

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКОСТИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ АВТОМАТИКИ

© С. Р. Корбанюк

ДКБ «Південне» ім. М. К. Янгеля

Подано новий математичний метод непрямого вимірювання витрати рідини за показами давача тиску при динамічних випробуваннях агрегатів гідроавтоматики на певних видах стендів. Також показано розроблений в ДКБ «Південне» давач миттєвих витрат струменевого типу, який дозволяє виконувати прямі вимірювання витрат.

При испытаниях ракетных двигателей и узлов, входящих в их состав, иногда необходимо проводить измерения быстро изменяющихся расходов жидкостей. Наиболее часто эта задача возникает при динамических испытаниях регуляторов. Рассмотрим два способа измерения мгновенных расходов — косвенный, по измеренному в характерной точке давлению, и прямой — специально разработанным датчиком.

Первый способ проиллюстрируем для схемы, показанной на рис. 1, по которой экспериментально определялись АФЧХ регулятора расхода прямого действия. Расход жидкости можно определить расчетным способом по показанию малоинерционного датчика давления, установленного перед сосредоточенным сопротивлением на выходе.

При испытаниях давление на входе в регулятор и выходе из него устанавливается оборотами насо-

са, а также стендовыми дросселями и задвижками. Между регулятором и выходным стендовым дросселем установлен еще и дополнительный дроссель с электроприводом. При кавитационном режиме течения через этот дроссель отсекается инерционность выходной магистрали стенда. Между регулятором и ДЭПом стоит пульсатор для создания гармонических колебаний давления в магистрали. Пульсатор представляет собой дроссель типа сопло-заслонка. Заслонка выполнена в виде вращающегося кулачка, спрофилированного по синусоидальному закону. Для вращения кулачка используется или электропривод, или гидротурбина типа «сегнерово колесо» — и то, и другое являются принадлежностью конструкции пульсатора.

Зная режим испытаний (расходную характеристику пульсатора, режим работы регулятора) и значение давления $p_{\text{вых}}$, измеренное индуктивным датчиком, можно расчетным способом определить значение расхода.

Расход через регулятор можно представить в виде суммы расходов через пульсатор и дроссель на выходе:

$$\dot{m}_{\Sigma}(t) = \dot{m}_{\Pi}(t) + \dot{m}_{\text{др}}(t).$$

Расходная характеристика пульсатора, полученная перед испытаниями, может быть описана формулой

$$\dot{m}_{\Pi}(t) = \dot{m}_{\text{ПСР}} + A_{\dot{m}_{\Pi}} \sin \omega t, \quad (1)$$

где $A_{\dot{m}_{\Pi}}$ — амплитуда, $\dot{m}_{\text{ПСР}}$ — среднее значение расхода через пульсатор, ω — циклическая частота.

Это выражение представлено для случая, когда $p_{\text{вых}} = \text{const}$. Основным допущением в данной мате-

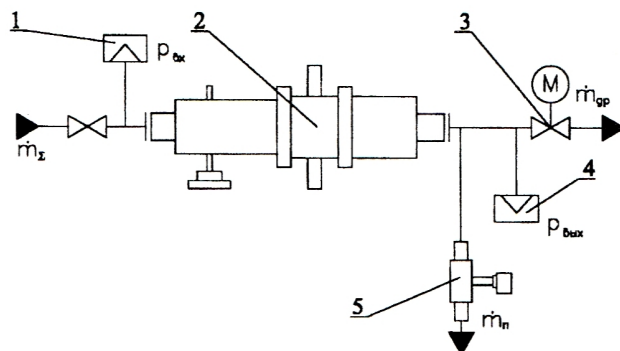


Рис. 1. Схема испытательного стенда: 1, 4 — датчик давления ДДИ-20, 2 — регулятор, 3 — дроссель с электроприводом (ДЭП), 5 — пульсатор

математической модели является то, что максимум расхода через пульсатор совпадает с минимумом выходного давления. С учетом этих замечаний выражение (1) примет вид

$$\dot{m}_{\Pi}(t) = \left\{ \dot{m}_{\text{ПСП}} + A_{\dot{m}_{\Pi}} \sin \left[\omega(t - t_{\min}) + \frac{\pi}{2} \right] \right\} \sqrt{p_{\text{ВЫХ}}(t) / p_{\text{ВЫХ}0}},$$

где t_{\min} — значение времени, когда сигнал $p_{\text{ВЫХ}}$ имеет минимальное значение, $\pi/2 - \omega t_{\min}$ — добавка, учитывающая разность фаз сигналов расхода и выходного давления, $p_{\text{ВЫХ}}(t)$ — значение выходного давления в текущий момент времени, $p_{\text{ВЫХ}0}$ — давление на статическом режиме, $\sqrt{p_{\text{ВЫХ}}(t) / p_{\text{ВЫХ}0}}$ — корень, учитывающий отличие $p_{\text{ВЫХ}}(t)$ от $p_{\text{ВЫХ}0}$.

Расход через выходной дроссель можно найти по уравнению Бернулли:

$$\dot{m}_{\text{др}}(t) = \mu F_{\text{др}} \sqrt{2\gamma \Delta p}, \quad (2)$$

где $F_{\text{др}}$ — площадь проходного сечения дросселя, μ — коэффициент расхода, γ — плотность жидкости, Δp — перепад давлений на дросселе.

При кавитирующем режиме течения значение Δp можно заменить на давление на выходе $p_{\text{ВЫХ}}$. Эффективную площадь можно выразить из статического режима:

$$\begin{aligned} \dot{m}_p^* &= \dot{m}_{\text{др}}^* + \dot{m}_{\Pi}^* \sqrt{p_{\text{ВЫХ} \text{ ср}} / p_{\text{ВЫХ}0}}, \\ \dot{m}_{\Pi}^* &= \dot{m}_{\text{ПСП}}, \\ \dot{m}_{\text{др}}^* &= \dot{m}_p^* - \dot{m}_{\text{ПСП}} \sqrt{p_{\text{ВЫХ} \text{ ср}} / p_{\text{ВЫХ}0}}, \\ \dot{m}_{\text{др}}^* &= \mu F_{\text{др}} \sqrt{2\gamma p_{\text{ВЫХ} \text{ ср}}}, \\ \mu F_{\text{др}} &= \frac{\dot{m}_p^* - \dot{m}_{\text{ПСП}} \sqrt{p_{\text{ВЫХ} \text{ ср}} / p_{\text{ВЫХ}0}}}{\sqrt{2\gamma p_{\text{ВЫХ} \text{ ср}}}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где \dot{m}_p^* — расход через регулятор на статическом режиме, $p_{\text{ВЫХ} \text{ ср}}$ — реальное среднее значение давления на выходе.

Подставляя выражение (3) в (2), получаем

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{др}}(t) &= \left[\frac{\dot{m}_p^* - \dot{m}_{\text{ПСП}} \sqrt{p_{\text{ВЫХ} \text{ ср}} / p_{\text{ВЫХ}0}}}{\sqrt{2\gamma p_{\text{ВЫХ} \text{ ср}}}} \right] \sqrt{2\gamma p_{\text{ВЫХ}}(t)} = \\ &= \dot{m}_p^* \sqrt{p_{\text{ВЫХ}}(t) / p_{\text{ВЫХ} \text{ ср}}} - \dot{m}_{\text{ПСП}} \sqrt{p_{\text{ВЫХ}}(t) / p_{\text{ВЫХ}0}}, \end{aligned}$$

Теперь, зная значения обоих расходов, находим выражение для общего расхода:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\Sigma}(t) &= \left\{ \dot{m}_{\text{ПСП}} + A_{\dot{m}_{\Pi}} \sin [\omega(t - t_{\min}) + \pi/2] \right\} \sqrt{p_{\text{ВЫХ}}(t) / p_{\text{ВЫХ}0}} + \\ &+ \dot{m}_p^* \sqrt{p_{\text{ВЫХ}}(t) / p_{\text{ВЫХ} \text{ ср}}} - \dot{m}_{\text{ПСП}} \sqrt{p_{\text{ВЫХ}}(t) / p_{\text{ВЫХ}0}}, \\ \dot{m}_{\Sigma}(t) &= \sqrt{p_{\text{ВЫХ}}(t)} \left\{ \frac{A_{\dot{m}_{\Pi}}}{\sqrt{p_{\text{ВЫХ}0}}} \sin [\omega(t - t_{\min}) + \pi/2] + \frac{\dot{m}_p^*}{\sqrt{p_{\text{ВЫХ} \text{ ср}}}} \right\}. \end{aligned}$$

Из этой формулы, зная значение сигнала $p_{\text{ВЫХ}}$, можно всегда найти значение расхода.

При реализации данного метода проблема заключается в том, что при динамических испытаниях трудно обеспечить синусоидальную форму сигнала $p_{\text{ВЫХ}}$. Так в данном примере на кулачок пульсатора действовали два усилия — раскручивающее от привода и тормозящее от набегающего потока, их взаимное влияние приводило к этим последствиям. Изменение формы сигнала $p_{\text{ВЫХ}}$ вызывает несовпадение минимума выходного давления с максимумом расхода через пульсатор, а значит, не соблюдается одно из допущений математической модели. Чтобы избавиться от этого, нужно либо находить отдельные периоды, либо брать средний по испытанию. Как показали расчеты, именно первое решение позволяет получить нужные результаты по ходу всего испытания. Другой проблемой является зашумленность сигнала ДДИ-20, что усложняет компьютерную обработку и вводит дополнительную погрешность при его сглаживании или фильтрации.

На рис. 2 показан пример расчета. Сигнал $p_{\text{ВЫХ}}$ был сглажен методом скользящего среднего. Это

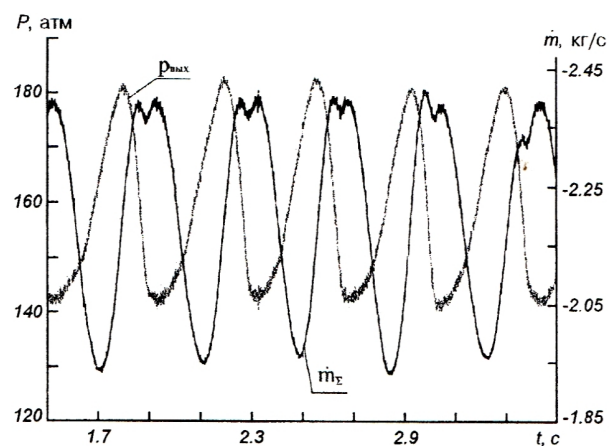


Рис. 2. Пример определения расхода по показаниям датчика давления

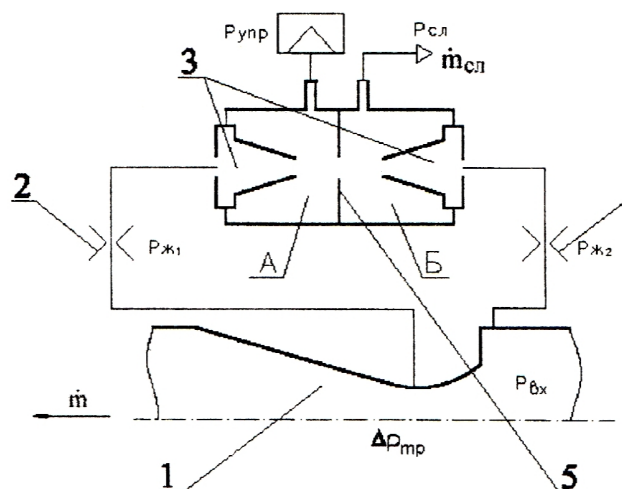


Рис. 3. Датчик мгновенных расходов струйного типа: 1 — расходомерное сопло Вентури, 2, 4 — настроечные жиклеры, 3 — сопла, 5 — диафрагма, 6 — датчик давления ДДИ-20

было необходимо для нахождения локальных минимумов, которые в свою очередь нужны для привязки сигналов и определения локальных периодов. Наличие «седел» на сигнале расхода обусловлено пилообразным видом $p_{\text{вых}}$.

Для прямых измерений быстро изменяющихся расходов в ГKB «Южное» был разработан датчик мгновенных расходов струйного типа (ДМРСТ), показанный на рис. 3.

Датчик состоит из расходомерного сопла Вентури и струйного усилителя. Во время работы датчика производится отбор из входа и из горловины трубки. Далее эти расходы, проходя через свои магистрали и настроечные жиклеры, попадают в два оппозитно расположенные сопла. Полость струйного усилителя разделена диафрагмой на две: управляющую А и сливную Б. При правильной настройке фронт соударения струй располагается в управляющей полости. По уровню управляющего давления, измеряемого ДДИ-20, находят величину расхода:

$$\dot{m} = \mu F_{\text{тр}} \sqrt{2gy\Delta p_{\text{тр}}},$$

$$p_{\text{упр}} = k_{\text{усил}} \Delta p_{\text{тр}},$$

$$\dot{m} = \mu F_{\text{тр}} \sqrt{2gy p_{\text{упр}} / k_{\text{усил}}},$$

$$u_{\text{вых}} = f(p_{\text{упр}}) = f(\dot{m}).$$

Работы по оценке пределов погрешностей определения расхода показали, что на воде предельные значения относительной погрешности не превышали 0.53 %. При этом практически около 80 % указанной погрешности приходится на случайную составляющую. При изменении входного давления на 2 % погрешность определения расхода изменяется не более чем на 0.02 %. Эти данные были получены в статическом режиме.

Хотя в соответствии с уравнениями ДМРСТ является идеальным усилительным звеном. Были проведены исследования динамических характеристик. Они показали, что динамический коэффициент усиления в диапазоне 0—140 Гц изменяется не более чем на 2 %.

Основными достоинствами этого датчика является отсутствие подвижных частей, а также использование в качестве чувствительного элемента стандартных отработанных датчиков (ДДИ-20, ВТ 212 и др.). К недостаткам следует отнести большую зашумленность выходного сигнала ($P_{\text{упр}}$) из-за колебаний давления, возникающего при работе струйного усилителя.

Рассмотренные методы могут быть использованы при экспериментальных работах, требующих измерения быстро изменяющихся расходов.

1. Кремлевский П. П. Расходомеры. — М.-Л.: МАШГИЗ, 1963.
2. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. — М.: Мир, 1978.

METHODS OF MEASUREMENT OF CHARGES OF LIQUIDS ARE CONSIDERED AT DYNAMIC TESTS OF HYDRAULIC AUTOMATIC DEVICES

S. R. Korbanyuk

In this article new ways of measurement of charges of liquids are considered at dynamic tests of units of hydroautomatics. The mathematical method of indirect definition of the charge under indications of the gauge of pressure is submitted at carrying out of tests on the certain kinds of stands. Also it is shown, developed in SDO "Yuzhnoye", the gauge of instant charges of jet type, which allows making direct measurements of charges.