

## ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В ТРУБОПРОВОДАХ КОМБИНИРОВАННЫМ ТЕРМОСТАБИЛЬНЫМ ДАТЧИКОМ

©2011 Н. И. Лиманова, П. Е. Юдин, И. А. Лиманов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Трубопроводы газотурбинных двигателей подвержены воздействию разнообразных переменных сил. Кинематическое возбуждение от работающих агрегатов приводит к колебаниям давления в трубопроводной системе и выдвигает задачу измерения давлений. Большинство процессов сопровождается существенным повышением температур рабочих сред. Современные средства измерения давлений, используемые в автоматизированных системах контроля испытаний ГТД, предназначены для работы в температурном диапазоне до 80°C. Предлагаемый термостабильный датчик давления в отличие от известных обладает повышенной точностью измерений за счет исключения погрешностей, возникающих при возрастании температуры среды, давление которой измеряется. Датчик дает возможность расширить рабочий диапазон температур до 400°C при дополнительной погрешности измерений, не превышающей 0,5%.

*Трубопроводы газотурбинных двигателей, измерение давлений, датчики давления.*

В данной работе решается задача измерения давления в трубопроводах с помощью датчиковой аппаратуры. Контроль рабочих процессов газотурбинных двигателей (ГТД) предполагает, например, определение статических давлений воздуха в газоздушном тракте, во входном патрубке, в различных точках гребенки линии совместной работы, давлений масла на входе и выходе двигателя, давлений топлива в контурах форсунок, давлений в гидросистеме реверсивного устройства, а также пульсаций давления в компрессоре ГТД [1]. Большинство процессов, возникающих при доводке и во время испытательного двигателя, сопровождается существенным повышением температур рабочих сред изнутри и на выходе ГТД. Так, температура масла на входе в двигатель варьируется в пределах от 0 до 100°C, на выходе из двигателя — от 0 до 150°C, а температура воздуха в компрессоре достигает 400°C.

Современные средства измерения давлений Метран-100, Сапфир-22, используемые в автоматизированных системах контроля испытаний изделий авиакосмической техники, предназначены для работы в температурном диапазоне, верхняя граница которого достигает максимум 80°C. Дополнительная погрешность, возникающая при работе датчика в условиях повышенных температур, обусловлена в основном неучтен-

ным прогибом его мембраны, возникающим при повышении температуры. Как известно, величина прогиба мембраны датчика давления в нормальных условиях зависит от величины контролируемого давления рабочей среды.

При повышении температуры за счет изменения модуля упругости  $E$  материала чувствительного элемента (ЧЭ) возникает неучтенный дополнительный прогиб  $\Delta z_t$  мембраны. При линейной зависимости  $E$  от температуры  $t$  величина  $\Delta z_t$  описывается следующим выражением [2]:

$$\Delta z_t = -z \frac{B_E \Delta t}{1 + B_E \Delta t}, \quad (1)$$

где  $z$  — прогиб ЧЭ при нормальной температуре  $t_0$ , измеряемый в мм;

$\Delta t$  — разность температур,  $t - t_0$  в °C;

$B_E$  — температурный коэффициент модуля упругости ЧЭ в 1/°C (для металлов  $B_E$  берется со знаком минус).

Например, для ЧЭ, выполненных из стали, при нагреве на каждые 10°C значение погрешности при определении прогиба  $z$  увеличивается на 0,125%, при нагреве на 50°C — на 0,625%, при 400°C данная погрешность составляет 4,69%, что приводит к такой же ошибке в определении величины контролируемого давления.

Предлагаемый термостабильный датчик давления (ТДД) [3] позволяет повысить достоверность определения давления посредством измерения и учета температуры, влияющей на дополнительный прогиб мембраны. В работе [4] приведены конструкция и структурная схема ТДД.

ТДД содержит гибкий ЧЭ в виде мембраны, жестко закрепленный по контуру внутри обоймы корпуса датчика. В обойме помещены приемопередающий волоконный жгут, состоящий из излучающих и приемных волоконных световодов, подключенных, соответственно, к источнику излучения и фотоприемнику, вихретоковый преобразователь (ВТП), установленный в каркасе соосно с приемопередающим жгутом. ВТП содержит первичную и вторичную обмотки, подключенные, соответственно, к генератору синусоидального тока и преобразователю параметров ВТП. Выход фотоприемника через первый усилитель соединен со входом первого АЦП, а выход преобразователя параметров ВТП через второй усилитель и амплитудный детектор подключен ко входу второго АЦП. Шины данных и управления первого и второго АЦП соединены с соответствующими входами вычислительного устройства.

Принцип работы данного устройства заключается в том, что внутренняя поверхность мембраны освещается светом от источника излучения через излучающие волоконные световоды. Сила давления  $p$  рабочей среды ГТД воздействует на ЧЭ, вызывая его деформацию, в результате чего изменяется интенсивность света в приемном световоде. Прогиб ЧЭ  $z$  некоторым образом зависит от напряжения  $U_{\phi\Pi}$  на выходе фотоприемника:

$$z = f(U_{\phi\Pi}). \quad (2)$$

В узком диапазоне изменения  $z$  зависимость (2) может быть аппроксимирована выражением

$$z = q_0 + q_1 U_{\phi\Pi}, \quad (3)$$

где  $q_0, q_1$  — коэффициенты преобразования. Значение  $U_{\phi\Pi}$ , зависящее от величины избыточного давления, определяется АЦП и регистрируется вычислительным устройством. В результате воздействия на ЧЭ повышенных температур возникает дополнительный

прогиб мембраны  $\Delta z_b$ , который приводит к погрешности измерения давления. Действительно, наибольший (в центре ЧЭ) прогиб можно описать как [5]

$$z = \frac{pR^4}{64D}, \quad (4)$$

где  $D$  — жесткость ЧЭ при изгибе;  
 $p$  — значение равномерно распределенного по поверхности ЧЭ давления, Па;  
 $R$  — радиус ЧЭ, м.

Жесткость пластины при изгибе определяется следующим образом:

$$D = \frac{Eh^2}{12(1-\mu^2)}. \quad (5)$$

Здесь  $h$  — толщина ЧЭ, м;  
 $E$  — модуль Юнга (упругости) материала ЧЭ, Н/м<sup>2</sup>;

$\mu$  — коэффициент Пуассона.

Подставив (5) в (4), для максимального прогиба ЧЭ окончательно получим

$$z = \frac{3pR^4(1-\mu^2)}{16h^2E}. \quad (6)$$

Отсюда величина  $p$

$$p = \frac{16h^2Ez}{3R^4(1-\mu^2)}. \quad (7)$$

Формула (6) описывает максимальный прогиб в центре мембраны в зависимости от величины приложенного давления при нормальной температуре. Однако при повышенной температуре наблюдается дополнительный прогиб мембраны, обусловленный зависимостью модуля упругости материала мембраны от температуры, которая описывается следующим выражением [2]:

$$E = E_0(1 + B_E \Delta t), \quad (8)$$

где  $E, E_0$  — модуль упругости материала при температуре  $t$  и при нормальной температуре  $t_0$ , Н/м<sup>2</sup>.

Подставив выражение (8) в формулу (7), получим значение искомого давления  $p$  с учетом температурной зависимости  $E(t)$ :

$$p = \frac{16h^2E_0(1+B_E \Delta t)z}{3R^4(1-\mu^2)}. \quad (9)$$

Учитывая, что  $h, R, E_0, \mu$  — это константы конкретного датчика, выражение (9) можно записать в виде

$$p = K(1 + B_E \Delta t)z, \quad (10)$$

$$\text{где } K = \frac{16 h^2 E_0}{3 R^4 (1 - \mu^2)}.$$

В вычислительном устройстве значение  $z$  определяется по зависимостям (2) или (3) и подставляется в (10). Зная температуру ЧЭ, можно внести поправку в формулу (10) и скорректировать дополнительный прогиб мембраны, вызванный повышенной температурой. Для бесконтактного определения температуры ЧЭ в данном устройстве предлагается использовать ВТП 8, так как контактные датчики будут ухудшать свойства мембраны. ЧЭ в данном случае должен выполняться из немагнитного металла, в котором будет возникать вихретоковый эффект.

На выходе преобразователя параметров ВТП корректирующий канал формирует сигнал, зависящий от обобщенного параметра  $\beta$ , который может быть описан следующим образом [6]:

$$\beta = R_{\text{вн}} \sqrt{\omega \sigma \mu_0}, \quad (11)$$

где  $R_{\text{вн}}$  — радиус наружной обмотки ВТП,  $\omega$  — круговая частота тока возбуждения,  $\sigma$  — удельная электрическая проводимость контролируемого материала, вблизи которого находится ВТП, в данном случае мембраны,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Параметр  $\beta$ , как видно из (11), зависит от величины  $\sigma$  удельной электрической проводимости контролируемого материала, которая, в свою очередь, определяется линейным температурным коэффициентом сопротивления, проводимостью  $\sigma_0$  металла при  $0^\circ\text{C}$  и температурой. Таким образом, измерив величину проводимости  $\sigma_t$  при температуре  $t$ , можно вычислить температуру нагретого ЧЭ, что и реализуется в предлагаемом датчике.

Амплитудный детектор выделяет амплитуду синусоидального сигнала, величина которого предварительно усиливается вторым усилителем до уровня входного сигнала АЦП. В АЦП сигнал ВТП оцифровывается и вводится в вычислительное устройство, в котором обрабатывается. Сигнал с выхода фотоприемника после усиления в первом усилителе поступает на вход первого АЦП и после оцифровки вводится в вычислительное устройство. В вычислительном устройстве

рассчитывается значение измеряемого давления  $p$  по величине прогиба мембраны, измеряемого волоконно-оптическим датчиком с учетом дополнительного прогиба, вызванного нагревом ЧЭ.

Таким образом, предлагаемый ТДД в отличие от используемых в настоящее время для контроля рабочих процессов ГТД датчиков давления Метран-100 и Сапфир-22 обладает повышенной точностью измерений за счет исключения погрешностей, возникающих при возрастании температуры среды, давление которой измеряется, а также позволяет определять не только давление, но и температуры контактирующих с мембраной датчика рабочих сред. Кроме того, будучи выполненным в специальном термостойком исполнении, ТДД дает возможность расширить рабочий диапазон температур до  $400^\circ\text{C}$  при дополнительной погрешности измерений, не превышающей 0,5%, что превосходит характеристики серийно выпускаемых в настоящее время датчиков.

### Библиографический список

1. Пат. РФ № 70574, МПК G 01 F 1/66. Волоконно-оптическое устройство для измерения расхода среды и давления [Текст] / Н.И. Лиманова, Г.В. Смирнов, П.Е. Юдин [и др.] – Оpubл. 27.01.2008. Бюл. № 3.
2. Иванова, Н.И. Расчеты упругих чувствительных элементов датчиковой аппаратуры [Текст] / Н.И. Иванова – М.: МЛТИ, 1972. – 139 с.
3. Пат. РФ № 2287791. МПК G 01L 9/00. Термокомпенсированный датчик давления [Текст] / Н.И. Лиманова, П.А. Шишкин, В.А. Лышов – Оpubл. 20.11.2006. Бюл. № 32.
4. Лиманова, Н.И. Термостабильный датчик давления для контроля рабочих процессов ГТД [Текст] / Н.И. Лиманова // Вестн. СГАУ. – Самара: СГАУ, 2006. – Вып. 2(10). – Ч. 2. – С. 55 – 58.
5. Агейкин, Д.И. Датчики контроля и регулирования: справочные материалы [Текст] / Д.И. Агейкин, Е.Н. Костина, Н.Н. Кузнецова. – М.: Машиностроение, 1965. – С. 575.
6. Соболев, В.С. Накладные и экранные датчики [Текст] / В.С. Соболев, Ю.М. Шкарлет. – Новосибирск: Наука, 1967. – 144 с.

## **PRESSURE MEASUREMENTS IN THE PIPELINES WITH THE HELP OF COMBINED HIGH TEMPERATURE PRESSURE SENSOR**

©2011 N. I. Limanova, P. E. Yudin, I. A. Limanov

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

The pipelines of engines are exposed to different variable forces influence. During the engine tests the working processes control is conducted. Among others such control requires different pressure measurements. The most of the processes are accompanied by the working environment temperatures rise, which may be highly essential. Contemporary means of pressure measurements, which are used in automatic systems for the engine tests control are intended for work in temperature range up to 80°C. Unlike known the suggested high temperature pressure sensor ensures precision of measurements at the expense of compensation of errors, which appear during pressures definition at high environment temperature. The sensor permits to widen of temperature range up to 400°C. For that the additional measurements error doesn't exceed 0,5%.

*The pipelines of engines, pressure measurements, pressure sensors.*

### **Информация об авторах**

**Лиманова Наталия Игоревна**, доктор технических наук, профессор, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [Nataliya.I.Limanova@gmail.com](mailto:Nataliya.I.Limanova@gmail.com). Область научных интересов: автоматизированные системы управления, датчики для систем измерения, контроля и управления, математическое и компьютерное моделирование гетерогенных систем.

**Юдин Павел Евгеньевич**, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [Yudin@npcsamara.ru](mailto:Yudin@npcsamara.ru). Область научных интересов: надежность двигателей летательных аппаратов, автоматизированные системы управления.

**Лиманов Игорь Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [267-45-55@mail.ru](mailto:267-45-55@mail.ru). Область научных интересов: надежность двигателей летательных аппаратов, электротехника.

**Limanova Nataliya Igorevna**, doctor of technical sciences, professor, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [Nataliya.I.Limanova@gmail.com](mailto:Nataliya.I.Limanova@gmail.com). Area of research: systems of automatic control, sensors for automatic systems, mathematical and computer modeling of the processes in heterogeneous systems.

**Yudin Pavel Evgenevich**, postgraduate student, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [Yudin@npcsamara.ru](mailto:Yudin@npcsamara.ru). Area of research: reliability of the aircraft engines, systems of automatic control.

**Limanov Igor Alekseevich**, candidate of technical sciences, associate professor, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [267-45-55@mail.ru](mailto:267-45-55@mail.ru). Area of research: reliability of the aircraft engines, electrical engineering.