

УДК 681.121 (088.8)

Высокоточная дозирующая установка ВДУ-65 для заправки разгонных блоков

Ю. Б. Горбаткин, Е. А. Дерденков, А. О. Лобанов, В. А. Чернышев

АО «Научно-производственное объединение измерительной техники»

e-mail: gorbatkin.yu@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены основные результаты использования высокоточной дозирующей установки (дозатора) ВДУ-65 для заправки разгонного блока (РБ) «Бриз-М» ракеты «Ангара-А5». Дозатор ВДУ-65 предназначен для измерения массы на потоке компонентов ракетных топлив с погрешностью $\pm 0,2\%$ в диапазоне от 500 до 999 999 кг при значениях расхода 3,5–24 м³/ч. Высокая точность дозирования обеспечивается использованием в алгоритме измерений в качестве градуировочной характеристики индивидуальной зависимости числа Струхала от числа Рейнольдса $Sh(Re)$, а также применением коррекции показаний по плотности и вязкости компонентов. Приводятся результаты анализа выходной информации дозатора ВДУ-65, зарегистрированной в процессе заправки РБ «Бриз-М» системой документирования заправочного комплекса, который подтвердил его нормальное функционирование. Дозатор ВДУ-65 должен заменить выводимый из эксплуатации устаревший дозатор «Омега-2» зарубежного производства.

Ключевые слова: измерение массы на потоке, точность дозирования, заправочный комплекс, компоненты ракетных топлив

High-Precision Dosing Unit VDU-65 for Filling Upper Blocks

Yu. B. Gorbatkin, E. A. Derdencov, A. O. Lobanov, V. A. Chernyshev

Joint Stock Company "Scientific production association of measuring equipment"

e-mail: gorbatkin.yu@yandex.ru

Abstract. Describes the main results of the using of high-precision dosing unit (dispenser) VDU-65 for filling upper block (UB) "Breeze-M" of the rocket "Angara-A5". Dispenser VDU-65 is designed to measure the mass flow of the components of rocket fuels with an accuracy of $\pm 0,2\%$ in the range from 500 to 999 999 kg at flow rates of 3,5–24 m³/h. High dosing accuracy is ensured by using the algorithm of measurement as the calibration characteristics of the individual dependence of the Strouhal number on Reynolds number $Sh(Re)$, as well as correction of the density and viscosity of the components. The results of analysis output information install VDP-65, registered in the fueling process of the RB "Breeze-M" system of documentation filling complex, which confirmed its normal functioning. Installing VDU-65 to replace the dismantled obsolete metering installation "Omega-2" foreign production.

Key words: measurement of the mass flow quality, accuracy of dosing, filling complex, components of rocket fuels

В настоящее время для измерения массы компонентов ракетного топлива при заправке разгонных блоков (РБ) ракет-носителей (РН) используется дозатор «Омега-2», разработанный в СССР азербайджанским СКБ «Нефтехимприбор» и выпускавшийся серийно по ТУ 25-02-821132-76 [1,2]. Большинство из находящихся в эксплуатации дозаторов «Омега-2» выработали свой ресурс, и поддержание их в работоспособном состоянии обеспечивается в основном за счет ремонта или замены вышедших из строя блоков исправными, снятыми со списываемых дозаторов.

С 2012 г. ОАО «НПО ИТ» начало поставки на объекты космической инфраструктуры дозатора ВДУ-65, разработанного по техническому заданию ФГУП «КБТХМ» (которое в настоящее время осуществляет техническое обслуживание и ремонт дозаторов «Омега-2»). Как и в дозаторах «Омега», в дозаторе ВДУ-65 определение массы компонента осуществляется путем измерения его объема и пересчета объема в массу умножением на текущее значение плотности. Измерение объема осуществляется с помощью вихревого преобразователя расхода: в измерительном патрубке размещено плохо обтекаемое тело трапециевидного сечения, за которым образуется вихревая дорожка Кармана. Каждый вихрь детектируется с помощью двух симметрично расположенных чувствительных элементов «лопасть в потоке» с оптическими преобразователями колебаний лопасти и преобразуется в электрические импульсы, каждому из которых соответствует определенный объем компонента. Для измерения температуры компонента используются два встроенных термометра сопротивления (ТС); таким образом, дозатор ВДУ-65 имеет два независимых канала измерений массы. Для повышения точности измерений объема в дозаторе ВДУ-65 реализован алгоритм измерений, основанный на вычислении «веса» каждого импульса с использованием табличной зависимости числа Струхалия от числа Рейнольдса и суммировании весов импульсов нарастающим итогом [3]. Для повышения точности измерений температуры на ячейке преобразователя расхода установлен дополнительный интегральный термодатчик, позволяющий калибровать канал измерения температуры по высокостабильному образцовому резистору и измерять температуру

компонента с учетом температурного ухода элементов измерительной схемы. Вся обработка информации и формирование команд осуществляется в цифровом виде с помощью микроконтроллеров.

Дозатор ВДУ-65 функционирует следующим образом. При наличии расхода компонента за плохо обтекаемым телом образуются вихри, частота следования которых F пропорциональна скорости потока, т.е. объемному расходу Q , и выражается формулой

$$F = \frac{Sh \cdot Q}{S \cdot d}, \quad (1)$$

где Sh — число Струхалия;

d — ширина плохо обтекаемого тела;

$S = \frac{\pi D^2}{4} \left(1 - \frac{4\beta}{\pi}\right)$ — площадь сечения потока в месте установки плохо обтекаемого тела;

$\beta = d/D$ — отношение ширины тела к диаметру.

Число Струхалия непостоянно и зависит от числа Рейнольдса Re потока

$$Sh = Sh(Re), \quad (2)$$

где $Re = \frac{4Q}{\pi D \nu}$, ν — кинематическая вязкость КРТ.

В процессе дозирования измеряется частота следования выходных импульсов F , по которой рассчитывается расход Q , а также измеряется температура компонента θ , по которой рассчитывается вязкость $\nu(\theta)$. По расходу и вязкости вычисляется число Re , после чего вычисляется число Sh — подстановкой Re в зависимость $Sh(Re)$. По температуре θ рассчитывается плотность продукта $\rho(\theta)$. По значениям $\nu(\theta)$ и $\rho(\theta)$ определяется весовой коэффициент M_i (масса) i -го импульса:

$$M_i = \frac{K \cdot S \cdot d \cdot \rho(\theta_i)}{Sh \{Re [F_i, \nu(\theta_i)]\}}, \quad (3)$$

где $K \approx 1$ — индивидуальный градуировочный коэффициент преобразователя расхода, F_i — текущее значение частоты, θ_i — текущее значение температуры продукта.

Масса компонента M определяется путем суммирования весовых коэффициентов M_i нарастающим итогом:

$$M = \sum_{i=1}^N M_i, \quad (4)$$



Рис. 1. Блок задания дозы БЗД

где N — общее число выходных импульсов за время дозирования.

После прохождения через преобразователь расхода запрограммированного количества компонента, называемого дозой, суммирование заканчивается и выдается сигнал «Отсечка» на прекращение заправки. Сигнал «Отсечка» формируется «опережающим» каналом, т.е. тем, который раньше наберет запрограммированную дозу. Помимо измерения массы, алгоритм функционирования дозатора предусматривает вычисление текущего значения расхода, а также текущего и среднего за время дозирования значений температуры рабочей жидкости. Основным признаком нормального функционирования дозатора при заправке является совпадение между собой измеренных каналами значений дозы с отклонением не более 0,1 % по абсолютной величине.

Дозатор имеет режим «Контроль», в котором осуществляется имитационная проверка его работоспособности: контрольное значение расхода имитируется путем амплитудной модуляции тока питания светодиода оптического детектора с фиксированной частотой, а контрольное значение температуры имитируется подключением вместо ТС

прецизионного резистора. Проверка заканчивается после набора одним из каналов дозы 2000 кг.

Для обеспечения необходимой метрологической надежности операции дозирования перед отпуском рабочей дозы предусмотрено проведение проверки дозатора в режиме «Контроль», а также проверки расхождения показаний каналов путем имитации выдачи дозы (с пропуском компонента через преобразователь расхода). Кроме того, непосредственно перед заправкой выполняется прокачка компонента до стабилизации измеренного ТС значения температуры, которое свидетельствует о выравнивании температур компонента и корпуса ТС.

В состав комплекта дозатора ВДУ-65 входят: блок задания дозы БЗД (рис. 1), преобразователь расхода окислителя ПРТ-65-О и стабилизатор потока СП-65-О к нему (рис. 2). Комплект рассчитан на последовательную заправку изделия компонентами: при заправке окислителя используются блоки БЗД, ПРТ-65-О и СП-65-О, при заправке горючего — БЗД, ПРТ-65-Г, СП-65-Г.

Габаритно-установочные размеры блока ПРТ-65-О(Г) с присоединенным блоком СП-65-О(Г) и схема подключения дозатора ВДУ-65 к системе

Таблица 1. Сравнительные характеристики дозаторов ВДУ-65 и «Омега-2»

Характеристика	Ед. изм.	Значение	
		«Омега-2»	ВДУ-65
Количество каналов измерений	ед.	2	2
Минимальная измеряемая доза	кг	2000	500
Дискретность задания дозы	кг	1	1
Погрешность отсечки дозы	%	$\pm 0,3$	$\pm 0,2$
Допускаемая разность показаний каналов (абсолютное значение)	%	0,3	0,1
Диапазон расходов при дозировании	м ³ /ч	11,3–15,9 15,9–22,4	3,5–24
Вероятность безотказной работы	–	0,985	0,9995
Назначенный ресурс	ч	5000	6000
Гарантийный срок	лет	10	15
Вид взрывозащиты преобразователя расхода	–	Взрыво- непроницаемая оболочка	Искробезопасная электрическая цепь ib
Вывод информации в систему документирования заправочного комплекса	–	Отсутствует	Имеется

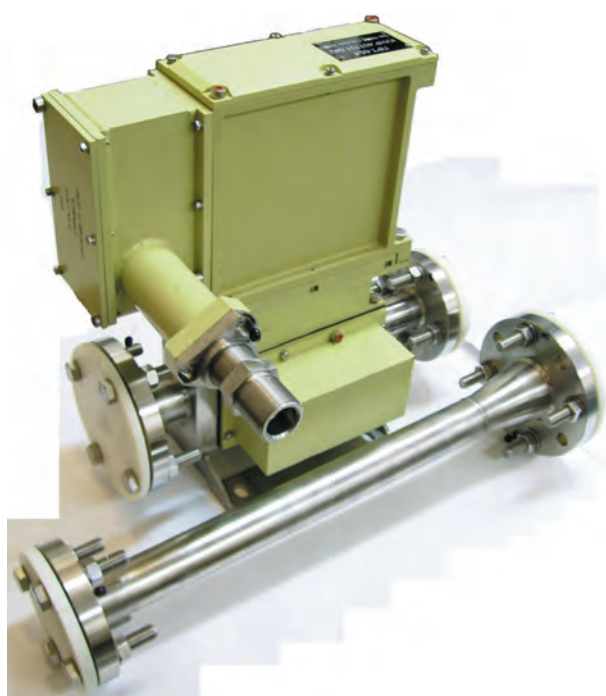


Рис. 2. Преобразователь расхода ПРТ-65-О(Г) и стабилизатор потока СП-65-О(Г)

управления заправочного комплекса идентичны таковым дозатора «Омега-2», что позволяет осуществлять замену дозатора «Омега» на дозатор

ВДУ-65 без доработки агрегатов заправки и существующих кабельных линий и корректировки технологического процесса заправки. Основные характеристики дозатора ВДУ-65 в сравнении с дозатором «Омега-2» приведены в табл. 1.

В настоящее время два штатных образца дозатора ВДУ-65, предназначенных для заправки РБ, введены в опытную эксплуатацию на космодромах «Байконур» и «Плесецк». На место эксплуатации дозаторы поступают в составе агрегата заправки. На заправочных комплексах космодрома «Байконур» и «Плесецк» были выполнены следующие пусконаладочные работы:

- выдача пробных доз окислителя и горючего;
- предусмотренная эксплуатационной документацией дозатора корректировка зависимостей $Sh(Re)$, занесенных в память микроконтроллеров преобразователей расхода при их изготовлении. Необходимость корректировки обусловлена смещением отдельных точек градуировочной характеристики, причиной которого является, по-видимому, неравномерность эпюры скоростей потока на входе в преобразователь расхода, обусловленная наличием поворота входного трубопровода на 180°;
- выдача зачетных (контрольных) доз.

Таблица 2. Горючее, контрольная доза 2000 кг

№	Фактическая масса дозы, кг	Погрешность, %		Температура продукта, °С	Q, м³/ч
		1 канал	2 канал		
1	1996,6	0,14	0,13	10,5	10,7
2	1997,6	0,08	0,08	11,0	10,8
3	1998,6	0,03	0,02	12,0	10,6
4	1996,4	0,14	0,13	16,5	10,9
5	1998,4	0,05	0,04	16,5	11,0
6	2000,1	-0,03	-0,05	17,0	11,0

Таблица 3. Окислитель, контрольная доза 4000 кг

№	Фактическая масса дозы, кг	Погрешность, %		Температура продукта, °С	Q, м³/ч
		1 канал	2 канал		
1	3993,7	0,18	0,14	13,0	10,2
2	4004,8	-0,10	-0,14	13,5	10,3
3	4004,1	-0,08	-0,12	13,7	10,3
4	4003,3	-0,06	-0,08	18,5	10,3
5	4004,4	-0,08	-0,11	18,7	10,1
6	4002,8	-0,05	-0,08	19,0	10,2

В качестве эталонного средства использовались штатные весы заправочного комплекса с ценой деления 1 кг, имеющие погрешность взвешивания $\pm 0,05\%$.

При выдаче контрольных доз на космодроме «Байконур» были получены максимальные значения погрешности $-0,17\%$ по окислителю и $0,13\%$ по горючему.

Результаты контрольного дозирования на космодроме «Плесецк» приведены в табл. 2 и 3.

В ходе пусконаладочных работ выяснилось, что фактическая продолжительность технологической паузы между окончанием прокачки компонента и началом дозирования (используемой для подготовки технологического оборудования к заправке) составляет 30 мин при регламентированной эксплуатационной документацией дозатора продолжительности 5 мин. При этом в течение технологической паузы наблюдается дрейф показаний термодатчика дозатора в сторону температуры окружающей среды, что может влиять на точность дозирования при малых значениях дозы.

Первая штатная заправка с использованием дозатора ВДУ-65 осуществлена на космодроме

«Плесецк» при заправке РБ «Бриз-М» РН «Ангара-А5» 18-19 декабря 2014 г. При этом были выполнены следующие операции:

- проверка работоспособности в режиме «Контроль» (без пропуска компонента);
- прокачка компонента до стабилизации показаний термодатчиков;
- проверка работоспособности путем сравнения показаний каналов при имитации выдачи дозы 1000 кг;
- заправка;
- анализ разности показаний каналов по завершении заправки.

Во время заправки горючего произошла остановка на дозе 379 кг по причинам, не зависящим от работы дозатора. После возобновления заправка завершилась без остановок. Температура горючего составляла 14 °С; расход: до остановки — 9,8 м³/ч, после остановки — плавное снижение с 9,8 до 4,9 м³/ч. Разность показаний каналов по завершении заправки составила 1 кг (менее 0,02%). Заправка окислителя прошла без остановок. Температура окислителя была 14,5–15 °С, расход — 9,6 м³/ч. Разность показаний каналов по завершении заправки составила

3 кг (менее 0,03 %). Дозатор при заправке отработал штатно, без замечаний.

В заключение следует отметить, что, в отличие от дозатора «Омега-2», какие-либо регулировки дозатора ВДУ-65 в процессе эксплуатации не требуются.

Выводы

1. Проведенные на космодромах «Байконур» и «Плесецк» пусконаладочные работы штатных образцов дозатора ВДУ-65, предназначенных для обеспечения заправки разгонного блока «Бриз-М», подтвердили заявленные метрологические характеристики дозатора. Нормальное функционирование дозатора ВДУ-65 в процессе заправки РБ «Бриз-М» РН «Ангара-А5» подтверждено соответствием разности показаний каналов, зафиксированной по завершении заправки, заданному в эксплуатационной документации требованию (менее 0,1 %), а также результатами пуска ракеты-носителя.

2. Внедрение дозатора ВДУ-65 на объектах космической инфраструктуры для заправки эксплуатируемых и перспективных объектов РКТ позволяет:

– обеспечить продление сроков эксплуатации существующих заправочных комплексов при мини-

мальных затратах на их переоборудование под новые дозаторы;

– повысить точность выдаваемых доз и степень оперативной готовности заправочных комплексов;

– обеспечить серийное изготовление дозаторов на отечественных предприятиях и их гарантийное обслуживание в соответствии с действующими военными стандартами.

3. Опыт работы с дозатором ВДУ-65 выявил необходимость совершенствования его конструктивного решения для повышения метрологической надежности, в частности установки на входе стабилизатора потока дополнительного устройства для выравнивания эпюры скоростей потока и доработки узла термодатчика с целью снижения инерционности.

Список литературы

1. Киясбейли А.Ш., Перельштейн М.Е. Вихревые счетчики-расходомеры. М.: Машиностроение, 1974.
2. Киясбейли А.Ш., Перельштейн М.Е. Вихревые измерительные приборы. М.: Машиностроение, 1978.
3. Чернышев В.А., Горбаткин Ю.Б., Дерденков Е.А., Михайлов С.Л. Вихревой способ измерения объема протекшего вещества. Патент РФ №2515129. БИ №13, 2014.