватная магистральных газопроводов. – М.: Нефть и газ, 1999. – 463 с.
2. Методические указания по проведению теплотехнических и газодинамических расчетов при испытаниях газотурбинных газоперекачивающих агрегатов ПР 51-31323949-43-99 Щуровский В.А и дру., ВНИИГАЗ, 1993 г.
3. Газотурбинная установка ГТУ – 16П Комплексное диагностическое обследование по эксплуатационным параметрам. Методика 83-00-900ПМ 156 ОАО «Авиадвигатель», Методика 83-00-900ПМ 156 ОАО «Авиадвигатель», 2005.
4. Горюнов И.М. «Система математического моделирования тепловых, энергетических и комбинированных установок (DVIwT)» / Программа для ЭВМ №2004610623 от 04.03.2004 РОМПАТЕНТ, Москва, 2004.
5. Межерецкий А.П., Корсов Ю.Г. Параметрическая диагностика газотурбинных установок для привода нагнетателей природного газа. М.: Энергомашиностроение, 1987, №2.
6. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, №, 1987. – 240 с.
7. Кунина П.С., Павленко П.П. Диагностика газоперекачивающих агрегатов с центробежным нагнетателями. Ростов-га-Дону, изд-вл РГУ, 2011. -362 с.
8. Щуровский В.А., Зайцев Ю.А. Газотурбинные газоперекачивающие агрегаты. – М.: Недра, 1999. – 191 с.
9. Газоперекачивающий агрегат ГПА – 16Р «Уфа» Руководство по эксплуатации, 911.00.00.000 РЭ 0 ЛУ, Книга 1 «Техническое описание и работа».
10. Эксплуатация компрессорных станций магистральных газопроводов, Справочник, М.: Нефть и газ, 1999 год
11. Методические указания по проведению теплотехнических и газодинамических расчетов при испытаниях газотурбинных, газоперекачивающих агрегатов ПР 51-31323949-43-99 Щуровский В.А и др., ВНИИГАЗ, 1999 г.
12. Каталог газодинамических характеристик ЦБК природного газа Щуроаский В.А., Сальников С.Ю., Барцев И.В. и др. ВНИИГАЗ, 2005 г.
13. Рид, ДЖ. Праусниц, Т. Шервуд. Свойства газов и жидкостей: Справочник пособие/ Пер. С англ. Под редакцией Б.И. Соколова. – 3-е изд., перераб. И доп. – Л.: Химия, 1982. -592 с., ил. – Нью-Йорк, 1977
14. Zinre R. Homogenisierungsverfahren fiir Rinderquille und die Bestimmung der moqenital von Giihle. Dtsch. Agrartechn. B.12, No. 7. 1969.
15. Amso is the only pump we can use in our speeded up production system "Pit and Quarry " Vol 48, 2015, 11.
16. Jetsboost pumping capacity, "Pocr Products", Vol 49, 2010, N 10
17. Zinre R. Homogenisierungsverfahren fiir Rinderquille und die Bestimmung der moqenital von Giihle. Dtsch. Agrartechn. B.12, No. 7. 2016.
18. Allott D. Farm Building Digest, 2017, 9.
19. Norcr LANDBRUR, 2016, 26, 10, 263.
20. Farm Industry News, 2017, 6, 3, 36.
21. Зарицкий С.А. Диагностика газоперекачивающих агрегатов газотурбинными приводами. М.: Недра, 2016
22. Богданов Е.А. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования. М.: Высшая школа, 2006.- 279 с.
23. Коллакот Р. Диагностика повреждений: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 512 с.

References:

1. Kozachenko A.N. Ekspluatatsiya kompressornykh stantsii magistral'nykh gazoprovodov. M.: Neft' i gaz; 1999. 463 s. [Kozachenko A.N. Operation of compressor stations of main gas pipelines. M.: Neft' i gaz; 1999. 463 p. (In Russ.)]
2. Shchurovskii V.A i dr. Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu teplotekhnicheskikh i gazodinamicheskikh raschetov pri ispytaniyakh gazoturbinykh gazoperekachivayushchikh agregatov PR 51-31323949-43-99. VNIIGAZ; 1993. [Shchurovskii V.A i dr. Methodological instructions for carrying out thermal and gas-dynamic calculations for testing gas-turbine gas-pumping units PR 51-31323949-43-99. VNIIGAZ; 1993. (In Russ.)]
3. Gazoturbinnaya ustanovka GTU – 16P. Kompleksnoe diagnosticheskoe obsledovanie po ekspluatatsionnym parametram. Metodika 83-00-900PM 156 ОАО «Авиадвигатель». 2005. [Gas turbine unit GTU-16P. Complex diagnostic examination for operational parameters. Method 83-00-900PM 156 of ОАО «Авиадвигатель». 2005. (In Russ.)]

4. Goryunov I.M. «Sistema matematicheskogo modelirovaniya teplovykh, energeticheskikh i kombinirovannykh ustanovok (DVIwT)». Programma dlya EVM №2004610623 ot 04.03.2004. ROSPATENT. Moskva; 2004. [Goryunov I.M. «System of mathematical modeling of thermal, power and combined installations (DVIwT)». PC programme №2004610623 from 04.03.2004. ROSPATENT. Moscow; 2004. (In Russ.)]
5. Mezheretskii A.P., Korsov Yu.G. Parametricheskaya diagnostika gazotrubnykh ustanovok dlya privoda nagnetatelei prirodnogo gaza. M.: Energomashinostroenie; 1987. №2. [Mezheretskii A.P., Korsov Yu.G. Parametric diagnostics of gas-turbine units for driving natural gas superchargers. Moscow: Energomashinostroenie; 1987. №2. (In Russ.)]
6. Birger I.A. Tekhnicheskaya diagnostika. M.: Mashinostroenie; 1987. 240 s. [Birger I.A. Technical diagnostics. M.: Mashinostroenie; 1987. 240 p. (In Russ.)]
7. Kunina P.S., Pavlenko P.P. Diagnostika gazoperekachivayushchikh agregatov s tsentrobezhnym nagnetatelyami. Rostov-na-Donu: Izd-vo RGU; 2011. 362 s. [Kunina P.S., Pavlenko P.P. Diagnostics of gas-pumping units with centrifugal superchargers. Rostov-on-Don: Publishing house of the Rostov State University; 2011. 362 p. (In Russ.)]
8. Shchurovskii V.A., Zaitsev Yu.A. Gazoturbinye gazoperekachivayushchme agregaty. M.: Nedra; 1999. 191 s. [Shchurovskii V.A., Zaitsev Yu.A. Gas-turbine gas-pumping units. M.: Nedra; 1999. 191 p. (In Russ.)]
9. Gazoperekachivayushchii agregat GPA – 16R «Ufa» Rukovodstvo po ekspluatatsii, 911.00.00.00.000 RE 0 LU, Kniga 1 «Tekhnicheskoe opisanie i rabota». [Gas-pumping unit GPA-16R «Ufa». Operation manual, 911.00.00.00.000 RE 0 LU, Book 1 «Technical description and work». (In Russ.)]
10. Ekspluatatsiya kompressornykh stantsii magistral'nykh gazoprovodov. Spravochnik. M. : Neft' i gaz; 1999. [Operation of compressor stations of main gas pipelines. Reference book. M. : Neft' i gaz; 1999. (In Russ.)]
11. Shchurovskii V.A i dr. Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu teplotekhnicheskikh i gazodinamicheskikh raschetov pri ispytaniyakh gazoturbinykh, gazoperekachivayushchikh agregatov PR 51-31323949-43-99. VNIIGAZ;1999. [Shchurovskii V.A et al. Methodological instructions for carrying out thermal and gas-dynamic calculations for testing gas turbine and gas-pumping units PR 51-31323949-43-99. VNIIGAZ;1999. (In Russ.)]
12. Shchurovskii V.A., Sal'nikov S.Yu., Bartsev I.V. i dr. Katalog gazodinamicheskikh kharakteristik TsBK prirodnogo gaza. VNIIGAZ; 2005. [Shchurovskii V.A., Sal'nikov S.Yu., Bartsev I.V. et al. Catalogue of Gas Dynamic Characteristics of the CSC of Natural Gas. VNIIGAZ; 2005. (In Russ.)]
13. Rid R., Prausnits Dzh., Shervud T. Svoistva gazov i zhidkosti: Spravochnik posobie (Pod redaktsiei B.I. Sokolova). L.: Khimiya; 1982. 592 s. [Rid R., Prausnits Dzh., Shervud T. Properties of Gases and Liquids: A Reference Manual (Edited by B.I. Sokolov). L.: Khimiya; 1982. 592 p. (In Russ.)]
14. Zinre R. Homogenisierungsverfahren fiir Rindergiille und die Bestimmung der mogenital von Giille. Dtsch. Agrartechn. 1969; B.12(7).
15. Amso is the only pump we can use in our speeded up production system. Pit and Quarry. 2015;48:11.
16. Jetsboost pumping capacity. Pocr. Products. 2010;49(10).
17. Zinre R. Homogenisierungsverfahren fiir Rindergiille und die Bestimmung der mogenital von Giille. Dtsch. Agrartechn. 2016; B.12(7).
18. Allott D. Farm Building Digest. 2017;9.
19. Norcr LANDBRUR. 2016;26(10):263.
20. Farm Industry News. 2017;6(3):36.
21. Zaritskii S.A. Diagnostika gazoperekachivayushchikh agregatov gazoturbinnymi privodami. M.: Nedra; 2016. [Zaritskii S.A. Diagnosis of gas pumping units by gas turbine drives. M.: Nedra; 2016. (In Russ.)]
22. Bogdanov E.A. Osnovy tekhnicheskoi diagnostiki neftegazovogo oborudovaniya. M.: Vysshaya shkola; 2006. 279 s. [Bogdanov E.A. Basics of technical diagnostics of oil and gas equipment. M.: Vysshaya shkola; 2006. 279 p. (In Russ.)]
23. Kollakot R. Diagnostika povrezhdenii. M.: Mir; 1989. 512 s. [Kollakot R. Diagnostics of damages. M.: Mir; 1989. 512 p. (In Russ.)]

Сведения об авторе.

Хурамшина Регина Азатовна – магистрант.

Information about the author.

Regina A. Khuramshina – Graduate student.

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 22.09.2017.

Принята в печать 20.11.2017.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 22.09.2017.

Accepted for publication 20.11.2017.