

УДК 621.454.2.046.4

М. А. Бондарь, А. С. Гусева, Л. А. Ерес, И. М. Курако, Ю. Н. Петренко, Н. Ю. Розмаита

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ НЕСПЛОШНОСТИ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ И ЕЕ АТТЕСТАЦИЯ

*Рассмотрен ранее не использовавшийся метод измерения несплошности рабочей жидкости с помощью видеорегистраторов. Для обеспечения единства измерений при внедрении этого метода в практику предложена методика его аттестационных экспериментальных исследований с целью определения границ его применимости.*

*Розглянуто метод виміру несуцільності робочої рідини, який раніше не використовували, за допомогою відеореєстраторів. Для забезпечення єдності вимірів під час впровадження цього методу в практику запропоновано методику його атестаційних експериментальних досліджень з метою визначення меж його застосування.*

*The method not used before to measure discontinuity of working fluid using video recorders is considered. To ensure the uniformity of measurements when reducing this method to practice, the methodology of its certification experimental investigations is proposed for the purpose of determination of its applicability limits.*

### Введение

Пневмогидравлическая система подачи топлива в жидкостный реактивный двигатель (ЖРД) является важным элементом ракет-носителей и космических аппаратов. Она обеспечивает хранение компонентов топлива и подачу их на вход в двигатель с заданными значениями расхода и давления.

Входящая в состав пневмогидравлической системы подачи топлива топливная система включает в себя заборные устройства, обеспечивающие организованную подачу топлива из баков в расходную магистраль с минимальными гидравлическими остатками.

Если позволить ЖРД работать до полного израсходования топлива из баков, то в конце работы в него через заборные устройства и расходные магистрали вместе с остатками топлива начнут поступать в виде газовых пузырей газы наддува, что приведет к неустойчивой работе ЖРД в конце активного участка полета. Поэтому ЖРД должен быть остановлен до того, как в него начнут поступать вместе с топливом газовые пузыри. Минимальные гидравлические остатки – это количество топлива, оставшееся в расходной магистрали на момент останова ЖРД.

Необходимость минимизации гидравлических остатков обуславливает целесообразность экспериментальной отработки заборных устройств различной конфигурации. При экспериментальной отработке за-

борного устройства исследуется процесс появления газовых пузырей и оценивается их количество в единицах объема.

В качестве параметров, характеризующих количество газовых включений в потоке жидкости, используют термины «сплошность» и «несплошность».

Сплошность рабочей жидкости представляет собой относительную величину, выраженную в процентах в диапазоне от 0 до 100 %, характеризующую отношение суммарного объема жидкости в наблюдаемом объеме к величине этого объема, и обозначается буквой  $\phi$ .

Несплошность рабочей жидкости является относительной величиной, выраженной в процентах в диапазоне от 0 до 100 %, характеризующей отношение суммарного объема газовых включений в наблюдаемом объеме к величине этого объема и обозначается выражением  $(1-\phi)$ .

Количественная оценка объема газовых включений может определяться по показаниям датчика сплошности, который устанавливается на входе в расходную магистраль после заборного устройства. На ГП «КБ «Южное» разработана и аттестована методика выполнения измерений несплошности для жидкостей с достаточно высокой проводимостью с использованием способа комплексной проводимости. Эта методика используется для расходных магистралей с диаметром около 240 мм.

Ранее предпринимались попытки реализовать фотометрический способ контроля значения несплошности, основанный на том, что прозрачный участок трубопровода с одной стороны просвечивают осветительной лампой. Свет, прошедший через поток, попадает на фотодиоды и формирует выходной сигнал, пропорциональный объему газовых включений. По результатам аттестационных работ был сделан вывод о том, что данный способ контроля может использоваться только для проведения измерений несплошности без нормированной точности из-за отсутствия на тот момент аппаратуры с необходимыми точностными характеристиками.

Необходимость проведения измерений несплошности с нормированной точностью обуславливает целесообразность проведения поисков других способов таких измерений.

Одним из таких способов, к реализации которого приступило ГП «КБ «Южное», является способ определения газосодержания в потоке прозрачной жидкости по результатам видеорегистрации визуально наблюдаемых в потоке воды воздушных пузырьков. С этой целью специально изготавливают и устанавливают в расходную магистраль прозрачный участок для визуального наблюдения.

Суть предлагаемого метода измерений состоит в следующем.

В расходную магистраль исследуемой опытной конструкции устанавливают изготовленный из органического стекла прозрачный участок. С двух сторон прозрачного участка расходной магистрали согласно схеме на рис. 1 устанавливают два высокоскоростных видеорегистратора для проведения скоростной видеосъемки картины прохождения воздушных пузырьков с потоком воды.

Видеокадры движущихся с потоком воды воздушных пузырьков формируются и сохраняются видеорегистраторами в виде массива электронных видеофайлов, имеющих вид, изображенный на рис. 2.

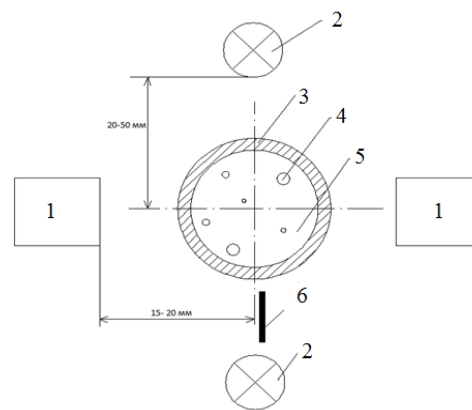


Рис. 1. Схема размещения высокоскоростных видеорегистраторов, металлической линейки и осветительных приборов:

- 1 – высокоскоростные видеорегистраторы;
- 2 – осветительные приборы;
- 3 – прозрачный трубопровод;
- 4 – пузырьки воздуха;
- 5 – вода;
- 6 – измерительная металлическая линейка

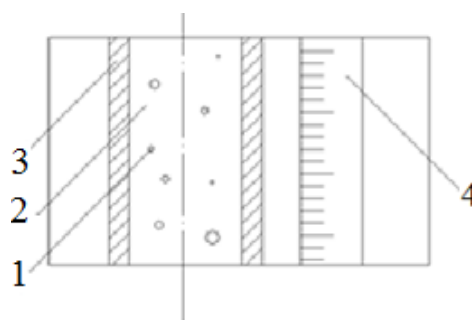


Рис. 2. Схематическое изображение единичного видеокадра:

- 1 – пузырьки воздуха;
- 2 – вода;
- 3 – прозрачный трубопровод;
- 4 – измерительная металлическая линейка

Зарегистрированные видеофайлы загружаются на ПК в вызванную программу Vegas PRO. На выбранных видеокадрах с помощью маркера обводят внешние контуры воздушных пузырьков и с помощью программы Adobe Photoshop автоматически подсчитывают количество пикселей  $N$ , занимаемых обведенным контуром воздушного пузырька на рассматриваемом видеокадре. При этом рассматриваются синхронные пары видеокадров, снятые обоими видеорегистраторами, и в качестве оценки  $N$  принимается выражение

$$N = \frac{N_1 + N_2}{2},$$

где  $N_1$  – количество пикселей на видеокадре первого видеорегистратора;  $N_2$  – количество пикселей на видеокадре второго видеорегистратора.

Для перевода значения  $N$  в пикселях в значение  $V_{изм}$  в кубических сантиметрах используется градуировочная характеристика вида  $V_{изм} = f(N)$ , которая определяется следующим образом.

В заполненную водой расходную магистраль с помощью эталона – устройства ввода известного значения объема воздуха вводятся объемы воздуха  $V_{эт}$ , составляющие 0,01, 0,02, 0,03, 0,04, 0,05 объема попадающего в видеокадр участка расходной магистрали, после этого определяются значения  $N$ , соответствующие введенным объемам воздуха  $V_{эт}$ . Таким образом формируется эталонное значение несплошности от 1 до 5 %.

Полученные пары значений ( $V_{эт}$ ,  $N$ ) заносят в таблицу редактора электронных таблиц Microsoft Excel, и с помощью опции «Мастер диаграмм» строится график  $V_{изм} = f(N)$  и определяется вид полученной функциональной зависимости  $V_{изм} = f(N)$ .

Численные значения несплошности потока воды  $(1-\varphi)$  определяются по формуле

$$(1-\varphi) = V_{изм}/V_{р.м},$$

где  $V_{р.м}$  – объем расходной магистрали, определяемый по формуле

$$V_{р.м} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot (l_2 - l_1),$$

где  $d$  – внутренний диаметр расходной магистрали, мм;  $l_2$ ,  $l_1$  – крайние деления попавшего в видеокадр отрезка мерной линейки.

Для принятия решения о возможности применения предлагаемого метода измерений необходимо проведение аттестационных работ с целью оценки реализуемой погрешности измерений.

Модель погрешности измерений несплошности потока воды можно представить в следующем виде:

$$\Delta_{(1-\varphi)} = \Delta_{V_{изм}} \oplus \Delta_{V_{р.м}},$$

где  $\Delta_{V_{изм}}$  – погрешность измерений суммарного объема находящихся в видеокадре воздушных пузырьков;  $\Delta_{V_{р.м}}$  – погрешность определения объема попадающего в видеокадр участка расходной магистрали.

Модель погрешности измерений суммарного объема находящихся в видеокадре воздушных пузырьков можно представить в следующем виде:

$$\Delta_{V_{изм}} = \Delta_s \oplus \Delta_{\Delta} \oplus \Delta_t \oplus \Delta_{ск} \oplus \Delta_{полож} \oplus \Delta_{эт},$$

где  $\Delta_s$  – систематическая составляющая погрешности измерения суммарного объема находящихся в видеокадре воздушных пузырьков измерительным каналом, обусловленная отклонением математического ожидания результатов наблюдений при измерении суммарного объема находящихся в видеокадре воздушных пузырьков от объема воздуха  $V_{эт}$ ;

$\Delta_{\Delta}$  – случайная составляющая погрешности измерения, обусловленная разбросом результатов наблюдений; в качестве статистической точечной оценки случайной составляющей погрешности используется среднее квадратическое значение отклонений результатов наблюдений от их математического ожидания;

$\Delta_t$  – дополнительная составляющая погрешности, обусловленная функцией влияния изменения температуры воды в диапазоне допускаемых значений  $\psi(\xi_t)$ , определяется экспериментальным способом;

$\Delta_{ск}$  – дополнительная составляющая погрешности, обусловленная скоростью потока воды при проведении функциональных испытаний опытных конструкций, определяется расчетным способом;

$\Delta_{полож}$  – дополнительная составляющая погрешности, обусловленная пространственным положением в поперечном сечении движущихся с потоком воды пузырь-

ков воздуха, определяется экспериментальным способом;

$\Delta_{эм}$  – предельная погрешность средств измерительной техники (мерная лабораторная посуда, устройство ввода известного объема воздуха), используемых в качестве рабочих эталонов;

$\oplus$  – знак непрямого математического суммирования.

В качестве расчетной формулы для систематической составляющей погрешности используется выражение

$$\Delta_s = M[V_{изм.i}] - V_{эм},$$

где  $M[V_{изм.i}]$  – математическое ожидание результатов наблюдений при измерении суммарного объема находящихся в видеокадре воздушных пузырьков;  $[V_{изм.i}]$  – результат наблюдений при  $i$ -том измерении вводимого в расходную магистраль с помощью устройства ввода объема воздуха  $V_{эм}$ .

В качестве расчетной формулы для среднего квадратического значения используется выражение

$$\sigma(\overset{\circ}{\Delta}) = \sqrt{\frac{\sum_1^i \{V_{изм.i} - M[V_{изм.i}]\}^2}{i-1}}.$$

На основании сформированной модели погрешности измерений суммарного объема находящихся в видеокадре воздушных пузырьков, каждая составляющая которой характеризуется точечными характеристиками, формируются расчетные формулы для определения границ интервала, в котором суммарная погрешность  $V_{изм}$  находится с вероятностью  $P=0,95$ .

Расчетные формулы имеют следующий вид:

– верхняя граница абсолютной погрешности измерения суммарного объема находящихся в видеокадре воздушных пузырьков

$$\Delta_{V_{изм}} = \Delta_s + 1,96 \cdot \sqrt{D(\overset{\circ}{\Delta})} + \Delta_t + \Delta_{ск} + \Delta_{полож} + \Delta_{эм};$$

– нижняя граница абсолютной погрешности измерения суммарного объема

находящихся в видеокадре воздушных пузырьков

$$\Delta_{V_{изм}} = \Delta_s - 1,96 \cdot \sqrt{D(\overset{\circ}{\Delta})} - \Delta_t - \Delta_{ск} - \Delta_{полож} - \Delta_{эм}.$$

Модель погрешности измерений объема расходной магистрали можно представить в следующем виде:

$$\Delta_{V_{р.м}} = \Delta_d \oplus \Delta_{l_{1,2}},$$

где  $\Delta_d$  – приписанная погрешность средства измерительной техники, используемого для измерения внутреннего диаметра расходной магистрали;  $\Delta_{l_{1,2}}$  – приписанная погрешность измерительной металлической линейки.

На основании сформированной модели погрешности измерений объема расходной магистрали оценка границ абсолютной погрешности  $\Delta_{V_{р.м}}$  как результата косвенных измерений может быть проведена по формуле

$$\Delta_{V_{р.м}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta_{V_{р.м}}}{\partial d}\right)^2 \cdot \Delta_d^2 + \left(\frac{\partial \Delta_{V_{р.м}}}{\partial l_1}\right)^2 \cdot \Delta_{l_1}^2 + \left(\frac{\partial \Delta_{V_{р.м}}}{\partial l_2}\right)^2 \cdot \Delta_{l_2}^2},$$

$$\text{где } \frac{\partial \Delta_{V_{р.м}}}{\partial d} = \frac{\pi \cdot d}{2} \cdot (l_2 - l_1); \quad \frac{\partial \Delta_{V_{р.м}}}{\partial l_1} = \frac{\pi \cdot d^2}{4};$$

$$\frac{\partial \Delta_{V_{р.м}}}{\partial l_2} = -\frac{\pi \cdot d^2}{4}.$$

Принимая  $\Delta_{l_2} = \Delta_{l_1} = \Delta_l$ , получаем

$$\Delta_{V_{р.м}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\pi \cdot d}{2}\right)^2 \cdot (l_2 - l_1)^2 \cdot \Delta_d^2 + 2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot d}{4}\right)^2 \cdot \Delta_l^2}.$$

При видеорегистрации движения воды с пузырьками воздуха изображение с помощью линз объектива фокусируется на поверхности фотоматрицы, состоящей из фотоячеек. На выходе каждой фотоячейки формируется аналоговый выходной сигнал, пропорциональный освещенности фотоячейки. Управляющий процессор видеорегистратора проводит опрос фотоячеек фотоматрицы, преобразование аналоговых сигналов в цифровые и формирует электронный видеокадр, соответствующий изображению на поверхности фотоматрицы.

При движении объекта с единичной площадью  $S_1=1$  у. ед. со скоростью  $\frac{\partial y}{\partial \tau}$  в поле зрения объектива его изображение на фотоматрице пройдет расстояние  $\frac{\partial y}{\partial \tau} \cdot \Delta_\tau$ ,

где  $\Delta_\tau$  – интервал времени, за который проводится единичный опрос фотоячеек фотоматрицы. Этот интервал времени носит название «время затвора» и является технической характеристикой применяемого видеорегистратора. На сформированном электронном видеокадре изображение единичного объекта примет размеры  $S_2=1 \cdot (1 + \frac{\partial y}{\partial \tau} \cdot \Delta_\tau)$  у. ед. Тогда дополнитель-

ную составляющую погрешности, обусловленную скоростью потока воды при проведении функциональных испытаний опытных конструкций, можно оценить по формуле

$$\sigma_{доп.ск} = \frac{S_2 - S_1}{S} \cdot 100\% = \frac{\partial y}{\partial \tau} \cdot \Delta_\tau \cdot 100\%.$$

Оценку абсолютной составляющей погрешности, обусловленной скоростью потока воды при проведении функциональных испытаний опытных конструкций, можно провести по формуле

$$\Delta_{доп.ск} = \frac{V_{изм}}{100} \cdot \sigma_{доп.ск} = V_{изм} \cdot \frac{\partial y}{\partial \tau} \cdot \Delta_\tau,$$

где  $\frac{\partial y}{\partial \tau}$  – скорость движения потока воды по расходной магистрали.

## Выводы

Теоретические выкладки, приведенные в настоящей статье, позволят приступить к экспериментальным исследованиям предлагаемого способа с целью определения интервальных характеристик погрешности измерения, то есть границ, в которых абсолютные погрешности измерения несплошности потока жидкости находятся с доверительной вероятностью  $P=0,95$ .

Проведение экспериментальных и расчетных аттестационных работ по разработанной программе и методике аттестации будет основанием для оформления документации на аттестованную методику выполнения измерений согласно действующей в Украине нормативной документации в сфере метрологического обеспечения.

Статья поступила 26.10.2016