

Метод измерения пульсаций давления тонкопленочным емкостным датчиком

А. А. КАЗАРЯН

Центральный аэрогидродинамический институт, Жуковский, Россия, e-mail: wtdiv@tsagi.ru

Описана методика определения влияния пульсаций температуры, влажности и помех на данные измерений пульсаций давления. Приведены результаты теоретического и экспериментального исследований.

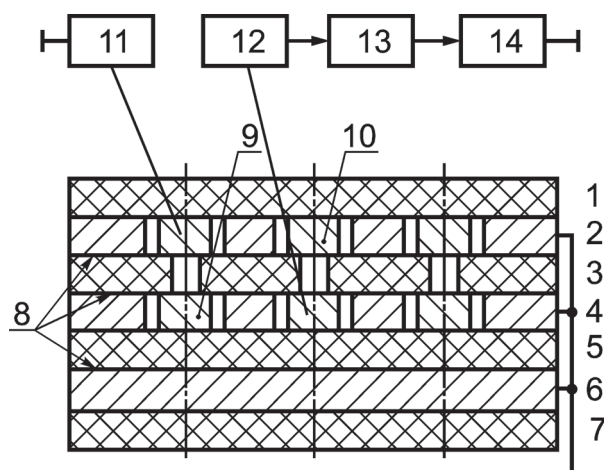
Ключевые слова: емкостный датчик давления, нестационарный поток.

The procedure of determination of influence of temperature pulses, humidity, and noises on pressure pulses measurements data is described. The results of theoretical and experimental studies are presented.

Key words: pressure capacitive sensor, nonstationary stream.

Существующие методы изучения полей давления на моделях при помощи многоточечных модулей и бароиндикаторных покрытий не позволяют решать некоторые задачи, связанные, в частности, с распределением давления на тонких профилях, которые невозможно дренировать, при изменении влажности и температуры [1—3].

Исследования пленочных емкостных датчиков (ПЕД) для реализации метода бездренажного измерения динамического давления подтвердили их приемлемые точностные характеристики и возможность применения в аэродинамических и прочностных экспериментах [4—6]. Датчики наклеивают на конструкцию с большой кривизной поверхности, в труднодоступных местах на тонких профилях. Для одновременных измерений давления в ряде точек датчик снабжают несколькими чувствительными элементами (ЧЭ), размещенными на одной подложке. Их размеры и расположение выбирают исходя из конфигурации изделия и требований эксперимента.



Конструкция датчика со структурной схемой измерения давления:

1, 3, 5, 7 — диэлектрические пленки; 2, 4, 6 — экраны; 8 — пленки клея; 9, 10 — обкладки; 11 — источник поляризации; 12 — усилитель заряда; 13 — нормирующий усилитель; 14 — индикатор

Разработка бездренажного метода изучения полей распределения пульсаций давления с использованием ПЕД обусловлена необходимостью аэродинамических и прочностных исследований без нарушения целостности изделия; одновременным и раздельным измерениями локальных и интегральных значений давления; совместными измерениями распределения давления с весовыми, тепловыми и другими видами измерений. Цель работы — разработка метода измерений пульсаций давления при изменении влажности и температуры. Использованы результаты лабораторных и стендовых (промышленных) исследований.

На рисунке изображена конструкция ПЕД с газообразным диэлектриком и структурная схема измерений пульсаций давления. Датчик содержит диэлектрическую пленку 5, на ее нижней поверхности расположен основной экран 6, а на верхней поверхности — обкладки 9, 10 и боковой экран 4. Диэлектрическая пленка 3 с ячейками размещена между верхней (мембрана) 10 и нижней 9 обкладками датчика. Верхняя обкладка 10 и боковой экран 2 сформированы на нижней поверхности диэлектрической пленки 1. Основной экран 6 изолирован от профиля (объекта) диэлектрической пленкой 7. Слои пленок 1, 3, 5, 7 и основной экран 6 между собой скрепляют пленками клея 8. Для защиты датчика от влияния внешних электромагнитных помех и трибоэлектрического эффекта экраны 2, 4, 6 соединены между собой.

Устройство функционирует следующим образом. При поляризованном состоянии датчика и воздействии пульсаций давления $\tilde{p}$ на верхнюю поверхность диэлектрической пленки 1 изменяется расстояние между обкладками 9, 10 и на выходе датчика возникает электрический сигнал, пропорциональный заданному давлению. Этот сигнал подают на вход согласующего усилителя заряда 12. С его выхода сигнал усиливают, нормируют в усилителе 13 и подают на вход индикатора 14 для хранения и дальнейшей обработки. В качестве индикатора можно использовать любой современный компьютер с соответствующим программным обеспечением. Устройство может быть одно- и многоканальным.

Принцип работы датчика. При изменении давления на Δp меняется расстояние между обкладками 9, 10. В резуль-

тате прогиба обкладки изменяется емкость датчика C , абсолютное ΔC и относительное $\Delta C/C_0$ приращения емкости, где C_0 — начальная емкость датчика. Относительное изменение напряжения на выходе датчика пропорционально $\Delta C/C_0$ и напряжению поляризации с выхода блока 11. В таблице приведены основные характеристики разработанных и изготовленных ПЕД пульсаций давления.

В таблице использованы следующие обозначения: ДЕ — датчик емкостный; Т, Г — датчик с твердым или газообразным диэлектриком; Ф — мембрана из фольги никеля или ферроникеля; 3, 4, 5 — количество слоев диэлектрической пленки в конструкции датчика. В таблице в указанном диапазоне частот после компенсации неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) составляет 0,3—1,5 дБ. При заданных дискретных значениях частоты, например 25 и 30 Гц, амплитудные характеристики ПЕД совпадают. Метрологические характеристики ПЕД с твердым и газообразным диэлектриками подробно рассмотрены в [5].

Измерения пульсаций давления реализуются следующим образом. На ПЕД с газообразным или твердым диэлектриком, используемым в аэродинамическом эксперименте, одновременно кроме пульсаций давления $\tilde{p}$ действуют пульсации влажности, температуры, так как датчики эксплуатируют в разных условиях. В слоистых пленочных датчиках пульсаций давления с клеевым связующим действие влаги заметнее, чем в монолитных. Проникновение влаги в поры пленки вызывает изменение диэлектрической проницаемости, тангенса угла потерь, емкости, сопротивления утечки, удельного сопротивления, сопротивления на выходе датчика и, как следствие, уменьшение чувствительности. Насыщение влагой датчика из негигроскопичного диэлектрика происходит очень медленно — около трех суток. Влага в ПЕД также влияет на теплопроводность диэлектрика [4—6].

Действие пульсаций давления на поверхность влагонепроницающего ПЕД слоистой конструкции с твердым диэлектриком, вызывающее относительное изменение массы воды в единице объема ПЕД, определяют как $\gamma \Delta M / M = \tilde{p} / p_0$, откуда $\Delta M = M \tilde{p} / (\gamma p_0)$, где M — масса воды в единичном объеме; ΔM — изменение массы воды; γ — показатель адиабаты газа при постоянных давлении и объеме; p_0 — начальное давление газа. Увеличение массы воды приводит к изменению линейных размеров датчика, находящегося в контакте с обтекаемым газом, и соответственно к росту общей массы воды

$$M + \Delta M = M(1 + \tilde{p} / (\gamma p_0)).$$

Известно, что при влажности в состоянии насыщения увеличение пульсаций давления $\tilde{p}$ обуславливает рост электрической емкости ПЕД. Чувствительность емкости датчика к

Основные технические и метрологические характеристики датчиков

Параметр	Единица измерения	Тип датчика					
		ДЕТ-3	ДЕГ-4		ДЕГ-5		ДЕГФ-5
Размер	мм	6×9	4×6	6×9	Ø5	Ø4	Ø5
Толщина	мкм	70—80	110	130	120	130	150—160
Пределы измерений давления							
Верхний	Па	$3 \cdot 10^8$	10^7	$3 \cdot 10^7$	200,0	900,0	$4 \cdot 10^3$
Нижний	Па	30—40	10—20	50—70	0,1	0,2	20
Напряжение поляризации	В	10—200					
Рабочая частота	Гц	$20—2 \cdot 10^4$					
Погрешность	%	5,7—8,6					
Диапазон температур	°С	–50 ... +50 (может быть расширен до –269 ... +300)					

резкому изменению влагосодержания газа вызывает изменение пульсации давления с тем же знаком.

Для определения влияния пульсаций температуры $\Delta \theta$ на результаты измерений пульсаций давления $\tilde{p}$ воспользуемся уравнением для идеального газа в адиабатических условиях:

$$\Delta \theta = \theta_0 K \tilde{p} (\gamma - 1) / (\gamma p_0),$$

где θ_0 — начальная температура газа; K — коэффициент теплообмена между газом и датчиком, зависящий от толщины диэлектрических пленок 1, 3, 5, 7 (см. рисунок), их удельной теплоемкости, теплопроводности газа и пленки, частоты изменения давления.

Емкость датчика чувствительна к пульсациям давления и температуры [5]:

$$\Delta C / C_0 = \Delta C_{\tilde{p}} / C_0 + \Delta C_{\Delta \theta} / C_0.$$

Полное относительное изменение емкости с учетом уравнения идеального газа в адиабатических условиях выражается как $\Delta C / C_0 = \Delta \theta \tilde{p} / \lambda$, где λ — модуль объемного расширения диэлектрика датчика. Пульсации температуры и давления в зависимости от частоты изменяются с одинаковыми знаками. При малых частотах доминируют пульсации температуры. На более высоких частотах сохраняется только реакция деформации диэлектрической пленки 1 от пульсаций давления.

Для выделения полезного сигнала пульсаций давления, которые смешаны с пульсациями влажности, температуры, шумами и помехами, воспользуемся общими правилами суммирования напряжения или токов шумов различных типов, возникающих связано и не связано друг с другом. При наложении эффектов от независимых и зависимых источников шумов их общая мощность равна сумме мощностей отдель-

ных источников. Искомые результаты получим после серии экспериментов [6].

Первый эксперимент. В статическом состоянии исследуемого объекта при нормальной влажности (сухом воздухе) и температуре 20—30 °С измеряют суммарные шумы и помехи U_{Σ} на выходе нормирующего усилителя 13 и регистрируют в индикаторе 14. В этих условиях градуируют ПЕД, т. е. при постоянных пульсациях давления $\tilde{p} = \text{const}$ на испытуемых ЧЭ сигнал градуировки с выхода усилителя 12 подают на усилитель 13 и запоминают в индикаторе. Из общего сигнала, смешанного с сигналами шумов и помех, выделяют полезный сигнал градуировки и находят коэффициент

преобразования канала: $U_{\text{пол}} = \sqrt{U_{\text{общ}}^2 - U_{\Sigma}^2}$, $S = U_{\text{пол}} / \tilde{p}$.

Второй эксперимент. Задают разные уровни относительной влажности газа (например, 0, 25, 50, 75, 100 %), при этом пульсации давления отсутствуют ($\tilde{p} = 0$). При разных уровнях относительной влажности сигнал с выхода нормирующего усилителя, смешанный с U_{Σ} и $U_{\Delta M}$ — сигналом пульсации массы воды ΔM , регистрируют и запоминают в индикаторе. Затем из общего сигнала $U_{\text{общ. } \Delta M}$ выделяют $U_{\Delta M} = \sqrt{U_{\text{общ. } \Delta M}^2 - U_{\Sigma}^2}$. Такой эксперимент повторяют неоднократно при разной степени влажности от 0 до 100 %. Строят зависимость $U_{\Delta M} = f(\Delta M)$.

Третий эксперимент. В условиях второго эксперимента задают постоянные пульсации давления $\tilde{p} = \text{const}$ и на выходе усилителя 13 имеют общий сигнал $U_{\text{общ. пол. } \Delta M}$, смешанный с U_{Σ} , $U_{\text{пол. } \Delta M}$, $U_{\Delta M}$. Выделяют полезный сигнал пульсаций влажности (массы воды), совпадающий по фазе и амплитуде с сигналом $U_{\text{пол}}$ пульсаций давления: $U_{\text{пол. } \Delta M} = \sqrt{U_{\text{общ. пол. } \Delta M}^2 - U_{\Sigma}^2}$. С учетом того, что сигналы $U_{\Delta M}$ и $U_{\text{пол}}$ между собой жестко не связаны, т. е. не коррелированы, и коэффициент корреляции $\beta = -1$, получаем

$$U_{\text{пол}} = \sqrt{U_{\text{пол. } \Delta M}^2 - U_{\Delta M}^2 + 2\beta U_{\text{пол. } \Delta M} U_{\Delta M}}.$$

Четвертый эксперимент. На ПЕД воздействуют пульсациями температуры $\Delta\theta$ и на выходе усилителя 13 измеряют сигнал $U_{\text{общ. } \Delta\theta}$, смешанный с сигналами шумов и помех, его регистрируют и запоминают в индикаторе. Из $U_{\text{общ. } \Delta\theta}$

выделяют сигнал $U_{\Delta\theta} = \sqrt{U_{\text{общ. } \Delta\theta}^2 - U_{\Sigma}^2}$. Как и в предыдущем эксперименте, задают несколько значений пульсаций температуры $\Delta\theta_1, \dots, \Delta\theta_n$, строят зависимость $U_{\Delta\theta}(\Delta\theta)$. Затем на ЧЭ датчика воздействуют постоянными пульсациями давления $\tilde{p} = \text{const}$ и на выходе усилителя 13 измеряют и регистрируют сигнал $U_{\text{общ. пол. } \Delta\theta}$, из которого сначала выделяют

$U_{\text{пол. } \Delta\theta} = \sqrt{U_{\text{общ. пол. } \Delta\theta}^2 - U_{\Sigma}^2}$. При этом эксперименте принимают во внимание, что пульсации давления $\tilde{p}$ и температуры жестко связаны между собой, т. е. коррелированы, и коэффициент корреляции $\beta = 1$. Полезный сигнал выражают в виде

$$U_{\text{пол}} = \sqrt{U_{\text{пол. } \Delta\theta}^2 - U_{\Delta\theta}^2 - 2\beta U_{\text{пол. } \Delta\theta} U_{\Delta\theta}}.$$

Пятый эксперимент. На ПЕД одновременно воздействуют пульсациями давления $\tilde{p}$, влажности ΔM и температуры $\Delta\theta$, на выходе усилителя 13 регистрируют общий сигнал $U_{\text{общ. пол. } \Delta M \Delta\theta}$, смешанный с сигналами U_{Σ} , $U_{\text{пол. } \Delta M}$, $U_{\Delta M}$, $U_{\Delta\theta}$, и ставится задача получить из общего сигнала полезный сигнал $U_{\text{пол. } \Delta M \Delta\theta}$. Последовательно выделяют сигналы

$$U_{\text{пол. } \Delta M \Delta\theta} = \sqrt{U_{\text{общ. пол. } \Delta M \Delta\theta}^2 - U_{\Sigma}^2};$$

$$U_{\text{пол. } \Delta\theta} = \sqrt{U_{\text{пол. } \Delta M \Delta\theta}^2 - U_{\Delta M}^2 + 2\beta U_{\text{пол. } \Delta M \Delta\theta} U_{\Delta M}};$$

$$U_{\text{пол}} = \sqrt{U_{\text{пол. } \Delta\theta}^2 - U_{\Delta\theta}^2 - 2\beta U_{\text{пол. } \Delta\theta} U_{\Delta\theta}}.$$

Пульсации давления определяют по формуле $\tilde{p} = U_{\text{пол}}/S$.

Были испытаны датчики при температуре окружающего воздуха от -12 до +24 °С, влажности 79—95 %, атмосферном давлении 747—753 мм рт. ст. Во влажном состоянии датчики выдерживали трое суток, после чего экспериментально снимали амплитудную характеристику зависимости выходного напряжения от пульсаций давления на частоте 30 Гц. Использовали электромагнитный возбудитель пульсаций давления синусоидальной формы 140 дБ. При заданном давлении сначала происходит резкое снижение выходного напряжения (переходный процесс занимает несколько минут), что объясняется испарением влаги с поверхности, как следствие, увеличиваются сопротивление утечки и электрическая емкость утечки. Предполагается, что во влажном состоянии ПЕД создаются условия проникновения синфазных помех в измерительную цепь, выходное напряжение возрастает не менее чем в 3—4 раза по сравнению с нормальными условиями. Относительное активное сопротивление ПЕД при влажности от 0 до 100 % уменьшается в 1,4 раза почти линейно, а емкость возрастает линейно в 1,3 раза [4]. В лабораторных условиях при влажности 70 % и температуре 25 °С сопротивление изоляции составляло 10^{12} Ом. Результаты исследований показали, что при влажности 98 % и температуре от -10 до +12 °С (под открытым небом) сопротивление изоляции между выводами падало с 10^{10} до 10^6 Ом относительно земли. При испытании газотурбинных двигателей входное сопротивление усилителей заряда снижалось от 10^9 до 10^6 Ом. В указанных условиях были градуированы датчики, измерен средний уровень пульсаций давления 140—160 дБ с погрешностью 10—15 % без приведения к верхнему диапазону измерения давления ПЕД.

В процессе измерений пульсаций давления в аэродинамической трубе при практически постоянной температуре газа не было обнаружено их зависимости от пульсаций температуры газа. Несвязанные шумы и помехи, которые не коррелированы между собой, суммируются на основе сложения мощностей: $U_{\Sigma} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}$. В качестве эталонного датчика был выбран микрофон мод. 4136 фирмы «Брюль и Кьер» (Дания).

Такой способ измерений пульсаций давления в газовой среде с помощью ПЕД, чувствительного к пульсациям давления, влажности и температуры, их выделение из полезного сигнала повышает точность измерений, экономически

эффективно и выгодно отличается от существующих дренажных методов измерений пульсации давления. Влияние температуры на датчик рассмотрено в [5]. Изменение относительной емкости и сопротивления датчика в зависимости от времени погружения во влажную среду для различных видов защиты при температуре 20 °С приводится в [4].

В заключение отметим, что на результаты измерений пульсаций давления сильнее влияет изменение пульсаций влагосодержания газа, чем температуры. Проникновение влаги в датчик заметно меняет его характеристики. Следовательно, необходимо создать достаточно эффективную защиту от этого явления. При изменении температуры в датчике происходит самокомпенсация, которая проявляется в уменьшении модуля упругости пленки из полиимиды и увеличении электрической емкости датчика; их суммарное воздействие частично стабилизирует режим работы датчика.

Универсальность, гибкость и небольшая стоимость этих датчиков открывают новые возможности для изучения объектов в условиях с повышенными радиацией, температурой, влажностью, где датчики обычной конструкции не применимы.

Л и т е р а т у р а

1. **Блокин-Мечталин Ю. К.** Многофункциональный измерительно-вычислительный и управляющий комплекс для экспериментальной электродинамики // Датчики и системы. 2010. № 5. С. 10—17.
2. **Беклемищев А. И. и др.** Стенд СГД4 для метрологических исследований многоканальных модулей давления // Там же. С. 43—46.
3. **Мошаров В. Е., Радченко В. Н.** Новый метод визуализации течений на поверхности аэродинамических моделей // Там же. С. 48—53.
4. **Порта М. и др.** Пленочные датчики давления и их применение / Пер. с фр. М.: Всесоюз. центр переводов, 1983. № Е-32663.
5. **Казарян А. А.** Пленочные датчики давления. М.: Бумажная галерея, 2006.
6. **Пат. 2419076 РФ.** Способ измерения пульсаций давления / А. А. Казарян // Изобретения. Полезные модели. 2011. № 14.

Дата принятия 08.04.2013 г.

681.12:81.318.3(018)

Электромагнитный метод измерения расхода и уровня жидкости в безнапорных трубопроводах

И. Д. ВЕЛЬТ, Ю. В. МИХАЙЛОВА

НИИТеплоприбор, Москва, Россия, e-mail: agydel@gmail.com

Приведены результаты теоретического исследования магнетогидродинамического взаимодействия потоков слабо проводящей жидкости в открытых руслах и безнапорных трубопроводах. Вычислены объемные весовые функции для электромагнитного расходомера в зависимости от места расположения электродов и уровня. Показана возможность одновременных измерений расхода и уровня в незаполненных трубопроводах при помощи специальной обработки сигналов с нескольких пар электродов.

Ключевые слова: магнетогидродинамическое взаимодействие, электромагнитные расходомер и уровень, индуктор.

The theoretical study results of magnetohydrodynamic interaction of poorly conducting liquid flows in the open canal beds and free-flow pipelines are presented. The volume weight functions for electromagnetic flowmeter depending on the location of electrodes and liquid level are calculated. The possibility of simultaneous measurements of flow rate and level in unfilled pipelines by means of special processing of signals from several pairs of electrodes is shown.

Key words: magnetohydrodynamic interaction, electromagnetic flowmeter and level meter, inductor.

Безнапорные трубопроводы и открытые каналы (лотки) широко используют в различных отраслях народного хозяйства для слива и транспортирования самых разнообразных жидкостей и смесей. Их применяют при гидротранспортировании угля, руды, отделенной породы, золы на теплостанциях, песка при строительстве гидросооружений, сточных жидкостей на предприятиях пищевой, химической и целлюлозно-бумажной промышленности, для перекачки сбросных и сточных вод предприятий и коммунальных систем. Безнапорные трубопроводы, открытые каналы — неотъемлемые

элементы систем водоотведения, во многом определяющих экологическую безопасность территорий, на которых они расположены.

Эффективное функционирование систем водоотведения невозможно без контроля расхода и объема сточных вод, сбрасываемых в водоемы и канализацию, подаваемых на очистные сооружения и распределяемых по отдельным блокам сооружений очистки. Увеличение стоимости очистки воды, усиление мер по охране окружающей среды, повышение эффективности функционирования систем водоотведе-