

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ДОЗИРОВАНИЯ ТОПЛИВ. ПУТИ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Введение

В мировой практике для доставки космических аппаратов ракетой-носителем (РН) широкое применение получили разгонные блоки (РБ) на высококипящих компонентах ракетного топлива (КРТ): азотный тетраоксид (АТ) и несимметричный диметилгидразин (НДМГ). К таким объектам можно отнести: РБ «С5М», РБ «Фрегат», РБ «Бриз».

Поскольку масса заправляемого топлива составляет от 80 до 90% массы заправляемого объекта, то влияние точности дозирования при заправке является определяющим. Предъявляемые в настоящее время требования к погрешности дозирования не должны превышать $\pm 0,3\%$ от массы требуемой дозы, а для заправки некоторых объектов погрешность дозирования составляет всего $\pm 0,1\%$ [1].

Процесс дозирования предполагает наличие в составе заправочного оборудования устройств, измеряющих количество топлива, и устройств, осуществляющих ограничение требуемого количества КРТ – дозы. Дозирование может предшествовать подаче топлива в бак, происходить одновременно с ней или осуществляться после неё.

Согласно общепринятой классификации способы дозирования различаются по двум признакам [2]. По месту формирования дозы – внутреннее дозирование и внешнее дозирование, а также по единицам измерения величины дозы – массовое дозирование, весовое дозирование и объемное дозирование.

1. Внутреннее дозирование

1.1 Дозирование с использованием системы контроля уровня

При внутреннем объемном дозировании формирование дозы осуществляется непосредственно в баке объекта заправки с применением системы контроля уровня (СКУ), или, как ее еще называют, системы контроля заправки (СКЗ). Этот способ дозирования предполагает наличие характеристик зависимости объема топлива в баке от текущего значения уровня в нем. Для получения характеристик бака проводится специальная операция – градуировка бака.

Чем меньше порция жидкости и цена деления контрольного уровнемера, тем с большей точностью определяются характеристики бака, но при этом существенно увеличивается трудоемкость градуировки. Поэтому, как правило, бак с высокой точностью, необходимой для дозирования при заправке, градуируется в верхней части в диапазоне уровней, соответствующем рабочему диапазону доз.

На рис. 1 приведена схема дозирования с СКУ и насосным способом подачи топлива. Процесс заправки и дозирования представляет собой следующую цепочку операций.

Определяется средняя плотность топлива в емкости-хранилище Е1 по измеренной температуре. Вычисляется по известной массе дозы ее объем. После чего по характеристике бака определяется уровень, соответствующий вычисленному объему.

По команде начинается процесс заправки: при открытом клапане К1 топливо насосом Н через клапан К2 и ЗСК РН подается в бак РН. После достижения требуемого уровня в баке РН по показаниям СКУ выдается команда на закрытие клапана К2 и ЗСК РН. Насос Н выключается. Доза выдана.

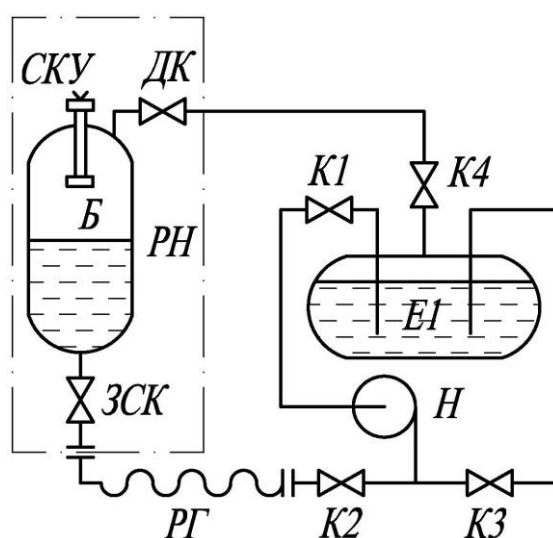


Рисунок 1 – Схема дозирования с СКУ и насосным способом подачи топлива:

Е1 – емкость-хранилище; Н – насос; РН – ракета-носитель; Б – бак РН; СКУ – системы контроля уровня; ДК – дренажный клапан; ЗСК – заправочно-сливной клапан; РГ – гибкий трубопровод; К1, К2, К3 – клапаны

Для повышения точности заправки расход перед отсечкой дозы уменьшается в несколько раз.

Внутреннее дозирование применяется при заправке больших количеств топлива, например нижних ступеней РН. В этом случае функции дозатора и бака совмещены.

1.2 Дозирование с использованием весоизмерительного устройства

При внутреннем весовом дозировании заправляемый объект помещается на платформе весоизмерительного устройства (ВУ) и подсоединяется к коммуникациям заправочного оборудования гибкими трубопроводами. Единственное изменение в функционировании заправочного оборудования при возложении на него функции дозирования состоит в том, что срабатывание отсечного клапана происходит при определенном значении выходного параметра ВУ. Процесс дозирования совмещен во времени с процессом заправки.

На рис. 2 приведена схема внутреннего весового дозирования с насосным способом подачи топлива.

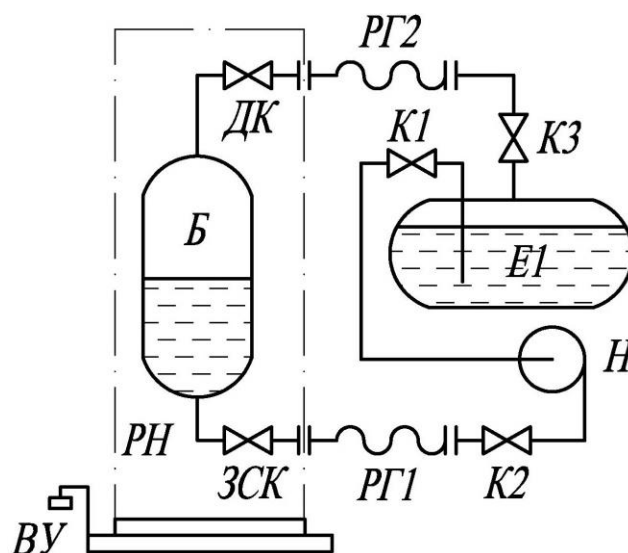


Рисунок 2 – Схема внутреннего весового дозирования с насосным способом подачи топлива:

Е1 – емкость-хранилище; Н – насос; РН – ракета-носитель; Б – бак РН; ВУ – весоизмерительное устройство; ДК – дренажный клапан; ЗСК – заправочно-сливной клапан; РГ1, РГ2 – гибкий трубопровод; K1, K2 – клапаны

Отличительной особенностью данного способа дозирования является то, что происходит прямое определение массы топлива, заправляемого в бак РН без необходимости контроля уровня.

К специфическим погрешностям способа следует отнести погрешность, возникающую из-за непостоянства веса заправляемого объекта. Она возникает по причине того, что в вес заправляемого объекта включены усилия, передаваемые на ВУ гибкими трубопроводами, связывающими заправляемый объект и коммуникации средств заправки. Эти усилия определяются весом, характером фиксации в пространстве и жесткостью гибких трубопроводов. Будучи

замеренными при порожнем баке РН, они имеют другие значения при заправке.

Внутреннее весовое дозирование применяется в основном при заправке малых количеств топлива, что позволяет разместить на весоизмерительном устройстве заправляемый объект.

1.3 Анализ способов внутреннего дозирования

Анализируя оба способа внутреннего дозирования, можно отметить их следующие положительные качества:

- оба способа дозирования позволяют совместить процесс с заправкой, сокращая тем самым время заправки;
- при дозировании используются данные о количестве топлива, находящегося в баке РН, что значительно расширяет метрологические возможности способов;
- помимо дозирования, оборудование позволяет проводить замер количества топлива в баке после процесса заправки-дозирования, что необходимо для точных расчетов траекторий.

К недостаткам способов следует отнести определенное утяжеление бортового оборудования и необходимость градуировки бака РН при использовании внутреннего объемного дозирования, а также сложность совмещения весоизмерительного устройства со стартовым оборудованием при использовании внутреннего весового дозирования.

2. Внешнее дозирование

2.1 Дозирование с применением мерной емкости

При рассматриваемом способе дозирования используются мерные емкости, которые не изменяют своих конструктивных характеристик как при их заполнении жидкостью, так и опорожнении.

Схема дозирования, в которой реализован этот способ, приведена на рис. 3.

При формировании дозы топливо вытесняется из емкости-хранилища Е1 через открытые клапаны К2 и К5 в мерную емкость МЕ. Требуемый уровень давления в мерной емкости поддерживается путем открытия/закрытия клапана К7.

Заполнение мерной емкости осуществляется, пока уровень топлива не достигнет места установки верхнего сигнализатора уровня Су2. В этот момент выдается команда на прекращение выдачи топлива в мерную емкость – клапан К5 закрывается. На этом процесс формирования дозы прекращается, и оборудование системы подготавливается для выполнения процесса заправки бака РН. Проводится заполнение заправочных коммуникаций до стыка с РН

открытием клапанов K3 и K4 со сливом топлива в сливную емкость E2. После проливки клапаны K2 и K4 закрываются.

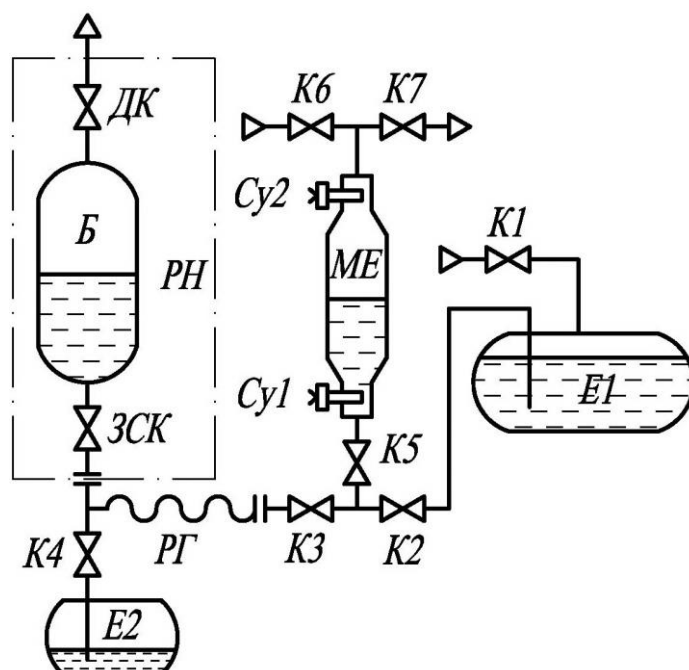


Рисунок 3 – Схема дозирования с применением мерной емкости:

E1 – емкость-хранилище; E2 – емкость сливная; РН – ракета-носитель; Б – бак РН; ДК – дренажный клапан; ЗСК – заправочно-сливной клапан; РГ – гибкий трубопровод; K1 – K7 – клапаны; МЕ – мерная емкость; Cy1, Cy2 – сигнализаторы уровня

Выдача дозы в бак РН обеспечивается вытеснением топлива из МЕ, для чего открываются клапаны K5 и ЗСК РН. Операция осуществляется до достижения уровня в месте установки Cy1, после чего выдается команда на прекращение выдачи топлива – клапаны K3, K5 и ЗСК закрываются. Доза выдана.

Таким образом, процессы дозирования и заправки протекают не одновременно, а последовательно. При этом выдаваемая в бак РН доза равна объему, заключенному в мернике между плоскостями установки сигнализаторов уровня Cy1 и Cy2.

К недостаткам способа следует отнести понижение точности дозирования при заправке переменных по величине доз, что связано с переходом от высокоточных МЕ с дискретной вместимостью к МЕ с переменной фиксируемой вместимостью, обладающих меньшей точностью. Для устранения этого недостатка при реализации способа используют две МЕ. С помощью одной из них, обладающей дискретной вместимостью, выдается постоянная часть дозы, а с помощью второй МЕ, обладающей переменной фиксируемой вместимостью, выдается меньшая часть дозы.

2.2 Дозирование с использованием весоизмерительного устройства

При таком способе дозирования формирование дозы осуществляется с помощью ВУ, на котором установлена весовая емкость определенной вместимости. Топливо сначала подается из емкости-хранилища в весовую емкость, стоящую на платформе ВУ, а из нее выдается в бак РН.

Схема дозирования, в которой реализован этот способ, приведена на рис. 4.

Топливо из емкости-хранилища Е1 через открытые клапаны К2 и К5 вытесняется в весовую емкость Е3. Требуемый уровень давления в весовой емкости поддерживается путем открытия/закрытия клапана К7.

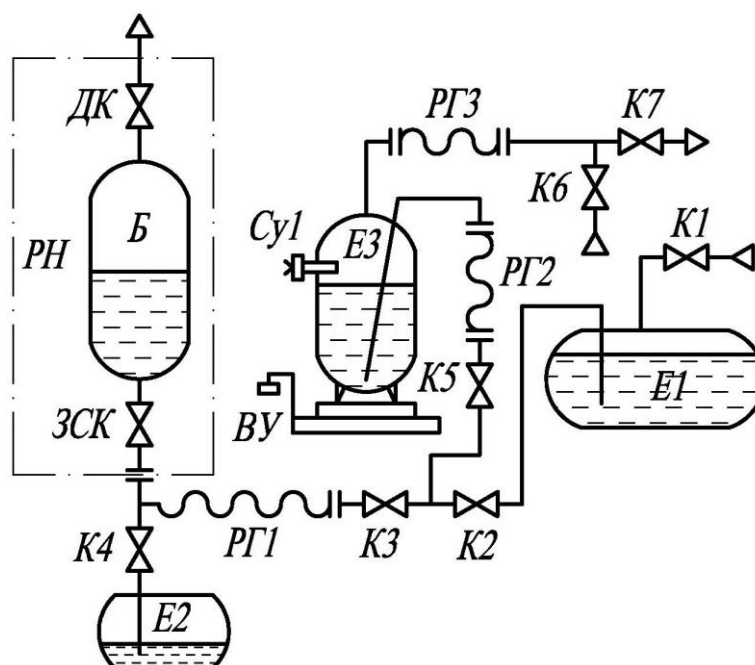


Рисунок 4 – Схема дозирования с использованием весоизмерительного устройства:

Е1 – емкость-хранилище; Е2 – сливная емкость; Е3 – весовая емкость; РН – ракета-носитель; Б – бак РН; ДК – дренажный клапан; ЗСК – запорочно-сливной клапан; РГ1, РГ2, РГ3 – гибкий трубопровод; К1 – К7 – клапаны; ВУ – весоизмерительное устройство; Су1 – сигнализатор уровня

При достижении уровнем сигнализатора уровня Су1, соответствующего максимальной вместимости емкости Е3. В этот момент выдается команда на прекращение выдачи топлива – клапан К5 закрывается. Проводится заполнение запорочных коммуникаций до стыка с РН открытием клапанов К3 и К4 со сливом топлива в сливную емкость Е2. После проливки клапаны К2 и К4 закрываются.

Перед выдачей проводится взвешивание емкости Е3 с топливом и фиксируется результирующее значение. Задается вес дозы, подлежащий заправке.

Выдача дозы в бак РН обеспечивается вытеснением топлива из емкости Е1, для чего открываются клапаны К5 и ЗСК РН. Заправка продолжается до совпадения контролируемой нагрузки на ВУ с заданным весом дозы, после чего выдается команда на прекращение выдачи топлива – клапаны К3, К5 и ЗСК закрываются. Доза выдана.

Погрешность дозирования определяется только явлениями, характеризующими этап выдачи топлива в бак РН, так как подготовительный этап никакого влияния на точность дозирования не оказывает.

При соблюдении ряда условий этот способ дозирования позволяет достичь высокой точности при практически неограниченной величине заправляемой дозы и в широком диапазоне ее изменения. К недостаткам способа следует отнести значительное время заправки, а также сложность и высокую стоимость оборудования.

2.3 Дозирование с использованием объемных расходомеров

При этом способе дозирования топливо при заправке бака РН проходит через расходомер, с помощью которого измеряется его количество.

Схема с внешним дозированием с помощью расходомера приведена на рис. 5.

Топливо из емкости Е1 через открытые клапаны К1, К2 и К3 насосом Н подается в сливную емкость для проливки заправочных коммуникаций до стыка с РН. После чего клапан К3 закрывается и открывается ЗСК РН – происходит заполнение бака РН.

Как только результат измерения расхода по РМ сравнивается с заданным значением дозы, выдается команда на прекращение заправки, по которой клапаны К2 и ЗСК РН закрываются и отключается насос Н.

При использовании данного способа дозирования практически отсутствует ограничение по величине дозы и обеспечивается непрерывная подача топлива в бак РН, что позволяет сократить время заправки.

Наряду с простотой данного способа дозирования имеется ряд погрешностей, которые могут повлиять на точность заправки бака:

- при объемном способе дозирования точность определения средней плотности жидкости вносит определенный вклад в погрешность дозирования. Зачастую замер плотности заменяется замером температуры, по которой с помощью табличных данных происходит определение плотности топлива;
- погрешность расходомера влияет на точность дозирования.

Основным источником погрешности расходомера является погрешность его тарировки. Для соблюдения метрологических характеристик расходомера их поверка зачастую осуществляется на отдельных специализированных стендах.

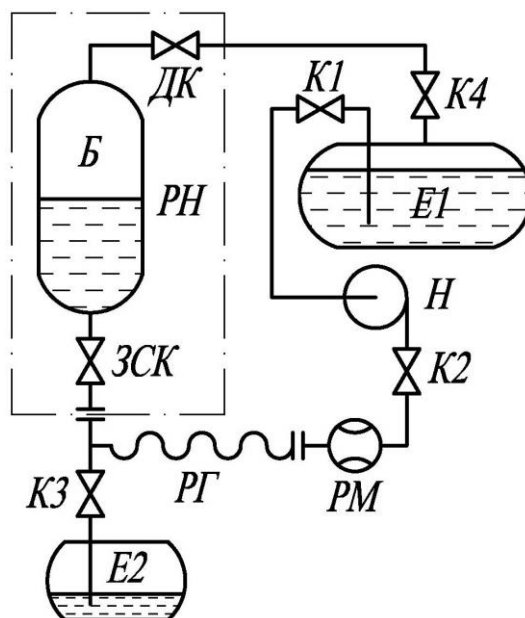


Рисунок 5 – Схема дозирования с использованием объемных расходомеров:

Е1 – емкость-хранилище; Е2 – сливная емкость; Н – насос; РН – ракетаноситель; Б – бак РН; ДК – дренажный клапан; ЗСК – заправочно-сливной клапан; РГ – гибкий трубопровод; К1 – К3 – клапаны; РМ – расходомер

При данном способе дозирования в случае невысоких требований к точности заправки состав заправочного оборудования лишь незначительно усложняется. Повышение точности дозирования достигается введением в состав системы элементов, необходимых для градуировки расходомеров перед заправкой.

2.4 Дозирование с использованием массовых расходомеров

Данный способ дозирования аналогичен способу с помощью объемных расходомеров. Единственное и коренное отличие заключается в использовании массовых расходомеров вместо объемных.

Применение массовых расходомеров исключает из погрешности дозирования составляющую, обусловленную неточностью измерения средней плотности топлива. Все остальные составляющие те же, что и при использовании объемных расходомеров.

Несмотря на то, что при использовании массовых расходомеров

уменьшается число составляющих погрешности дозирования, способ не получил широкого распространения.

В технике реализован способ внешнего весового дозирования с помощью объемного расходомера «Омега». Градуируется этот расходомер с помощью весоизмерительного устройства, т.е. постоянная расходомера представляет собой весовое количество топлива, соответствующее одному импульсу, который выдаст датчик расхода. Данный способ отличается от способа дозирования с помощью массовых расходомеров тем, что всякое изменение плотности топлива в ходе заправки ведет к погрешности дозирования. Поэтому весовая градуировка расходомера должна периодически повторяться.

2.5 Анализ способов внешнего дозирования

Способы внутреннего дозирования по сравнению со способами внешнего дозирования имеют следующие преимущества:

- в баках РН не требуется размещение специального оборудования и приборов;
- все способы (за исключением способа с использованием мерников) позволяют регулировать величины выдаваемых доз в широком диапазоне.

Недостатки внешних способов дозирования:

- формирование дозы вне бака РН обуславливает более низкую точность дозирования топлива, чем при тех же условиях обеспечивает внутреннее дозирование;
- несмотря на наличие в составе заправочного оборудования высокоточных измерительных приборов, не представляется возможным дать объективную оценку о наличии топлива в баке РН.

В настоящее время наблюдается довольно четкое ограничение областей применения каждого из рассмотренных способов. Например, дозирование с помощью мерников применяется при заправке зенитных управляемых ракет (ЗУР). Дозирование с помощью ВУ нашло применение в стационарных заправочных станциях (ЗС). Дозирование с помощью расходомеров распространено в передвижных ЗС.

3. Пути совершенствования методов дозирования топлив

При создании современных ракетно-космических комплексов основным вопросом является минимизация затрат на создание объектов наземной инфраструктуры, а также на разработку РН, которые по техническим и экономическим показателям были бы более совершенны в сравнении с передовыми мировыми аналогами.

Эта задача требует комплексного подхода и проведения всестороннего анализа по возможным вариантам построения наземных

комплексов и увязки их с разрабатываемыми РН. Процесс решения данной задачи, как правило, является весьма трудоемким, так как необходимо учитывать особенности конструктивно-компоновочного построения РН.

В этих условиях при создании разгонных блоков большой стартовой массы с широким диапазоном заправляемых доз топлив ставит перед разработчиками средств заправки весьма сложную задачу выбора способа дозирования.

В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений является внешнее дозирование топлив на базе использования массовых расходомеров, а заправку РБ осуществлять непосредственно на стартовой позиции в составе РН. При этом расположение заправочного оборудования разгонных блоков может быть совмещено со средствами заправки нижних ступеней РН [3].

Такой подход позволяет функционально совместить заправку РН на стартовой позиции без выполнения подобных работ в стационарных ЗС. Это позволяет:

- сократить технологическую цепочку операций при подготовке РН к пуску;
- исключить из состава стационарных ЗС оборудование, необходимое для заправки РБ, тем самым сократив затраты на создание ЗС;
- проводить работы по заправке/сливу топлива из РБ без присутствия обслуживающего персонала;
- выполнять работы по стыковке к РН заправочных коммуникаций в ручном режиме при отсутствии топлива в баках, а отстыковку коммуникаций от заправленной РН в автоматическом режиме;
- выполнить требования по экологической безопасности во время отстыковки заправочных коммуникаций от РН при осуществлении соответствующих технологических мероприятий.

3.1 Внешнее дозирование с использованием массового расходомера

Рассмотрим принцип внешнего дозирования с использованием массового расходомера. Схема дозирования приведена на рис. 6.

Процесс дозирования осуществляется следующим образом. Топливо из емкости Е1 через открытые клапаны К1, К2, К3, К4 и К5 насосом Н подается в сливную емкость для проливки заправочных коммуникаций до стыка с РН.

После чего происходит проверка функционирования и правильности показаний расходомера РМ. Для чего закрывается клапан К5 и открывается клапан К6. При срабатывании сигнализатора уровня

Су1 выдается команда на начало контроля показаний ВУ и расходомера РМ. Для контроля изменения уровня в емкости Е3 устанавливается уровнемер Иу. После достижения определенного уровня в емкости Е3 происходит закрытие клапана К6 и отключение насоса Н. Осуществляется сравнение показаний массы топлива поступившей в емкость Е3 по ВУ с суммарной массой топлива, прошедшего через расходомер РМ.

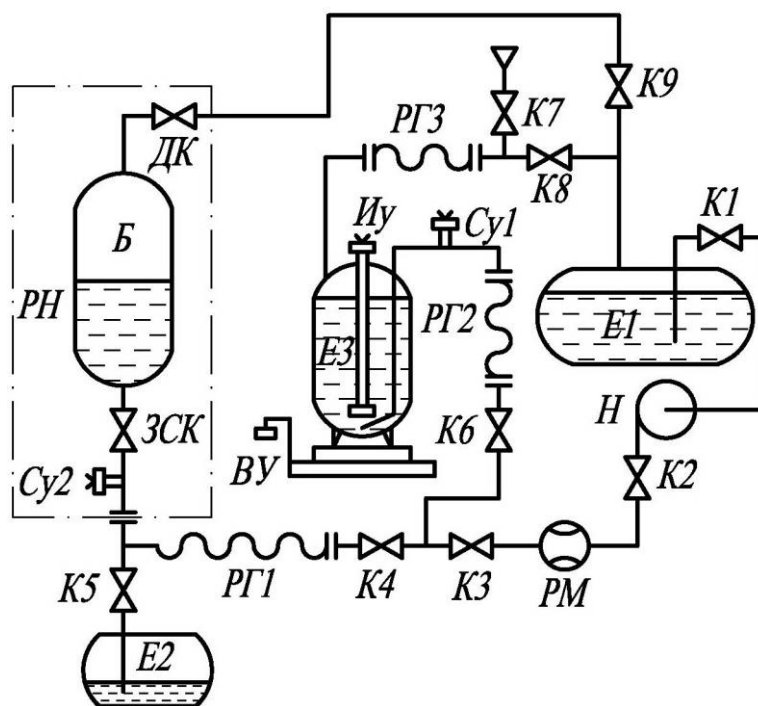


Рисунок 6 – Схема дозирования с использованием массовых расходомеров:

Е1 – емкость-хранилище; Е2 – сливная емкость; Е3 – весовая емкость; РН – ракета-носитель; Б – бак РН; ДК – дренажный клапан; 3СК – заправочно-сливной клапан; РГ1, РГ2, РГ3 – гибкий трубопровод; К1 – К8 – клапаны; ВУ – весоизмерительное устройство; Су1, Су2 – сигнализатор уровня; Н – насос; РМ – расходомер; Иу – уровнемер

После чего принимается решение о заправке бака РН. Происходит включение насоса Н и открытие 3СК РН. При срабатывании сигнализатора уровня Су2 выдается команда на начало контроля выдаваемой дозы по расходомеру РМ. При достижении показаний по РМ с требуемой величиной дозы происходит закрытие клапанов К4, 3СК РН и отключение насоса Н. Доза выдана.

В рассматриваемом варианте заправки применена комбинация из дозирования с использованием массового расходомера и дозирования с использованием ВУ. При этом весоизмерительное устройство с установленной на него емкостью Е3 используется в качестве объекта для проверки расходомера РМ перед заправкой. Для корректного

измерения массы метрологические характеристики по ВУ должны быть не хуже РМ.

В предложенной схеме дозирования могут быть использованы серийно выпускаемые массовые расходомеры. Область их применения, включая нефтехимическую отрасль, а также диапазоны измеряемых расходов весьма разнообразны. При этом точность измерения массового расхода может составлять всего $\pm 0,1\%$, погрешность измерения температуры – $\pm 1^\circ\text{C}$, а погрешность измерения плотности – $0,5 \text{ кг/м}^3$ [3].

С учетом проведенного анализа рынка серийно выпускаемых массовых расходомеров мировых производителей, а также сравнения их технических характеристик на соответствие вышеприведенным могут быть предложены расходомеры «Micro Motion» серии «ELITE».

Расходомеры позволяют проводить прямое измерение массового расхода, плотности и температуры; косвенное измерение – суммарной массы и объемного расхода. Принцип действия сенсора основан на измерении инерционной силы – силы Кориолиса, создаваемой потоком рабочей среды в трубках, совершающих колебательное движение.

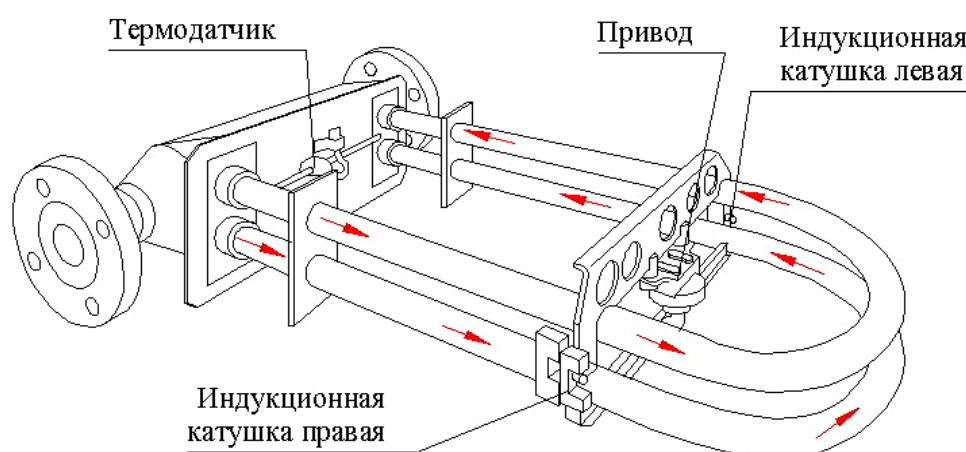


Рисунок 7 – Принцип действия массового расходомера Micro Motion

3.2 Анализ метода внешнего дозирования с использованием массового расходомера

Предложенный способ дозирования по сравнению с рассмотренными в пунктах 1 и 2 обладает следующими преимуществами:

- непрерывное измерение дозы в широком диапазоне;
- погрешность дозирования не более 0,3% от массы заправляемого топлива;
- метрологическая аттестация на месте эксплуатации;
- объективная оценка наличия топлива в баке РН;
- минимизация веса в составе ракеты;
- малые габаритно-массовые характеристики;

– унификация оборудования для заправки объектов различной вместимости.

Заключение

По результатам проведенного анализа предложено решение на базе массовых расходомеров «Micro Motion» серии «ELITE», которые обладают хорошими метрологическими характеристиками для обеспечения погрешности дозирования $\pm 0,3\%$.

Схемное построение метода дозирования позволяет осуществить проверку метрологических характеристик расходомера на месте эксплуатации с использованием весоизмерительного устройства.

Для оптимизации построения наземных комплексов РКК предложено осуществлять заправку космических ступеней в составе РН на стартовой позиции.

Список использованной литературы

1. Караштин В.М. Основы проектирования систем наземного обеспечения / В.М. Караштин, А.Г. Катков, В.В. Родченко. – М.: Изд-во МАИ, 1998. – 312 с.
2. Хлыбов В.Ф. Основы устройства и эксплуатации заправочного оборудования/В.Ф. Хлыбов. – М.: Изд-во РВСН имени Петра Великого, 2003. – 248 с.
3. Анализ способов обеспечения заправки полостей ТО 3-й ступени РКН «Циклон-4» с заданной точностью: Технический отчет Циклон-4. 21.15373.123ОТ / ГП «КБ «Южное». – 2006. – 74 с.

Поступила в редакцию 07.02.2018.

Рецензент: канд. техн. наук,

гл. науч. сотр. А.И. Логвиненко,

Государственное предприятие

«Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля»