

УДК 681.121.8

Канд. техн. наук С.А. Валивахин, С.Р. Корбанюк

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СТРУЙНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ В АГРЕГАТАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЖРД

Изложен опыт применения переключателя расходов и регулятора соотношения компонентов топлива, содержащих струйный усилитель на встречных осесимметричных струях. Приведены рекомендации по их конструированию и перспективе применения в ЖРД.

Викладено досвід застосування перемикача витрат і регулятора співвідношення компонентів палива, що містять струминний підсилювач на зустрічних вісесиметричних струменях. Наведено рекомендації щодо конструювання та перспективи застосування в РРД.

Experience is stated on the application of the flow rate switch and propellants ratio controller, which incorporate crossed axisymmetric jets fluid amplifier. Article includes recommendations on their design and future application in the LRE.

Приоритет в применении струйных элементов в агрегатах регулирования ЖРД принадлежит ГП "КБ "Южное". Именно там в 1960–1970-е гг. были проведены сначала исследовательские, а потом опытно-конструкторские работы и испытаны агрегаты регулирования с такими усилителями. Последней разработкой по этой тематике был регулятор соотношения расходов компонентов (РСК) для двигателя РД861К РН "Циклон-4".

Во всех применяемых и опробованных на ГП "КБ "Южное" агрегатах использовался струйный усилитель со встречным соударением осесимметричных струй. На основе этого усилителя были разработаны и испытаны переключатели расхода, регуляторы и стабилизаторы расхода и давления, РСК и другие агрегаты [1]. Большинство из них были изготовлены в единственных экземплярах, которые и были использованы для проведения экспериментальной проверки. Поэтому испытания только показали возможности таких агрегатов и позволили уточнить соотношения между размерами элементов струйного усилителя.

Конструктивными достоинствами струйного усилителя является отсутствие подвижных деталей и сочетание дифференциального входа с однолинейным выходом. Первое из них обеспечивает высокую надежность функционирования, а второе позволяет существенно упростить конструкцию некоторых типов регуляторов.

Функциональным достоинством струйного усилителя является возможность из-

менения коэффициента усиления в широких пределах практически без изменения габаритных размеров его деталей.

В большинстве опробованных регуляторов струйный усилитель устанавливался последовательно с усилителем типа "сопложаслонка", что позволяло резко увеличивать общий коэффициент усиления цепи регулирования и за счет этого уменьшать статическую ошибку.

К недостаткам струйного усилителя относятся:

- трудность настройки на требуемые характеристики;
- зависимость характеристик от магистрального давления;
- наличие паразитного расхода на слив;
- высокий уровень пульсаций давления на выходе.

Если первые два из перечисленных недостатков можно преодолеть введением настроечных элементов, то два последних являются неотъемлемой особенностью этого усилителя. В большинстве случаев именно они являются определяющими при решении вопроса о возможности его применения в двигателе.

Принцип действия струйного усилителя на встречных струях подробно описан в литературе [1, 2]. Здесь дадим только его краткую характеристику. Усилитель состоит из двух осесимметричных оппозитно расположенных сопел 2 и 4, установленных на входе в них жиклеров 1 и 5 и перегородки 3 с центральным отверстием, разделяю-

шей пространство между соплами на две полости: сливную А и управляющую Б. Сливная полость сообщена со входом в насос двигателя или другой полостью с низким давлением $p_{сл}$, а управляющая с давлением p_y – с потребителем. Потребителем в зависимости от схемы работы агрегата может быть регистрирующее устройство или последующий элемент системы регулирования.

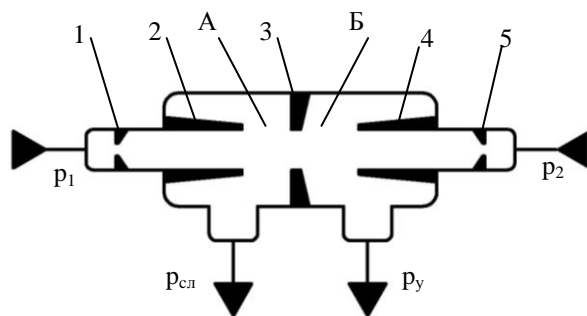


Рис. 1. Струйный усилитель:

1, 5 – жиклеры; 2, 4 – сопла; 3 – перегородка;
А – сливная полость; Б – управляющая полость

Сопло, примыкающее к сливной полости, принято называть управляющим, а примыкающее к управляющей полости – расходным. Давление p_y в управляющей полости является выходным сигналом усилителя. Оно прямо пропорционально перепаду давлений $\Delta p = p_1 - p_2$ на входе в усилитель. При изменении перепада давлений пропорционально изменяется и давление p_y с коэффициентом усиления k_y

$$k_y = \delta p_y / \delta \Delta p = \delta p_c / \delta p_{жс}, \quad (1)$$

где Δp – разность давлений на входе в усилитель;

δp_c , $\delta p_{жс}$ – перепад давлений на соплах и установленных на их входе жиклерах.

Перераспределением перепадов на соплах и жиклерах настраивают требуемый коэффициент усиления. При нулевых перепадах на жиклерах усилитель теряет аналоговые свойства и становится релейным звеном.

Фронт встречи струй, истекающих из управляющего и расходного сопел, располагается вблизи поверхности перегородки со стороны сливной полости. Исследования на прозрачных моделях [3] показали, что он представляет собой выпуклую криволиней-

ную поверхность, примыкающую своим плоским основанием к поверхности перегородки со стороны управляющего сопла, а выпуклой частью внедряющуюся через отверстие в перегородке в управляющую полость. Такое расположение достигается выбором геометрических размеров сопел и перегородки, их взаимным расположением и подбором гидравлического сопротивления установленных на входе в сопла жиклеров.

Фронт встречи струй играет роль заслонки подобно заслонке в дроссельном элементе "сопло-заслонка", а роль сопла – отверстие в перегородке. При изменении перепада давлений он смещается относительно передней плоскости перегородки. При этом изменяется гидравлическое сопротивление потоку жидкости, истекающему из управляющей полости в сливную, за счет чего и осуществляется регулирование давления в управляющей полости. Зависимость значения управляющего давления от перепада давлений на входе в настроечные жиклеры практически линейная [1, 4, 5].

Основными конструктивными характеристиками струйного усилителя являются соотношения между диаметрами сопел d_c и перегородки d_n и расстояния h между торцами сопел и перегородкой. Если диаметры сопел поддаются расчету, например, из условия требований к расходным характеристикам, то диаметр перегородки и расстояние между торцами сопел и перегородки выбираются на основании экспериментов. В литературе есть рекомендации по назначению размеров этих элементов [2], но для получения оптимальных характеристик в каждом случае требуется довольно кропотливая экспериментальная их проверка.

Большой объем экспериментальных исследований по выбору оптимальных соотношений между размерами струйного усилителя применительно к агрегатам ЖРД был выполнен В.Г. Курейчиком [1]. Им были получены соотношения между основными конструктивными характеристиками струйного усилителя. Результаты его исследований соответствовали рекомендациям, приведенным в [2]. Отличия между ни-

ми были обусловлены конкретным конструктивным исполнением усилителя, уровнем магистральных давлений, применяемой рабочей жидкостью и требованиями к характеристикам усилителя.

Из опробованных агрегатов, содержащих струйный усилитель, в ЖРД разработки ГП "КБ "Южное" применялись только струйный переключатель расхода и РСК. Первый изготавливался серийно. Второй дважды проходил этапы предварительных доводочных испытаний и испытывался в составе двигателя РД861К, но по ряду причин в серийное производство не пошел. В настоящей статье обобщен опыт применения этих агрегатов.

Струйный переключатель расхода

Переключатель расхода применялся в двигателях 15Д177 и 15Д300 в магистралях отбора горючего на систему гидроприводов (СПП), управляющих положением камер сгорания. В таких системах отбираемый расход может изменяться от минимального до максимального значений по случайному закону. В названных двигателях расход через насос горючего изменялся в диапазоне 1...2,4 кг/с, а на СПП отбирался расход 0,03...0,15 кг/с. При таком соотношении суммарного и отбираемого расходов в момент отбора горючего на СПП изменялся режим работы двигателя. Переключатель перераспределял отбираемый расход между СПП и сливом на вход в насос. Высокий градиент изменения отбираемого расхода требовал и высокого быстродействия переключателя. Струйный переключатель как нельзя кстати подходил для этих целей, так как время его переключения составляло менее 0,01с.

Основой переключателя является струйный усилитель, который в данном случае уместнее называть струйным элементом (рис. 2). Он включает в себя все элементы струйного усилителя, но расход на СПП отбирается не из управляющей камеры, а со входа в расходное сопло. Диаметры управляющего, расходного сопел и перегородки были равны соответственно 0,9, 1,4 и 1,5 мм, а расстояния от среза сопел до перегородки равны диаметру сопел.

переключение формируется самим расходом на СГП. Переключение происходит практически мгновенно, так как оно не сопровождается перемещением механических масс регулятора.

Выше указывалось, что для функционирования струйного усилителя требуется паразитный расход компонента. Этот расход составляет $\approx 30...40\%$ суммарного расхода через усилитель. За счет увеличения собственных потерь до 15 кгс/см^2 эта доля может быть снижена до 11% .

Струйный переключатель расхода представляет собой систему сопел и жиклеров, и постоянный расход через него поддерживается только при постоянном давлении на входе. При изменении давления будет изменяться и суммарный расход. Поэтому ранее принятое в документации двигателей его название "регулятор расхода" некорректно, и в этой статье он назван переключателем.

В исходных данных на проектирование переключателя должны быть заданы давление p_{num} питания СГП и диапазон отбираемых на СГП расходов (G_{min}, G_{max}). Проектный расчет переключателя базируется на следующих экспериментальных соотношениях:

- расход $G_{сл}$ на слив назначают в пределах $G_{сл} \approx 0,3G_{max}$ максимального расхода на СГП;
- минимальное управляющее давление p_y в полости между перегородкой и соплом назначают в пределах $p_y \approx (0,3-0,4)p_{num}$;
- определяют собственные потери на переключателе $\Delta p_{соб} = p_{вх} - p_{num}$;
- определяют максимальный суммарный расход через переключатель $G_{\Sigma} = G_{сл} + G_{max}$;
- назначают расход через управляющее сопло равным расходу на слив $G_{упр} = G_{сл}$;
- принимают максимальный расход через расходное сопло равным максимальному расходу на СГП $G_{расх} = G_{max}$;
- по максимальному расходу, расходу на слив и собственным потерям вычисляют площади жиклеров по линии расходного и управляющего сопел

$$f_{ж.р} = \frac{G_{max}}{\mu\sqrt{2g\gamma\Delta p_{соб}}} \text{ и } f_{ж.у} = \frac{G_{сл}}{\mu\sqrt{2g\gamma\Delta p_{соб}}}; \quad (2)$$

– определяют перепады давлений на расходном и управляющем соплах

$$\Delta p_{рп} = p_{num} - p_y \text{ и } \Delta p_{с.у} = p_{num}; \quad (3)$$

– вычисляют площади расходного и управляющего сопел

$$f_{рп} = \frac{G_{max}}{\mu\sqrt{2g\gamma\Delta p_{рп}}} \text{ и } f_{с.у} = \frac{G_{сл}}{\mu\sqrt{2g\gamma\Delta p_{с.у}}}. \quad (4)$$

Коэффициент расхода μ сопел и жиклеров при расчете необходимо принимать равным единице. Для получения такого коэффициента сопла и жиклеры выполняются с профилированным входом. У жиклеров с бескавитационным режимом истечения для этого входную кромку скругляли двумя радиусами, подобно входному участку сопел Вентури, а у струйных сопел входной участок выполняли в виде двух последовательных конусных участков с углами 30 и 15 град. Цилиндрический участок сопел на выходе имел длину $(1...1,5)d_c$.

Следует подчеркнуть, что обеспечение $\mu \approx 1$, когда живое сечение струи в выходном сечении близко к геометрическому, для сопел является обязательным условием нормальной работы струйного усилителя. При низких значениях μ в управляющей камере усилителя появляются повышенные пульсации давления, и при уровне управляющего давления $0,15...0,25\%$ от входного нарушается характеристика $p_y = f(\Delta p)$. За счет профилирования входного участка для сопел обеспечивались значения $\mu > 0,95$.

Для упомянутых выше двигателей давление за насосом в точке отбора горючего на СГП было 103 кгс/см^2 , а требуемое давление питания СГП $p_{num}=100 \text{ кгс/см}^2$, т.е. собственные потери на переключателе были 3 кгс/см^2 . За счет подбора сопротивлений сопел и жиклеров суммарный расход через регулятор на воде при изменении расхода на СГП от $0,238$ до $0,034 \text{ кг/с}$ находился в пределах $0,340 \pm 0,018 \text{ кг/с}$. Как видно, минимальные непроизводительные потери составляли $\approx 30\%$.

В процессе отработки переключателя проводились сравнительные испытания с отбором расхода на потребитель как перед расходным соплом, так и из камеры между расходным соплом и перегородкой. Предполагалось, что при отборе расхода из управляющей камеры можно будет отбирать на потребитель и часть расхода, втекающего в управляющую камеру через управляющее сопло, и за счет этого уменьшить непроизводительные расходы на слив. Эксперименты показали, что собственные потери регулятора при прочих равных условиях в этом случае увеличиваются до 25 кгс/см^2 , а при переходе с нулевого расхода на потребитель – до максимального, статическая ошибка по выходному давлению составляет 13%. Чем меньше отбирал расход на слив, тем больше была ошибка по выходному давлению. Это вызвано тем, что при изменении расхода на потребитель изменяется сопротивление не только жиклера перед расходным соплом, но и самого сопла. Выигрыш по отбираемому расходу приводит к увеличению ошибки по выходному давлению.

В процессе отработки проводились сравнительные проливки переключателя на масле АМГ и жидком аммиаке. На аммиаке проливки велись при давлении 200 кгс/см^2 и температуре $78 \text{ }^\circ\text{C}$. Результаты проливок сравнивали по разбросу суммарного расхода при постоянном давлении на входе и изменению расхода на потребитель от максимального до минимального. Если на воде разброс суммарного расхода укладывается в пределы $\pm 4\%$, то на аммиаке, который может кипеть в проточной части струйного элемента, эта цифра достигала $\pm 8\%$. Тем не менее, сравнительные испытания продемонстрировали возможность работы переключателя на этих жидкостях.

Регулятор соотношения расходов компонентов (РСК)

Достоинство чисто гидравлического РСК струйного типа – его полная автономность от других ракетных систем. На ГП "КБ "Южное" были две попытки применить РСК струйного типа: в двигателе 17Д40 для разгонного блока РН "Зенит" и

двигателе РД861К третьей ступени РН "Циклон-4". В обоих случаях его отработка не была завершена: в первом случае из-за прекращения разработки двигателя, а во втором – из-за возникших при отработке проблем, о которых будет сказано ниже. Практически весь опыт по РСК струйного типа был получен именно в этих двух случаях.

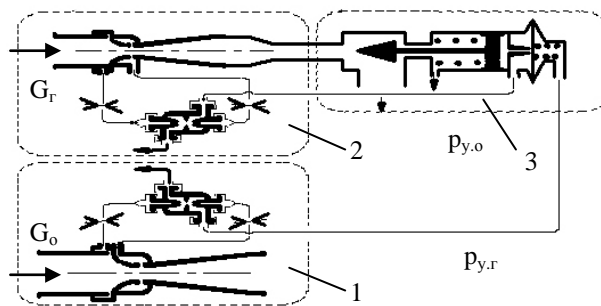


Рис. 3. Гидравлическая схема РСК:
1 – РБО; 2 – РБГ; 3 – СД

РСК состоит из расходомерного блока окислителя (РБО), расходомерного блока горючего (РБГ) и стабилизатора давления (СД). РБО и РБГ являются комбинацией сопла Вентури и струйного усилителя. Струйные усилители преобразуют перепады давлений Δp_o и Δp_r на соплах Вентури в управляющие давления $p_{y.o}$ и $p_{y.r}$ в соответствии с выражением (1), отсюда

$$p_y = k_y \Delta p, \quad (5)$$

где k_y – коэффициент усиления струйного усилителя;

Δp – перепад давлений на мерном сечении сопла Вентури.

В возможности этого преобразования заключается одно из основных достоинств струйного усилителя этого типа. Оно позволяет переходить от двухлинейных устройств к однолинейным, о чем уже говорилось выше. В случае РСК это позволило применить в СД одномембранные чувствительные элементы вместо двухмембранных, применяемых ранее в гидромеханических РСК.

Давления $p_{y.o}$ и $p_{y.r}$ сравниваются на чувствительном элементе СД – плоской стальной мембране, являющейся одновременно

заслонкой гидроусилителя типа "сопло-заслонка". Под действием разности давлений $p_{y.o} - p_{y.z}$ мембрана прогибается относительно сопла, что приводит к изменению давления на выходе из гидроусилителя "сопло-заслонка" перед исполнительным поршнем СД. Поршень вместе с дроссельной иглой перемещается, в результате изменяются гидравлическое сопротивление СД и расход через РБГ в регулируемой магистрали горючего. Процесс идет до устранения рассогласования управляющих давлений ($p_{y.o} - p_{y.z}$). Поддержание равенства этих давлений является законом регулирования РСК.

По определению коэффициент соотношения расходов

$$k_m = \frac{G_o}{G_z} = \frac{\mu_o f_o \sqrt{2g\gamma_o \Delta p_o}}{\mu_z f_z \sqrt{2g\gamma_z \Delta p_z}}, \quad (6)$$

где G , γ , f – секундный расход, плотность компонентов и площадь горловины сопел Вентури. Индексами "о" и "г" обозначены окислитель и горючее.

После преобразования с учетом выражения (5) при неизменной плотности компонентов получаем

$$k_m = \frac{\mu_o f_o \sqrt{2g\gamma_o \Delta p_o}}{\mu_z f_z \sqrt{2g\gamma_z \Delta p_z}} = k_o \sqrt{\frac{p_{y.o} k_{y.z}}{p_{y.z} k_{y.o}}}. \quad (7)$$

Номинальный коэффициент соотношения k_o обеспечивается выбором площадей проходных сечений горловин сопел Вентури. Перепады Δp_o и Δp_z на мерных сечениях сопел Вентури в опробованных РСК назначались одинаковыми, равными $10 \pm 0,2$ кгс/см², а управляющие давления $p_{y.o} = p_{y.z} = 96 \pm 0,6$ кгс/см². Значение перепадов назначили из условия допустимых собственных потерь на соплах, которые составляют $\approx 10\%$ перепадов Δp_o и Δp_z на мерных сечениях. Значение управляющего давления назначали из условия обеспечения требуемого коэффициента усиления системы в разомкнутом виде. Назначенные размеры перепадов и давления обеспечивали значение $k_y = 9,6$.

Все комплектующие элементы РСК – струйные и расходомерные сопла и жикле-

ры после изготовления проливались на воде для определения гидравлических характеристик. В соответствии с документацией перепады на мерных сечениях сопел должны были укладываться в допуск $\pm 2\%$, а расходы через струйные сопла – в допуск $\pm 4\%$. При точности измерения расхода воды 0,4% и точности измерения давлений и перепадов 0,5...1% эти требования обеспечивались без проблем.

РСК является конструктивно сложным агрегатом с длительным циклом испытаний. Особенно непростой и трудоемкой является его настройка. Первой процедурой настройки является настройка РБО и РБГ на требуемый уровень управляющих давлений $p_{y.o}$ и $p_{y.z}$. Элементами настройки являются показанные на рис.1 жиклеры 1 и 5. Конструктивно они выполнены в виде малогабаритных игольчатых дросселей. При настройке вращением иглы этого дросселя сначала устанавливается расчетный перепад давлений на дросселе управляющего сопла. Затем вращением настроечной иглы дросселя по линии расходного сопла устанавливается требуемый уровень управляющего давления. Трудность настройки заключалась в том, что амплитуда пульсаций настраиваемых давлений превышала назначенный допуск на настройку. По этой причине настройка велась на среднеинтегральные значения давлений.

В общем случае нижнее значение управляющих давлений на выходе из усилителя выбирается из условия обеспечения требований по точности РСК. Верхнее значение ограничивается условием запирания расходного сопла, т.е. случаем, когда p_y будет равным давлению p_{ex} на входе в сопло и расход через это сопло прекратится [4]. Формально условие запирания имеет вид

$$k_{y \max} = \frac{P_{ex \min}}{\Delta p_{\max} - 1}, \quad (8)$$

где $p_{ex \min}$ – минимальное давление на входе в РБ;

Δp_{\max} – максимальный перепад давления на сопле Вентури.

Второй процедурой настройки РБ был подбор перепадов давлений на настроечных жиклерах с целью исключения влияния

входных давлений на их характеристики. Процедура считалась законченной. Входное давление не влияет на настройку РБ в том случае, когда обеспечивается равенство отношения перепада на струйном сопле к перепаду на настроечном жиелере по обеим линиям усилителя. Практически задача решалась ступенчатым изменением на $\approx 0,2$ кгс/см² перепада давлений сначала на настроечном дросселе по линии управляющего, а затем по линии расходного сопел. После этого проверялось значение управляющего давления при изменении давлений на входе. Процедура считалась законченной, если при изменении входного давления на ± 20 кгс/см² управляющее давление изменялось не более чем на 0,4 кгс/см².

После настройки РБО и РБГ настраивали весь комплект РСК на требуемое значение k_m и определяли его статическую характеристику – зависимость k_m от расхода по управляющей магистрали и от значения давлений на входе в РБ. Настройка велась вращением настроечной гайки в золотнике СД.

Настроечное значение k_m на воде отличается от значения на компонентах топлива двигателя из-за разных плотностей. Так, для двигателя РД861К при значении $k_m = 2,412$ на паре компонентов "амилгептил" его значение на воде равно 1,798. Для обеспечения требуемой точности поддержания k_m на двигателе допуск на настройку должен быть уменьшен по сравнению с допуском на двигателе. В рассматриваемом случае при требуемой точности на двигателе $\pm 1\%$ допуск на настройку задавали $\pm 0,6\%$. Из-за жестких требований к точности необходимо проводить все операции по настройке и снятию характеристик РСК при реальных давлениях и расходах. Описанная выше технология испытаний была одинаковой для РСК двигателей 17Д40 и РД861К.

В двигателе 17Д40 все работы с РСК закончились проведением этапа предварительных доводочных испытаний пяти его комплектов. До того был проведен большой объем исследовательских работ, включающий детальное исследование характеристик струйных и расходомерных сопел, исследование характера течения в струй-

ном усилителе на прозрачных моделях со скоростной съемкой, определение частотных характеристик РБ и РСК в целом. При испытаниях на гидравлическом стенде РСК этого двигателя поддерживал коэффициент k_m в отработочном квадрате параметров с точностью $\pm 0,9$, а на номинальном – с точностью $\pm 0,5\%$. Для обеспечения требуемой точности измерения расходов перед каждым испытанием проверяли точность используемых для измерения турбинных датчиков расхода (ТДР) с помощью весов. При разнице показаний весов и ТДР более 0,2% проводили тарировку ТДР.

При испытаниях РБ двигателя 17Д40 на гидравлическом стенде была установлена важная особенность работы струйного усилителя – широкополосные колебания выходного давления p_y с преобладающими частотами 70...120 и 800...1000 Гц и амплитудой по суммарному сигналу 2...7% уровня управляющего давления. В результате мембрана СД, на которой сравнивались выходные давления с обоих усилителей, совершала вынужденные колебания между ограничительными упорами с частотой 10...30 Гц. Эта частота определяется соотношением частот и фаз колебаний давлений на выходе из каждого РБ. Колебания приводили к разрушению мембраны по месту приварки к корпусной детали через 1...2 мин работы. После установки в управляющую магистраль СД демпфирующего жиклера ресурс был доведен до 2 ч непрерывной работы.

После проведения предварительных доводочных испытаний работы с РСК двигателя 17Д40 были прекращены.

РСК двигателя РД861К прошел доводочные (три комплекта) и огневые испытания в составе двигателя (двенадцать комплектов). При автономных испытаниях РСК на гидравлическом стенде предельная относительная погрешность поддержания коэффициента k_m в диапазоне изменения расходов $\pm 5\%$ и входных давлений в диапазоне $\pm 7\%$ находилась в пределах $\pm 0,3\%$.

На выходе из усилителей РБ этого двигателя тоже наблюдались пульсации давления. Их частотные спектры показаны на рис. 4 и 5. Выше указывалось, что пульса-

ции мешали настройке РСК и приводили к поломке мембраны в СД.

При автономных испытаниях на гидравлическом стенде было также выявлено самопроизвольное изменение управляющего давления на выходе из струйных усилителей при последовательных испытаниях одного и того же экземпляра РБ. Первоначально причиной этого считали технологические операции с РБ, в частности, выпол-

нение герметизирующих сварных швов. Однако впоследствии было установлено, что истинной причиной является случайно возникающая погрешность измерения расхода ТДР. Она находилась в пределах допустимой предельной погрешности и поэтому не вызывала беспокойства при испытаниях агрегатов, когда допускалась погрешность до 1%.

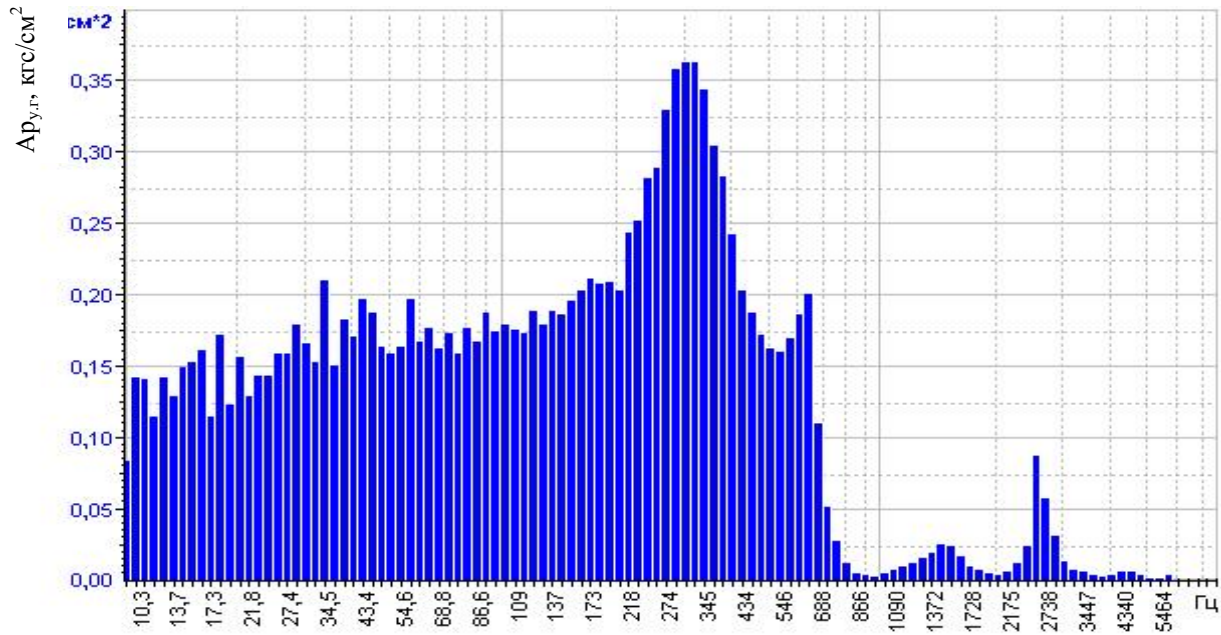


Рис. 4. Частотный спектр колебаний давления на выходе из струйного усилителя РБГ при испытаниях на гидравлическом стенде

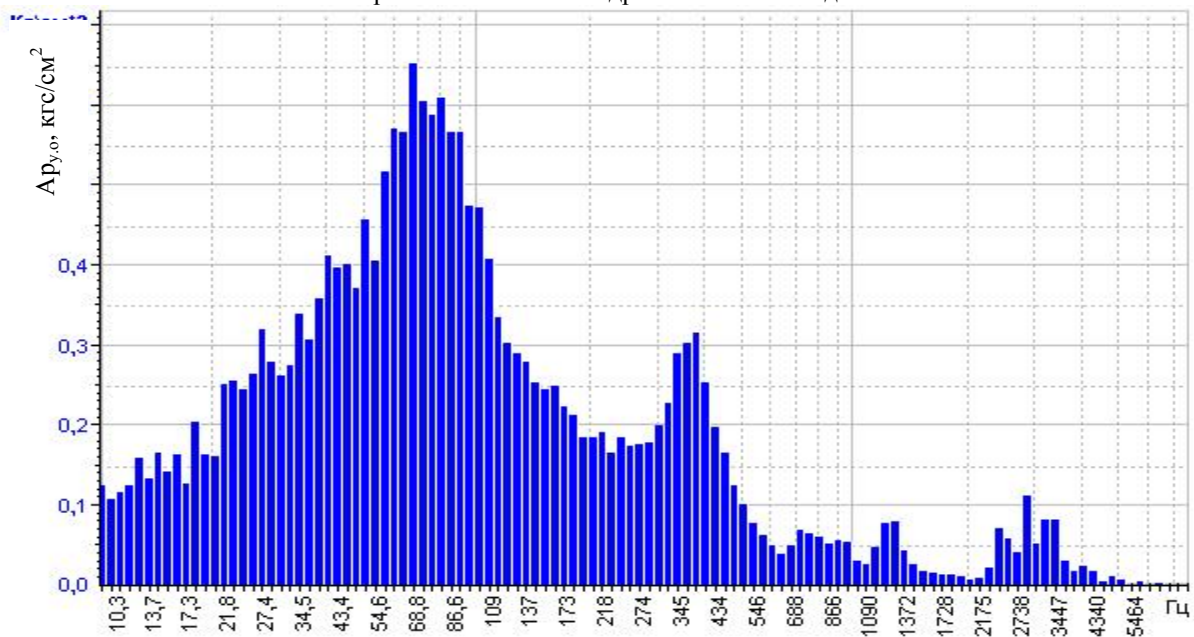


Рис. 5. Частотный спектр колебаний давления на выходе из струйного усилителя РБО при испытаниях на гидравлическом стенде

Предположительной причиной погрешности могла быть вибрация стендовых магистралей или турбулизация потока на входе в ТДР. Для исключения случаев некорректного измерения расхода в стендовую магистраль последовательно с ТДР были введены гидравлические эталоны – аттестованные расходомерные сопла Вентури. За истинное значение измеряемого расхода принимали среднее арифметическое значение расходов, измеренных ТДР и соплом. В случаях, когда разность измеряемых расходов превышала 0,5%, проводилась совместная контрольная тарировка ТДР и сопел для выяснения причины расхождений. В основном, эта разность находилась на уровне 0,2%. В результате параллельных измерений погрешность определения средневзвешенного значения расхода была уменьшена до 0,22% для РБО и до 0,37% для РБГ [6].

Основные проблемы с РСК начались при огневых испытаниях (ОИ) двигателя РД861К. Главной проблемой было несовпадение коэффициента k_m , настроенного на воде, с замеренным на двигателе. Из десяти кондиционных испытаний двигателя только на трех k_m находился в допустимых пределах $\pm 1\%$. На остальных семи настройка или выходила за пределы этого допуска, или самопроизвольно изменялась от испытания к испытанию с максимальными отклонениями до 9%.

Предполагаемые причины несовпадения замеренного значения k_m с настроенным:

1. *Погрешность измерения расхода компонентов при ОИ.* При ОИ расходы каждого компонента измеряли тремя последовательно установленными ТДР. Все они проходили аттестацию на воде, при этом предельная относительная погрешность каждого не превышала 0,4%. Из-за отличий в вязкости компонентов и воды появлялась дополнительная систематическая погрешность, в результате чего расход амила получался завышенным на $\approx 0,8\%$, а гептила – на $\approx 0,7\%$ [7]. Такая погрешность не позволяла точно определять расходы компонентов, а следовательно, и коэффициент их соотношения через двигатель.

2. *Отличие геометрии магистралей проливочных стендов и двигателя.* В условиях плотной компоновки на двигателе невозможно обеспечить геометрическое подобие магистралей и выполнить требования к длине их прямолинейных участков на входе и выходе из сопел Вентури. В результате даже при номинальных расходах воды и компонентов топлива перепады на мерных сечениях сопел Вентури могут отличаться, что приводит к изменению настройки РСК. Для стабилизации потока на входе в РБ на нескольких двигателях были установлены струевыпрямители сотового типа. Из-за ограниченного места размещения в магистралах струевыпрямители имели недостаточную длину и, по-видимому, не полностью оправдали свое назначение.

3. *Высокочастотные колебания давлений на выходе из струйных усилителей.* Эти колебания присутствовали при проливке РСК на воде и при его работе в составе двигателя. В результате среднеинтегральные величины управляющих давлений могли не соответствовать номинальным расходам компонентов. Кроме того, они могли исказить и характеристику гидроусилителя "сопло-заслонка" в СД, повлиять на баланс сил на мембране и вызвать изменение его настройки.

4. *Влияние свойств воды и компонентов на работу струйных усилителей.* Имеющиеся материалы по сравнительным проливкам не выявили большого влияния рабочей жидкости на характеристики струйного усилителя [8]. Однако пока этот вопрос детально не изучен, полностью исключить такое влияние нельзя.

Причины самопроизвольного изменения настройки от испытания к испытанию нескольких двигателях не были установлены. Одной из предполагаемых причин могло быть засорение малогабаритных настроечных дросселей в РБ. Изменения настройки случались в основном в РБО. Поэтому предполагалось, что засорение вызывали соли, остающиеся после выпаривания окислителя после предыдущего пуска. Однако обнаружить эти соли при дефектации РСК после ОИ никогда не удавалось.

Следует указать и еще одну возможную методическую причину несоответствия настройки РСК при ОИ двигателя и его автономных испытаниях. При ОИ k_m определяли по результатам измерения расходов на входе в двигатель. Предполагалось, что расходы обоих компонентов контролируются РСК. На самом деле часть расхода горючего через уплотнения по валу насоса горючего могла попадать в выхлопной коллектор турбонасосного агрегата (ТНА), минуя РБГ РСК. И хотя при автономных испытаниях насосов ТНА таких утечек не фиксировали, полностью исключать их при ОИ нельзя.

По ходу огневых испытаний двигателя в конструкцию и методику испытаний РСК вносились изменения для улучшения его работы, но добиться надежной и точной работы так и не удалось. В результате РСК был исключен из состава двигателя и заменен стабилизатором давления.

Выводы

1. Из опробованных экспериментальных конструкций, регуляторов, содержащих струйный усилитель, к применению можно рекомендовать только переключатель расходов. Он не содержит механически перемещающихся частей, обладает высоким быстродействием, и может использоваться на разных компонентах. Работоспособность переключателя подтверждена эксплуатацией в составе серийно выпускавшихся двигателей 15Д177 и 15Д300.

2. Применять РСК струйного типа во вновь разрабатываемых двигателях без изучения перечисленных выше проблем и их устранения нельзя. Его применению должно предшествовать проведение соответствующего объема научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Список использованной литературы

1. Курейчик В.Г. Исследование характеристик и особенностей конструирования агрегатов регулирования ЖРД, выполненных на агрегатах струйной техники: Дис... канд. техн. наук. – ГКБ "Южное", 1997.

2. Лебедев И.В., Трескунов С.Л., Яковенко В.С. Элементы струйной автоматики. – М.: Машиностроение, 1973.

3. Валивахин С.А., Герасимов Ю.В., Хохлов Г.Г. Течение жидкости в каналах струйного усилителя // Вестник машиностроения. – М.: 2002. – №5. – С. 19–21.

4. Валивахин С.А., Герасимов Ю.В., Курейчик В.Г., Хохлов Г.Г. Струйные элементы в агрегатах регулирования ЖРД // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – Днепропетровск: ГП "КБ "Южное", 1998. – Вып. 1–2. – С. 132–144.

5. Валивахин С.А., Герасимов Ю.В., Курейчик В.Г., Хохлов Г.Г. Струйный усилитель-преобразователь расхода // Вестник машиностроения. – 1999. – №9. – С. 25–28.

6. Оценка погрешности измерения расхода при определении гидравлических характеристик магистралей // ГП "КБ "Южное". Науч.-техн. отчет НТО 444-76/13.

7. Анализ погрешностей измерения расхода при огневых испытаниях двигателя РД861К // ГП "КБ "Южное". Науч.-техн. отчет НТО 444/1/2013.

8. Сравнение характеристик струйного усилителя-преобразователя расхода на воде и гептиле // ГП "КБ "Южное". Науч.-техн. отчет НТО 444-53/13.

Статья поступила 29.12.2014