

05, май 2016

УДК 681.121.89

Перспективы применения расходомеров для подвижных наземных заправочных комплексов космодромов

Кожевникова А.П., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Стартовые и технические комплексы ракет и космических аппаратов»*

Научный руководитель: Матвеева О.П., д.т.н, профессор

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Стартовые и технические комплексы ракет и космических аппаратов»*

sm8@sm8.bmstu.ru

Процессы заправки баков ракет и разгонных блоков компонентами топлива (КТ) имеют ряд особенностей, например, их ступенчатость: основная доза КТ выдается на большом расходе, далее осуществляется переход на малый его расход. Токсичность и агрессивность многих КТ обуславливают необходимость использования элементов заправочного оборудования с высоким уровнем надежности и исключения проливов и переливов КТ.

Многие КТ охлаждают в летний период и нагревают в зимний период до допустимых значений температур, которые соответственно ниже или выше температуры окружающей среды. Из-за теплопритоков (или теплопотерь) к элементам заправочного оборудования температура КТ в процессе заправки может изменяться по отношению к исходной температуре, измеренной в заправочной емкости. Этому также способствуют тепловыделения от работающих мощных насосных установок при принудительной выдаче КТ. Снижение потребной мощности насосных установок достигается в том числе и за счет использования элементов заправочного оборудования с малыми гидравлическими сопротивлениями.

Приведенные особенности процессов заправки и элементов заправочного оборудования позволяют сформулировать основные требования к дозирующим установкам, как элементам заправочного оборудования. Среди них: высокая точность измеряемых доз компонентов топлива (КТ) в широком диапазоне расходов, низкая погрешность элементов, входящих в комплектацию дозирующей установки (например, плотномеры, датчика температуры, преобразователей сигналов, сумматоров доз и др.),

низкое гидравлическое сопротивление преобразователей расхода, а также их высокая технологичность, обеспечивающая простоту и высокую точность изготовления преобразователей, возможность быстрого создания типоразмерного ряда устройств.

На российском рынке расходомеры представлены различными отечественными и зарубежными типами и моделями. В настоящее время среди отечественных серийно выпускаемых расходомеров можно выделить вихревые расходомеры (ВР) с плохобтекаемым телом, которые в наибольшей степени удовлетворяют предъявляемым требованиям для их применения в составе заправочного оборудования подвижных наземных комплексов.

Основным недостатком ВР с плохобтекаемым телом (или преобразователем расхода) является относительно высокое гидросопротивление в диапазоне рабочих расходов КТ. Однако их значения могут существенно отличаться для разных видов преобразователей. Например, у установки типа «ОМЕГА» гидросопротивление спиралеобразного преобразователя расхода почти в 2 раза больше, чем у расходомеров с преобразователем с призматическим поперечным сечением при сопоставимых расходах жидкости [1].

Важными достоинствами ВР с неподвижным плохобтекаемым телом простой геометрической формы для применения в составе подвижных заправочных комплексов космодронов являются следующие: отсутствие подвижных элементов, что способствует повышению уровня надежности устройств; диапазон допустимых значений плотности жидкостей охватывает диапазон значений плотности всех КТ (в отличие, например, от известных ультразвуковых счетчиков жидкости); возможность измерения выданной дозы КТ с практически неизменной погрешностью в динамическом диапазоне расхода, равном 10 (т.е. при изменении расхода КТ в 10 раз).

Среди отечественных ВР с плохобтекаемым телом известны модели «Ирвис», «Вихрь», которые пока не обладают требуемым уровнем погрешности выдаваемых доз – менее $\pm 0,5$ % по массе. Однако практический опыт зарубежных производителей таких как «Yokogawa», «Siemens», показывает перспективность дальнейших теоретических и экспериментальных исследований в области создания новых и совершенствования имеющихся образцов отечественных расходомеров подобного типа [2].

Целью данной статьи является анализ и обобщение параметров дозирующих установок на базе ВР с плохобтекаемым телом, которые могут оказывать влияние на погрешность выдаваемых доз КТ. Это позволит сформулировать основные требования и

пути совершенствования таких установок для их применения в составе подвижных заправочных комплексов космодромов.

1. Вихреобразование за плохообтекаемыми телами в потоке

Принцип работы ВР основан на определении частоты срыва вихрей с плохообтекаемого тела. В ходе вихреобразования за плохообтекаемым телом образуется так называемая дорожка Кармана, которая достаточно хорошо исследована в настоящее время [1,3,4].

Вызванное вязкостью среды, вихреобразование происходит в пограничном слое потока. Как показано на рис.1, при обтекании тела, например, треугольного поперечного сечения, среда на участке $b'b''$ ускоряется, отмечается падение давления. После прохождения потоком точки неустойчивого состояния b'' , струя замедляется, так как движется против возрастающего давления.

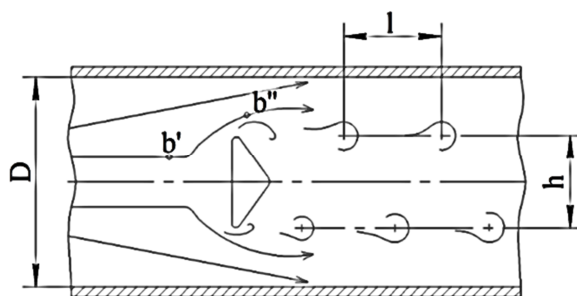


Рис. 1. Схема вихреобразования около плохообтекаемого тела в потоке

В момент прохождения потоком точки b'' пограничный слой отрывается и образуется обратное течение. Это является следствием того, что кинетической энергии частиц становится недостаточно для преодоления нарастающего давления, так как часть ее распределяется на преодоление сил трения. Обратное течение способствует преобразованию пограничного слоя в вихрь, который, достигая размеров обтекаемого тела, в итоге отрывается от тела.

Вихри образуются на каждой стороне обтекаемого тела и, препятствуя одновременному образованию друг друга, отрываются от обтекаемого тела поочередно – то с одной, то с другой стороны, как это представлено на схеме (рис. 1). Для практического применения процесса вихреобразования в расходомерах необходимо обеспечить его стабильность.

Стабильность вихреобразования в значительной степени зависит от режима течения жидкости через проходное сечение преобразователя, т.е. от числа Рейнольдса (Re), от формы и относительных размеров плохообтекаемого тела. В качестве

плохообтекаемого тела целесообразно рассматривать тела несложной конфигурации, которые технологичны при серийном производстве. В этом случае потребуется меньший объем экспериментальных исследований закономерностей вихреобразования для достижения устойчивых результатов.

2. Зависимость стабильности вихреобразования от числа Рейнольдса

Для устойчивого вихреобразования необходимо, чтобы поток жидкости имел скорость не ниже определенного минимального порога. Однако для применения ВР при дозировании КТ значение минимального порога скорости жидкости должно быть меньше скорости КТ при требуемом малом рабочем расходе при заправочных операциях. В свою очередь, скоростной режим потока (ламинарный, переходный, турбулентный) характеризуется широко известным числом Re (рис.2).

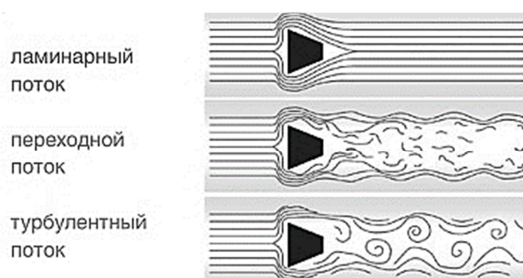


Рис. 2. Вихреобразование при различных режимах течения потока жидкости [2]

Число Re – безразмерная величина, представляющая собой отношение сил инерции к силам вязкого трения в потоке движущейся среды:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \text{ или } Re = \frac{D \cdot v}{\nu}, \quad (1)$$

где v , μ , ν , ρ , D – соответственно, скорость среды, м/с; динамическая вязкость, Н·с/м²; кинематическая вязкость контролируемой жидкости, м²/с; плотность среды, кг/м³; диаметр трубопровода, м.

Для малых значений числа Re (ламинарный и переходный режим течения жидкости) стабильное вихреобразование нехарактерно (рис.2). Однако для определения нижнего порога значений числа Re одновременно рассматривают другой критерий – число Струхали (Sh). Число Sh – безразмерная величина, является одним из критериев подобия нестационарных (часто колебательных) течений жидкостей и газов. Для колебательных процессов при определении числа Струхали часто используется соотношение, полученное для поперечного обтекания средой цилиндра:

$$Sh = \frac{l}{(\pi \cdot h)},$$

где h , l – соответственно расстояние между рядами вихрей и расстояние между центрами вихрей одной цепи (рис. 1).

В работах [2, 5, 6] приводятся некоторые характерные или экспериментальные данные, иллюстрирующие зависимость числа Sh от числа Re в диапазоне $1 \times 10^2 \leq Re \leq 4 \times 10^5$. Так, например, при режиме течения среды (жидкость и газ) в диапазоне $Re \geq 10^4$ может установиться близкая к линейной зависимость $Sh = f(Re)$ (рис.3), что соответствует стабилизации вихреобразования, практически не зависящем от плотности и вязкости среды [2]. При обтекании кругового цилиндра изменение числа Sh составляет 1,5...2 % [5].



Рис.3. Характер зависимости числа $Sh = f(Re)$, для жидкости (скорость течения до 10 м/с) и газа (скорость течения до 80 м/с) [2]

В целом на точность выдачи доз жидкости оказывается комплексное воздействие многих факторов: физических характеристик среды, режимов ее истечения, а также формы, соотношения характерных размера тела и канала, условий монтажа плохообтекаемого тела, принципы регистрации вихрей, характеристик датчиков температуры и давления. Для выявления путей повышения точности ВР целесообразно установить количественную связь между максимально возможным количеством параметров приведенных факторов и точностью (либо погрешностью) установки.

3. Пути повышения точности ВР

Рассмотрим поток жидкости, движущейся с объемным расходом G (м³/с). Частота вихреобразования может быть определена из следующего соотношения [2]:

$$f = \frac{Sh \cdot G}{S \cdot D} = \frac{Sh \cdot G}{H \cdot \left(\frac{\pi}{4} - \frac{H}{D} \right) \cdot D^2}, \quad (2)$$

где f , S , H - соответственно частота вихреобразования, Гц; площадь наименьшего поперечного сечения потока жидкости вокруг обтекаемого тела, м²; фронтальная ширина тела обтекания, м.

Из формулы (2) выразим G :

$$V = \frac{H \cdot \left(\frac{\pi}{4} - \frac{H}{D} \right) \cdot D^2 \cdot f}{Sh}. \quad (3)$$

Для требуемого диапазона величин расхода G и скорости жидкости v необходимо учитывать нелинейность зависимости $Sh(Re)$, а также изменение вязкости ν .

Объем протекшей через ВР жидкости V за время $\Delta \tau = (\tau_1, \tau_2)$ равен:

$$V = \int_{\tau_1}^{\tau_2} G(t) d\tau. \quad (4)$$

Используя соотношения (3) и (4), можно записать:

$$V = \frac{H \cdot D^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{H}{D} \right)}{Sh} \cdot \int_{\tau_1}^{\tau_2} f(\tau) d\tau. \quad (5)$$

Пусть $N = \int_{\tau_1}^{\tau_2} f(\tau) d\tau$ - количество импульсов частоты f , зарегистрированное за интервал времени $\Delta \tau$, тогда формула (4) примет вид:

$$V = \frac{H \cdot D^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{H}{D} \right) \cdot N}{Sh}. \quad (6)$$

Используем среднюю скорость жидкости v_{cp} за время $\Delta \tau$, тогда объем выданной дозы через трубопровод с площадью сечения $F_{сеч}$ равен:

$$V = F_{сеч} \cdot v_{cp} \cdot \Delta \tau = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot v_{cp} \cdot \Delta \tau, \quad (7)$$

где $F_{сеч}$ - площадь сечения трубопровода.

Из соотношений (6) и (7) получим:

$$v_{cp} = \frac{V}{F_{сеч} \cdot \Delta \tau} = \frac{H \cdot D^2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} - \frac{H}{D} \right) \cdot N}{F_{сеч} \cdot \Delta \tau \cdot Sh(Re)}. \quad (8)$$

Используя расход жидкости, средняя ее скорость равна:

$$v_{cp} = \frac{G}{F_{сеч}} = \frac{4G}{\pi \cdot D^2}. \quad (9)$$

Тогда, подставляя соотношение (9) в (1), получим:

$$Re = \frac{D \cdot v_{cp}}{\nu} = \frac{4G}{\pi \cdot D \cdot \nu}. \quad (10)$$

В работах [5,6] отмечается, что экспериментально подтверждено слабое влияние вязкости и плотности измеряемой среды на показания ВР. При этом погрешности измерений исследуемых ВР соответствовали заявленным значениям ($\pm 0,5\%$; $\pm 1\%$). Однако, учитывая более высокие требования к погрешности измерений доз КТ ($\pm 0,5\%$) наряду с необходимостью существенного понижения температуры при подготовке топлива (на 20...60 °С) необходимо в соотношении (10) использовать зависящую от температуры вязкость $\nu(t)$. Рассматривая совместно выражения (8), (10), получим следующие выражения:

$$Re = \frac{4H \cdot D \cdot \left(\frac{\pi}{4} - \frac{H}{D} \right) \cdot N}{\pi \cdot \Delta \tau \cdot Sh(Re) \cdot \nu(t)}, \quad (11)$$

$$Sh(Re) = \frac{4H \cdot D \cdot \left(\frac{\pi}{4} - \frac{H}{D} \right) \cdot N}{\pi \cdot \Delta \tau \cdot Re \cdot \nu(t)}. \quad (12)$$

В последнем выражении можно заметить влияние геометрических параметров (характерного размера) плохобтекаемого тела и трубопровода, в котором оно установлено. В работе [5] решение задачи о выборе этих параметров предлагается решать путем поиска минимального значения величины отношения частотной характеристики к расходу, например, величины $N / (v_{cp} \cdot F_{сеч} \cdot \Delta \tau)$. В окрестности минимального значения этой величины могут быть достигнуты стабильные показания ВР.

Кроме того, на точность измерений выдаваемых доз КТ наиболее негативное влияние могут оказывать нелинейные участки изменения числа $Sh(Re)$ особенно при малых значениях числа Re (или малой скорости среды). Чтобы учесть эту нелинейность, используем уравнение (1) и выразим среднюю скорость на входе в измерительный участок:

$$v_{cp} = \frac{Re \cdot \nu(t)}{D}, \quad (13)$$

а также средний объемный расход -

$$G_{cp} = \vartheta_{cp} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{Re \cdot v(t)}{D} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \quad (14)$$

и средний массовый расход –

$$M_{cp} = G_{cp} \cdot \rho(t) = \frac{Re \cdot v(t)}{D} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi}{4} \cdot (Re \cdot v(t) \cdot D \cdot \rho(t)), \quad (15)$$

где $\rho(t)$ - плотность измеряемой среды, кг/м³.

Далее запишем формулу для определения приращения массы КТ на i -ом шаге ΔM_i (кг) за интервал времени $\Delta \tau$, соответствующий интервалу считывания устройства:

$$\Delta M_i = M_{cpi} \cdot \Delta \tau. \quad (16)$$

После этого можно записать формулу для расчета относительной погрешности выданной дозы КТ:

$$100 \cdot \left| \frac{\sum_i^n \Delta M_i - M_{mp}}{M_{mp}} \right| \leq \delta_{mp}, \quad (17)$$

где $M_{тр}$ – требуемое значение выдаваемой дозы КТ; $\delta_{тр}$ – предельно допустимое значение погрешности выдаваемой дозы КТ.

Рассматривая совместно выражения (8, 12 и 17) в задаче условной оптимизации (18), можно получить оптимальные геометрические параметры плохобтекаемого тела для установки в заданный трубопровод с заданными режимами течения измеряемых сред с помощью ВР при применении существующих плотномеров и датчиков температуры с соответствующими погрешностями их измерений $\delta_{зад}^{плот}$ и $\delta_{зад}^{тем}$:

$$\left\{ \frac{N}{\vartheta_{cp} \cdot F_{сеч} \cdot \Delta \tau} = \frac{Sh(Re)}{H \cdot D^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{H}{D} \right)} \right\} \rightarrow \min \left(\frac{H}{D} \right), \quad (18)$$

при

$$100 \cdot \left| \frac{\sum_i^n \Delta M_i - M_{mp}}{M_{mp}} \right| \leq \delta_{mp}.$$

Таким образом, рассмотрены наиболее значительные источники погрешности ВР при применении их в составе дозирующих установок подвижных наземных заправочных комплексов – это значительная неустойчивость вихреобразования при малых скоростях

течения КТ, что соответствует, в основном, начальному и конечному этапам заправочных операций, а также недостаточно обоснованный выбор соотношения геометрических параметров плохообтекаемого тела и трубопровода. Для снижения влияния этих источников погрешности на точность выдачи доз КТ требуется комплексный подход, для чего сформулирована задача условной оптимизации (18). Кроме того, целесообразен сбор КТ в сливной емкости после прохода через ВТ с последующим передавливанием в заправочную емкость до момента достижения расчетной скорости топлива через ВТ.

Список литературы

- [1] Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: справочник. В 2 т. Т. 2. / под общ. ред. Шорникова Е.А. 5-е изд., перераб. и доп. СПб.: Политехника, 2004. 412 с.
- [2] ООО «Йокогава Электрик СНГ». Вихревые расходомеры DigitalYEWFLO Компании «Йокогава». Режим доступа: http://www.tehnonn.ru/wp-content/uploads/2012/06/Digital_YEWFLO_GS.pdf (дата обращения 07.10.2015).
- [3] Киясбейли А.Ш., Перельштейн М.Е. Вихревые измерительные приборы. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.
- [4] Киясбейли А.Ш., Перельштейн М.Е. Вихревые счетчики - расходомеры. М.: Машиностроение, 1974. 158 с.
- [5] Коган Е.А., Силин М.Д. Применение вихревых счетчиков расхода для заправки топливом автотранспортных средств // 77-я Международная научно-техническая конференция ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров»: материалы. М.: МАМИ, 2012. С. 38-46.
- [6] Силин М.Д. Использование метода дорожки Кармана для создания вихревых расходомеров жидкости и газа: автореф. дисс. ...канд. тех. наук. М.: Гос. ин-т физико – технических проблем (ГосИФТП), 2006. 26 с.