

ГИДРОДИНАМИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ, ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.514

А. Г. Сайфетдинов, А. Ю. Кирсанов, М. С. Хамидуллин,
И. Г. Хисамеев

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ РОТОРНОГО КОМПРЕССОРА ВНУТРЕННЕГО СЖАТИЯ

Ключевые слова: роторный компрессор, коэффициент теплоотдачи, температура газа и стенок, термопара, индицирование.

Работа посвящена исследованию теплового состояния газа и стенок цилиндра с целью определения коэффициента теплоотдачи газа в рабочей полости роторного компрессора. Представлена методика замера температур.

Keys words: rotary compressor, heat-transfer coefficient, temperature of gas and walls, thermocouple, indexing.

The study is devoted to experimental research of the thermal state of the cylinder walls and the gas in order to determine gas heat transfer within the working volume of a rotary compressor. The technique of temperature measurement is presented.

Роторные компрессоры широко применяются в различных отраслях народного хозяйства [1]. Это связано с тем, что они обладают такими положительными качествами, как быстродействие, уравновешенность, надежность и хорошие массогабаритные показатели.

При математическом моделировании рабочего процесса в роторной машине (компрессоре, вакуум-насосе) учет теплообмена между газом её рабочей полости и стенками представляется затруднительным. Особенностью конструкции роторных компрессоров является то, что объем рабочей полости на протяжении всего рабочего процесса «ометается» роторами, и установка датчиков для измерения температуры рабочей полости является затруднительной [2]. В связи с этим возникают сложности определения расчетно-экспериментальных зависимостей коэффициента теплоотдачи от режимных параметров.

В этой статье предлагается методика определения коэффициента теплоотдачи между газом рабочей полости и стенкой цилиндра в воздушном роторном компрессоре внутреннего сжатия [3], которая основана на снятии мгновенных значений температуры газа и поверхности стенки.

Для замера температуры внутренней поверхности стенок, от патрубка всасывания до патрубка нагнетания, установлены термопарные датчики (рис. 1). Диаметр проволоки хромель-копелевых термопар (ХКТ) этих датчиков составляет 0,02 мм. Температура газа замеряется таким же термопарным датчиком, который расположен на врачающемся роторе компрессора. Постоянная времени ХКТ составляет 8-10 мкс.

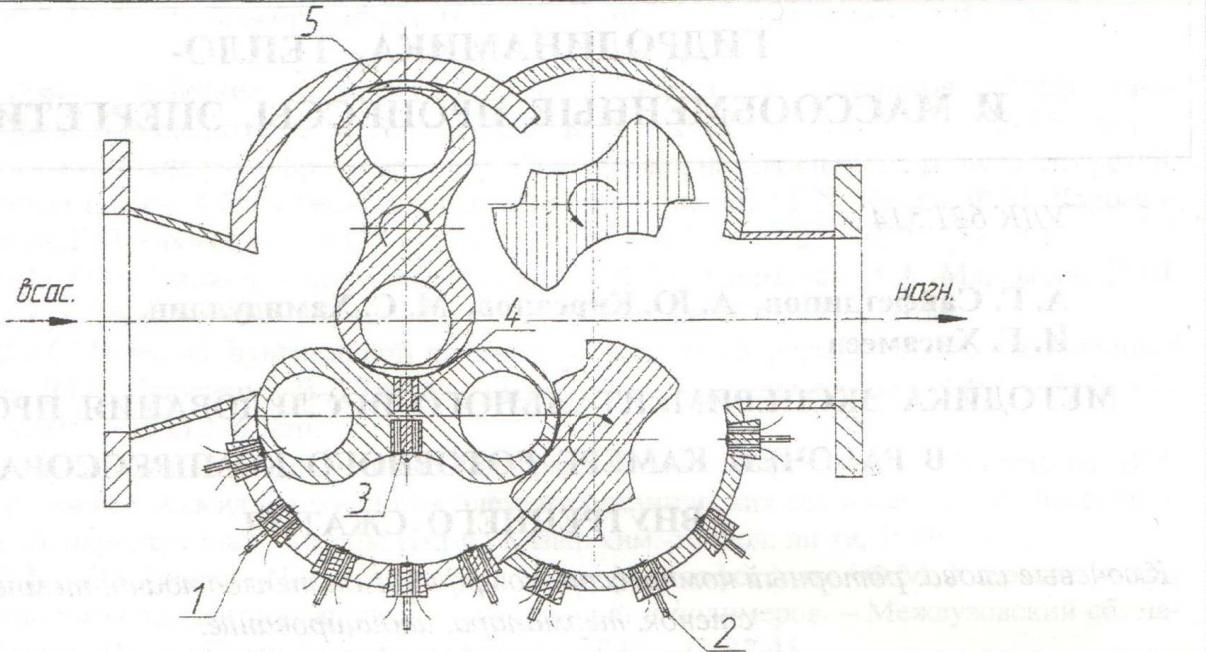


Рис. 1 - Расположение датчиков на корпусе и роторе компрессора: 1 – датчик замера температуры внутренней стенки цилиндра; 2 – датчик замера температуры внутренней стенки полости нагнетания; 3 – датчик замера температуры газа рабочей полости; 4 – чувствительный элемент давления; 5 – проточка

Температура наружной поверхности стенки замеряется при помощи ХКТ, приваренных непосредственно к её поверхности. Диаметр проволоки этих ХКТ 0,5 мм.

Для замера давления в полости машины на этом же роторе установлен чувствительный элемент давления (ЧЭД). Сигнал с вращающейся ХКТ и ЧЭД снимается через ртутно-амальгамированный токосъемник ТРАК-8. Спай ХКТ датчика замера температуры газа, установленного на вращающемся роторе, выступает над поверхностью ротора на 3,5 мм. Чтобы избежать повреждение спая во время работы компрессора, на внешних поверхностях ответного ротора выполнена проточка глубиной 4 мм и шириной 1,5 мм.

Угловой отметчик поворота ротора реализован в виде оптопары (лампа накаливания – фотодиод) с оптическим прерывателем. Последний представляет собой диск с прорезью – на один оборот приходится один электрический импульс.

Фиксация и обработка сигнала с термопарных датчиков, чувствительного элемента давления и углового отметчика производится с помощью специализированного измерительного комплекса, созданного на базе персонального компьютера. Комплекс предназначен для исследования быстропротекающих процессов. Он включает в себя сам измерительный прибор и плату ввода-вывода L-780, с помощью которой прибор подключается к персональному компьютеру (рис.2).

Плата L-780 является быстродействующим и надежным устройством для ввода, вывода и обработки аналоговой и цифровой информации в персональных компьютерах. Плату L-780 можно рассматривать как удобное средство для многоканального сбора информации, и как законченную систему с собственным процессором, позволяющим реализовывать свои собственные алгоритмы обработки сигналов на уровне программирования, установленного на плате, сигнального процессора американской фирмы Analog Devices.

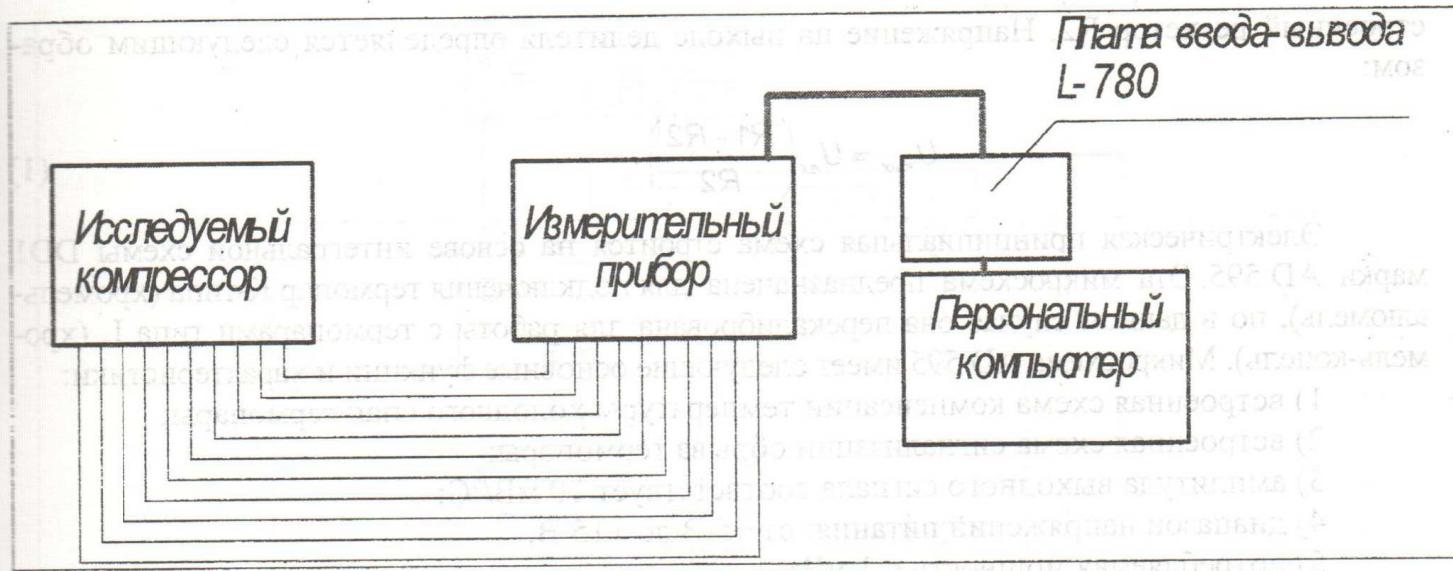


Рис. 2 - Схема измерительного комплекса

На плате имеется один аналого-цифровой преобразователь (АЦП), на вход которого при помощи коммутатора может быть подан один из 16 или 32 аналоговых каналов с внешнего разъема платы. Техническая характеристика АЦП приведена в табл.1.

Таблица 1 - Параметры АЦП

Количество каналов	16 дифференциальных 32 с общей землей
Разрядность	14 бит
Время преобразования	2,5 мкС
Входное сопротивление	Не менее 1 МОм
Диапазон входного сигнала	±5.12 В, ±2.56 В, ±0.3125, ±0.078 В
Максимальная частота преобразования	400 кГц

Концы термопарных датчиков, ЧЭД и углового отметчика подключаются непосредственно к измерительному прибору. Электрическая принципиальная схема измерительного прибора представлена на рис.3. В состав схемы входят следующие функциональные узлы:

- 1) XS1 – цепь фильтрации и преобразования напряжений питания;
- 2) XS2.1-XS2.14 – температурные измерительные каналы;
- 3) XS2.15 – канал подключения углового отметчика;
- 4) XS2.16 – канал подключения датчика давления.

Питание измерительного прибора осуществляется напряжением постоянного тока $U_p = \pm 12$ В. Для формирования U_p используется внешний источник питания, состоящий из двух блоков марки БПС 12-1.

Для формирования напряжения +5 В на печатной плате измерительного прибора выполнена схема XS1, выполняющая также фильтрацию высокочастотных импульсных помех по цепи питания (конденсаторы C1 и C2). Резистивный делитель R1, R2 преобразует напряжение 12 В в 5 В. Для установки точного значения величины +5 В используется под-

строечный резистор R2. Напряжение на выходе делителя определяется следующим образом:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \left(\frac{R1+R2}{R2} \right). \quad (1)$$

Электрическая принципиальная схема строится на основе интегральной схемы DD1 марки AD 595. Эта микросхема предназначена для подключения термопар К-типа (хромель-алюминий), но в данном случае она перекалибрована для работы с термопарами типа L (хромель-копель). Микросхема AD 595 имеет следующие основные функции и характеристики:

- 1) встроенная схема компенсации температуры холодного спая термопары;
- 2) встроенная схема сигнализации обрыва термопары;
- 3) амплитуда выходного сигнала соответствует $10 \text{ мВ/}^{\circ}\text{C}$;
- 4) диапазон напряжений питания: от $+5 \text{ В}$ до $\pm 15 \text{ В}$;
- 5) потребляемая мощность $< 1 \text{ мВт}$;
- 6) дифференциальный вход с высоким входным сопротивлением.

Необходимый диапазон измеряемых температур обеспечивается выбором величины напряжения питания. Так, напряжение питания $0 \dots 5 \text{ В}$ обеспечивает измерение температуры в диапазоне от 0 до 300°C .

Цепь R6, VD1 на рис. 3 обеспечивает сигнализацию обрыва термопары. Резисторы R3-R5 необходимы для перекалибровки микросхемы для работы с термопарой L-типа.

Выходной сигнал термопары ($U_{\text{вх+}}$, $U_{\text{вх-}}$) подается на входы 1, 14 ($+IN$, $-IN$) микросхемы DD1. Усиленное напряжение, представляющее собой сигнал стеночной температуры компрессора, с выхода 9 (VO) DD1 подается на выход прибора $U_{\text{в}}$. Фильтр верхних частот (ФВЧ) первого порядка, реализованный на основе дифференциальной цепи R8, C3, пропускает только переменную составляющую сигнала. Границная частота этого ФВЧ определяется следующим образом:

$$F_0 = \frac{1}{RC}. \quad (2)$$

Номиналы элементов выбраны следующие: $R8 = 1 \text{ МОм}$, $C3 = 1 \text{ нФ}$, что обеспечивает $F_0 = 1 \text{ Гц}$. Таким образом, ФВЧ R8, C3 обеспечивает фильтрацию практически только постоянной составляющей сигнала. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) RC-цепи показана на рис. 4.

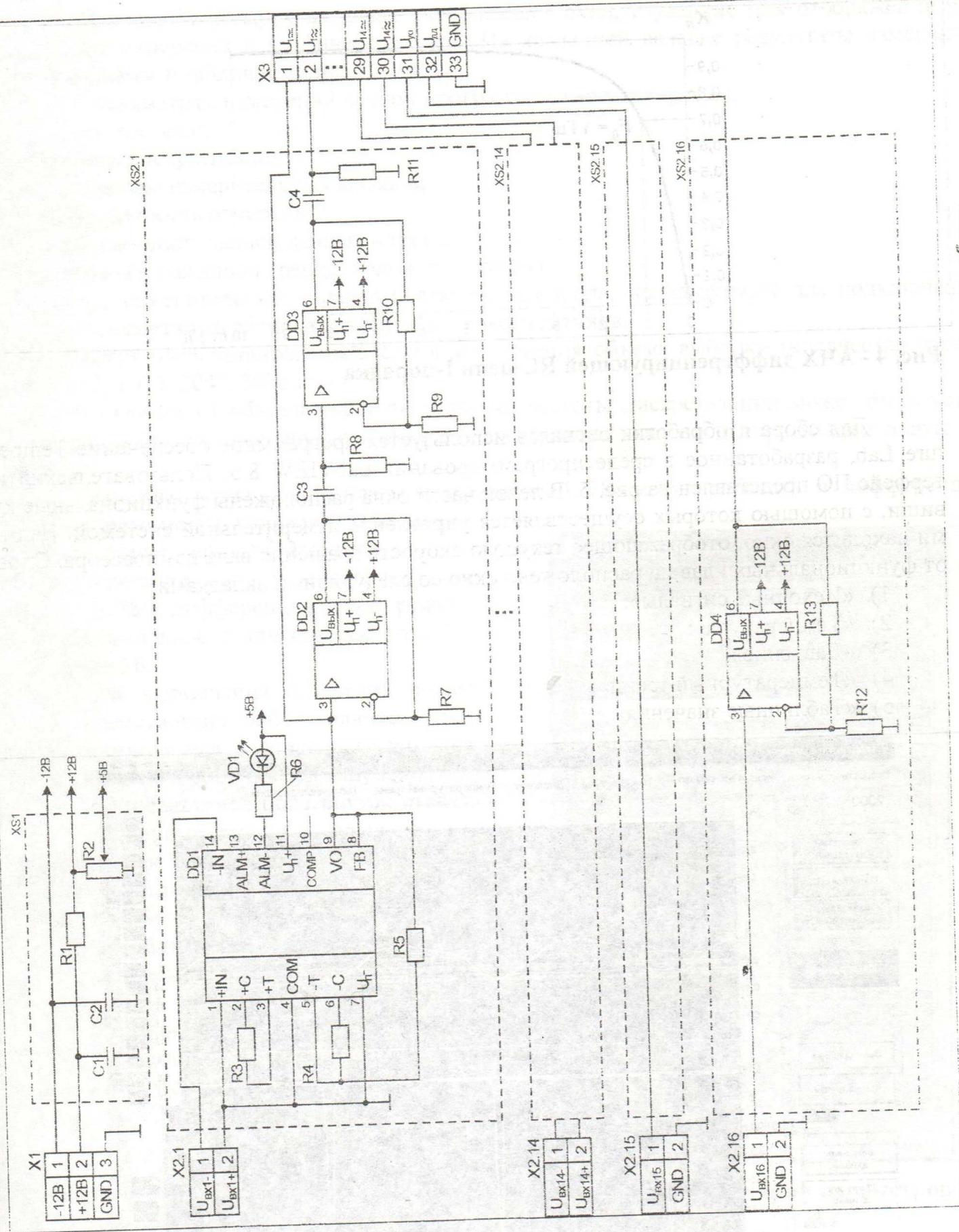
Полученный сигнал усиливается каскадом DD3, который имеет коэффициент усиления $K_u = 10$. Величина K_u определяется выражением:

$$K_u = 1 + \frac{R10}{R9}. \quad (3)$$

Вторая цепь R11, C4 служит для исключения постоянной составляющей, вносимой усилительным каскадом DD3. Номиналы элементов R11, C4 эквивалентны номиналам R8, C3.

На операционном усилителе DD2 собрана схема повторителя напряжения ($K_u = 1$), необходимая для согласования по сопротивлению выхода DD1 со входом DD3.

Рис. 3. Упрощенная схема электрического принципиала для синтезатора частоты



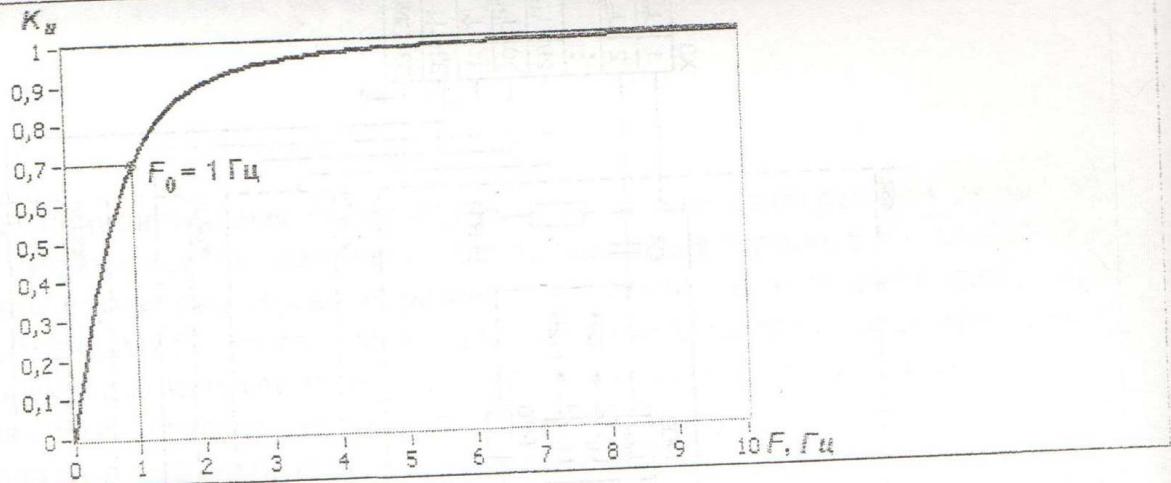


Рис. 4 - АЧХ дифференцирующей RC-цепи I-порядка

Для сбора и обработки сигналов используется программное обеспечение Temperature Lab, разработанное в среде программирования LabVIEW 8.5. Пользовательский интерфейс ПО представлен на рис. 5. В левой части окна расположены функциональные клавиши, с помощью которых осуществляется управление измерительной системой. Над ними находится окно, отображающее текущую скорость вращения вала компрессора. Справа от функциональных клавиш расположено окно со следующими вкладками:

- 1) «Исходные сигналы»;
- 2) «Температура»;
- 3) «Давление»;
- 4) «Температурный тренд»;
- 5) «Табличные значения».

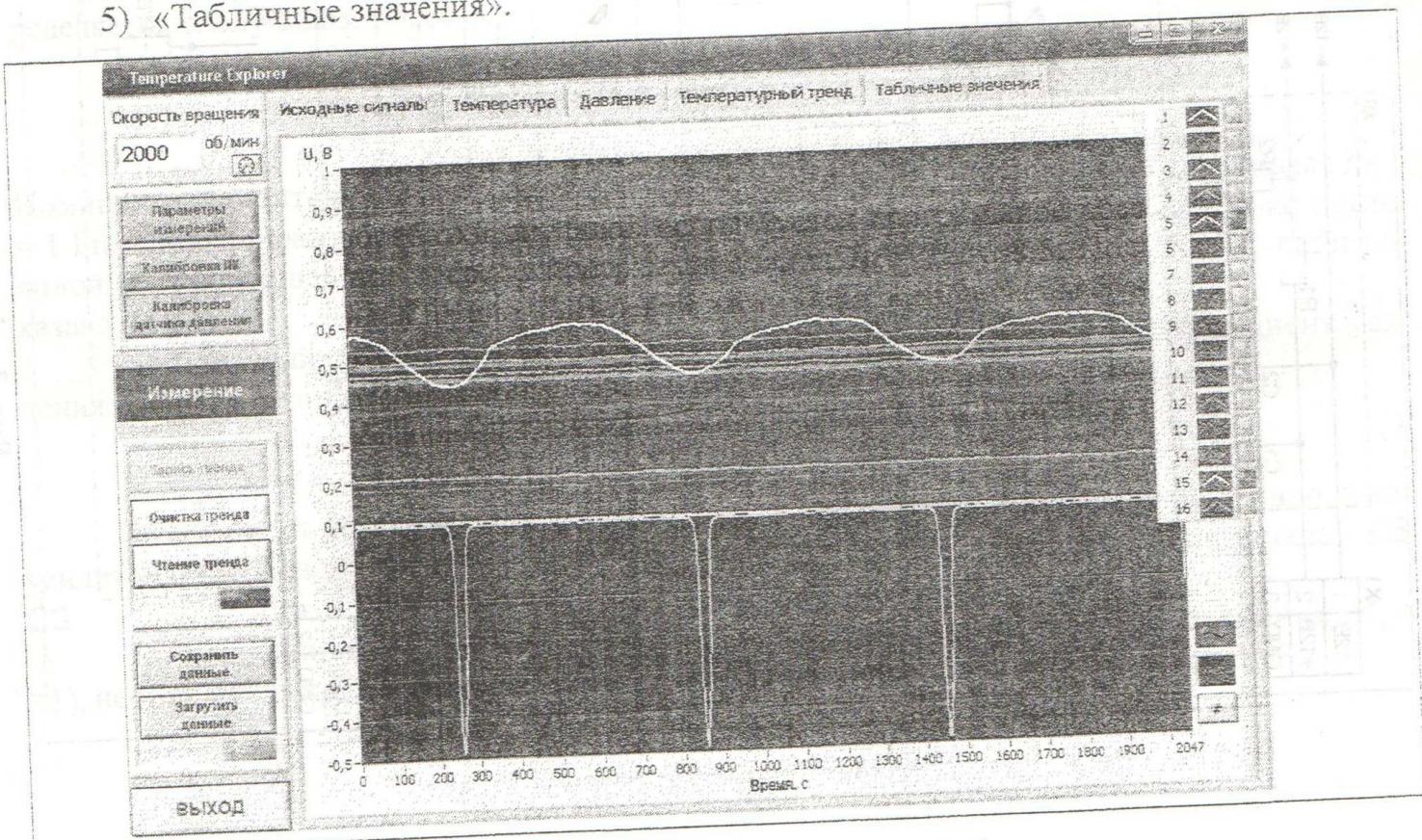


Рис. 5 - Пользовательский интерфейс ПО Temperature Lab

На первых четырех вкладках расположены окна, служащие для отображения результатов измерений в графическом виде. На последней вкладке результаты измерений отображаются в табличном виде.

К параметрам измерений данной программы относятся (рис.6):

- 1) объем выборки;
- 2) частота дискретизации;
- 3) количество измерительных каналов;
- 4) периодичность измерений;
- 5) периодичность записи данных в тренд;
- 6) максимальная длина тренда (количество точек);
- 7) номера измерительных каналов платы ввода/вывода, используемых для подключения углового отметчика, датчика давления и газового датчика.

Могут быть установлены следующие значения объема выборки (количества отсчетов): 512, 1024, 2048, 3072 или 4096.

В отличие от объема выборки, значение частоты дискретизации может быть установлено любым в пределах до 400 кГц (максимальная частота дискретизации платы L-780).

Измерительные каналы платы ввода-вывода L-780 могут работать в дифференциальном режиме (16 каналов) либо в режиме с общей землей (32 канала). ПО Temperature Lab устанавливает для платы L-780 дифференциальный режим, т.е. максимальное количество каналов будет равно 16.

Для выполнения измерений может быть задействовано любое количество измерительных каналов из числа имеющихся (16), причем в любой последовательности.

Температурное поле внутри стенки при экспериментально определенных температурах на ее границах (внутренняя и наружная поверхность) вычисляется с применением численного метода решения задачи нестационарной теплопроводности – метода элементарных балансов (метод Ваничева) [4].

Коэффициент теплоотдачи определяется из совместного решения уравнений Фурье и Ньютона-Рихмана по формуле

$$\alpha = \frac{\lambda_{ct} (t_{bh} - t_1)}{\delta (t_2 - t_{bh})}, \quad (4)$$

где λ_{ct} – коэффициент теплопроводности материала стенки; δ - толщина элементарного участка стенки; t_2 , t_{bh} – мгновенные температуры газа и внутренней стенки, t_1 – температура первого элементарного участка стенки в методе Ваничева.

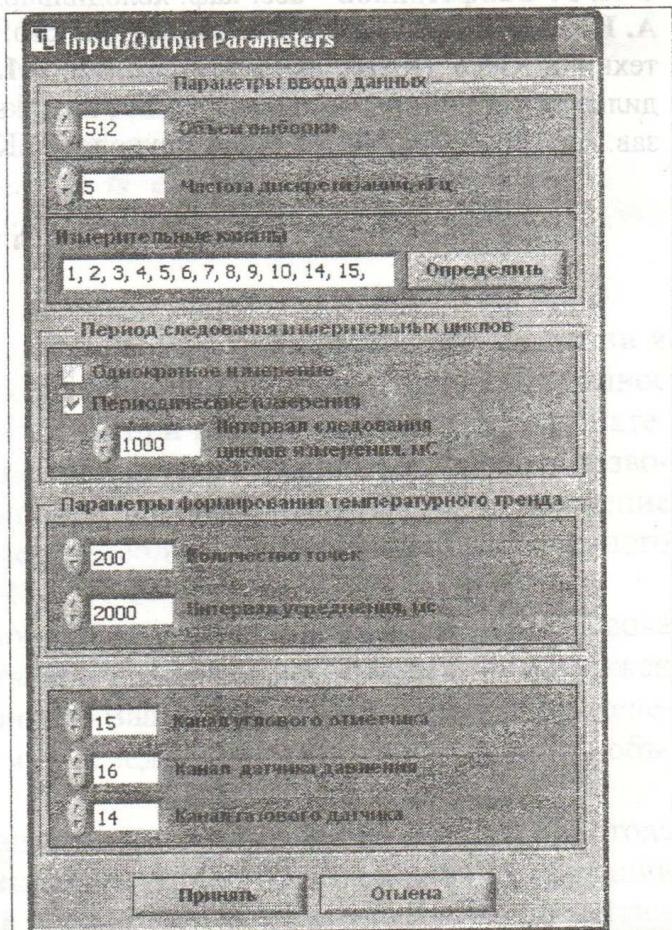


Рис. 6 - Меню задания параметров измерений

Примененный метод позволяет получить зависимость изменения температуры стенки и газа от угла поворота ротора, необходимую для определения мгновенных коэффициентов теплоотдачи.

Литература

1. Максимов, В.А. Компрессорное и холодильное машиностроение на современном этапе / В.А. Максимов, А.А. Мифтахов, И.Г. Хисамеев // Вестник Казан. технол. ун-та. – 1998. – №1. – С. 104-113.
2. Шарапов И.И. Разработка методики измерения и расчета параметров процесса теплообмена в шестеренчатом компрессоре с целью повышения точности расчета рабочего процесса: дис. ... канд. техн. наук / И.И. Шарапов. – Казань: Изд-во Казан. химико-технол. ин-та им. С.М. Кирова, – 146 с.
3. Хамидуллин, М.С. Разработка и исследование роторного компрессора внутреннего сжатия на основе геометрического анализа и моделирования процессов в рабочих камерах: дис. ... канд. техн. наук / М.С. Хамидуллин. – Казань: Изд-во Казан. химико-технол. ин-та им. С.М. Кирова, – 193 с.
4. Гуйго, Э.И. Теоретические основы тепло- и хладотехники: в 2ч. /Под ред. Э.И. Гуйго. –Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1976. – Ч.2. – 224с.

© А. Г. Сайфетдинов - асс. каф. холодильной техники и технологий КГТУ, almazy_kstu@mail.ru; А. Ю. Кирсанов - канд. техн. наук, доц. каф. радиоэлектроники и информационно-измерительной техники КГТУ (КАИ), akirsanov@mail.ru; М. С. Хамидуллин - канд. техн. наук, доц. каф. холодильной техники и технологий КГТУ, mch_kstu@mail.ru, И. Г. Хисамеев – д-р техн. наук, проф., зав. каф. холодильной техники и технологий КГТУ.