

УДК 621.454.4

НАУЧНАЯ ШКОЛА УАИ–УГАТУ В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ МОДУЛЕМ И ВЕКТОРОМ ТЯГИ РДТТ

С. Ю. БУШУЕВ¹, А. С. БУШУЕВ², В. А. ЦЕЛИЩЕВ³, Д. В. ЦЕЛИЩЕВ⁴

¹bsyufa@mail.ru, ²bushuev.ant@gmail.com, ³pgl.ugatu@mail.ru, ⁴nuked@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 05.12.2016

Аннотация. Излагаются основные направления научной деятельности ФГБОУ ВО «УГАТУ» в области РДТТ, основанные профессорами З. Г. Шайхутдиновым и А. М. Русаком. Представлены результаты современных исследований характеристик газогенератора с системой регулирования давления посредством управления площадью критического сечения сопла. Рассмотрены результаты экспериментов по комбинированному методу управления РДТТ с изменением площади поверхности горения и площади критического сечения сопла.

Ключевые слова: ракетный двигатель твердого топлива; система управления; камера сгорания; сопло; рулевая машина.

ГЕНЕЗИС НАПРАВЛЕНИЯ

С 1967 г. в УАИ развивается научная школа в области управления модулем и вектором тяги РДТТ. Становление и развитие этой школы связано с выдающимся ученым Зайнуллой Гайфуллиновичем Шайхутдиновым. Под его руководством в институте была создана мощная экспериментальная база, организованы исследования процессов вдува и впрыска в сверхзвуковую часть сопла, различных способов воздействия на поверхность горения, включая гашение и повторный запуск [1]. Особенно активно экспериментальные и теоретические исследования велись в 1970–1990 гг. Целый ряд ученых УГАТУ (УАИ) стали кандидатами и докторами наук в области ракетных двигателей.

Исследования в области ракетных двигателей твердого топлива с регулируемой площадью поверхности горения были продолжены с 1978 г. под руководством Русака А. М. В разное время и на разных стадиях исследования принимали участие: в задаче исследования гидравлического способа регулирования поверхности горения Кривошеев И. А., Бушуев С. Ю., Алексеев Э. А.; в задаче гашения РДТТ Дегтярев А. Н., Цирельман Н. М., Мустафин Р. Р., Смородинов А. П., Стрельников Е. В.; в задаче баллистики и конструктивно-компоновочных схем Уракаев И. М., Ахмеров Р. Р., Журавлев С. А.,

Шугуров И. П.; в задаче разработки систем управления и исполнительных механизмов Целищев В. А., Месропян А. В., Арефьев К. В., Галлямов Ш. Р., Целищев Д. В., Бачурин А. Б.

В последние годы к системам автоматического управления (САУ) двигателей летательных аппаратов (ДЛА) специального назначения в РФ и за рубежом отмечен значительный интерес в части повышения разработок методологии проектирования САУ ДЛА, повышения надежности и эксплуатации.

Обзор статей российских научных журналов за период 2000–2012 гг. по исследуемой проблеме дает основание утверждать, что, по существу, как в России, так и за рубежом ощущается недостаток технических руководств по синтезу и наладке САУ ДЛА, особенно регулируемых РДТТ. Речь идет, в первую очередь, о конкретных моделях многомерных систем, позволяющих связать работу регулирующих органов с изменением регулируемых переменных.

Присутствует явный недостаток рекомендаций по определению и коррекции точности, устойчивости и управляемости электрогидравлических систем управления САУ ДЛА. Эти и другие многочисленные решения, интуитивно принимаемые наладчиками и конструкторами, нуждаются в алгоритмической и программной разработке. Актуальной остается проблема технологий полунатурных испытаний систем автоматического управления, контроля и диагности-

ки ДЛА, особенно важных на первых этапах проектирования, что позволит выявить скрытые при частичных испытаниях дефекты и осуществить полную имитацию внешних условий.

Точность прогнозирования и расчета параметров и характеристик ДЛА в настоящее время определяется, главным образом, обоснованностью конструкторских решений и методами расчета. Это обуславливает необходимость дальнейшего развития и проработки различных аспектов проблем проектирования гидромеханических устройств систем автоматического регулирования ДЛА в неразрывной связи с моделями рабочих процессов ДЛА. Использование методов адаптации, как показывает опыт промышленной эксплуатации, позволит повысить качество САУ благодаря использованию более сильных настроек регуляторов, соответствующих изменяющимся характеристикам объекта.

Научные идеи и начинания профессора Рукаса А. М. реализуются его учениками и последователями на базе учебного научного инновационного центра «Гидропневмоавтоматика» и в настоящее время. Актуальность проводимых работ подтверждается и тем, что в период с 2009 по 2014 гг. в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», при поддержке РФФИ и внебюджетных средств финансирования коллективом центра «Гидропневмоавтоматика» по тематике исследований выполнено восемь контрактов.

Ниже приведены некоторые результаты постановки и решения задач проектирования РДТТ с комбинированной системой управления модулем тяги.

Задача разработки системы автоматического управления РДТТ многократного включения: на основе исследований рабочих процессов в регулируемом РДТТ предложена новая система автоматического управления объектом исследования, разработаны основы теории проектирования струйных гидравлических рулевых машин систем управления модулем и вектором тяги РДТТ с методическим, математическим и компьютерным обеспечением.

Задача разработки методики синтеза и анализа параметров исполнительного механизма привода центрального тела сопла РДТТ: разработаны методы и средства математического моделирования струйных гидравлических рулевых машин САУ РДТТ с учетом коррекции, кавитации и влияния стохастического характера изменения параметров, направленные на повышение качества проектирования и доводки рулевых приводов со струйными гидроусилителями.

Задача разработки математической модели комбинированного РДТТ с регулированием площади поверхности горения твердого топлива и площади критического сечения сопла как объекта регулирования: разработаны основы теории расчета объекта регулирования с методическим, математическим и компьютерным обеспечением.

Задача моделирования РДТТ с глубоким регулированием модуля тяги посредством изменения площади поверхности горения твердого топлива, оснащенного электрогидравлической САУ: сформирована структура и произведен выбор рациональных значений параметров подсистем системы САУ РДТТ, позволяющие сократить время переходного процесса, уменьшить заброс регулируемого параметра, и улучшить массогабаритные характеристики подсистем РДТТ; исследовано влияние САУ на динамические характеристики РДТТ.

Задача расчета гашения РДТТ: предложена математическая модель процессов теплообмена двухфазного потока в двигателях летательных аппаратов и численная реализация алгоритма ее решения, детализировано протекание процесса испарения капель с учетом формирования в них нестационарных температурных полей в области с подвижной во времени границей и механизма массообмена капель в зависимости от температуры их поверхности.

Задача расчета повторного после гидрогашения запуска РДТТ: предложена новая схема САУ для многократного включения РДТТ, разработана модель процессов взаимодействия струй узла запуска с поверхностью заряда и стенок камеры сгорания, а также модель возникающих при этом внутрикамерных течений с использованием трехмерных уравнений газовой динамики вязкого газа.

Задача разработки средств компьютерного моделирования электрогидравлических систем управления РДТТ многократного включения: разработаны методы и средства математического моделирования САУ РДТТ с учетом влияния стохастического характера изменения параметров, направленные на повышение качества проектирования и доводки электро-гидравлических систем управления.

В результате исследований разработаны основные аспекты методологии проектирования системы управления РДТТ с комбинированной системой управления и многократным включением. Некоторые результаты исследований приведены ниже.

МОДЕЛЬ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

Модели процессов в камерах сгорания РДТТ и твердопливных газогенераторов (ТТГГ) являются основой при моделировании систем управления тягой и расходом управляемых двигательных установок. Адекватная математическая модель позволяет произвести корректный выбор параметров, обеспечивающих необходимую динамику процессов.

Полное рассмотрение внутренней баллистики камеры сгорания ТТГГ заключается в определении в каждый момент времени в каждой точке свободного объема основных параметров процесса: давления, температуры, плотности продуктов сгорания, а также скорости горения в каждой точке поверхности ТТ. Такой подход можно реализовать на базе модели трехмерного нестационарного течения газа в свободном объеме и учета нестационарного горения топлива. Для управляемых ТТГГ, в которых сопла часто расположены под углом к оси заряда или соединены с газогенератором через трубопровод, задача существенно усложняется. Поэтому часто в таких случаях используют упрощенные модели с осредненными по объему параметрами [2]. Степень адекватности результата при этом определяется сравнением с экспериментальными данными. Как правило, такое допущение не сильно искажает картину процессов.

Так, в работе [3] приведена математическая модель, описывающая процессы в камере сгорания по осредненным параметрам системой уравнений относительно пяти неизвестных $\tilde{\rho}, \tilde{p}, \tilde{V}, \tilde{U}, \tilde{T}$ без учета коволюма, в которую вошли:

- уравнение сохранения массы;
- уравнение сохранения энергии в камере сгорания;
- уравнение изменения свободного объема камеры сгорания;
- уравнение скорости горения;
- уравнение состояния.

$$\begin{aligned}
 V_k \frac{d\tilde{\rho}}{dt} &= (\rho_s - \rho)S\tilde{U} - \frac{\mu_c A_n F_* \tilde{p}}{\sqrt{RT}}; \\
 V_k \frac{d\tilde{T}\tilde{\rho}}{dt} &= (\rho_s \chi_k \gamma T_{oc} - \tilde{T}\tilde{\rho})S\tilde{U} - \\
 &\quad - \frac{\mu_c A_n F_* \tilde{p}\tilde{T}\gamma}{\sqrt{RT}}; \\
 \frac{dV_k}{dt} &= S\tilde{U}; \tilde{U} = U_1 \tilde{\rho}^{\nu}; \tilde{p} = \tilde{\rho} RT.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Для ТТГГ с управлением площадью поверхности горения требуется систему дополнить уравнением изменения поверхности горения, которое выражается в общем виде уравнением в частных производных [4]:

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial t} + \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} \cdot u_x + \frac{\partial \varphi_i}{\partial y} \cdot u_y + \frac{\partial \varphi_i}{\partial z} \cdot u_z = 0,$$

где $\varphi_i(x,y,z)$ – уравнение поверхности горения, u_x, u_y, u_z – проекции вектора скорости на соответствующие оси. Для решения данного уравнения необходимо использовать разностные методы.

В случае гидравлического способа изменения площади поверхности горения, в котором площадь поверхности изменяется за счет оголения центрального канала при сливе жидкости, перестройка поверхности происходит:

- с меньшего режима на больший (рис. 1);
- с большего режима на меньший (рис. 2).

Для варианта ТТГГ с изменением площади критического сечения сопла потребуется не только уравнение изменения площади от перемещения регулирующего элемента, но и система уравнений, описывающая работу привода регулирующего элемента.

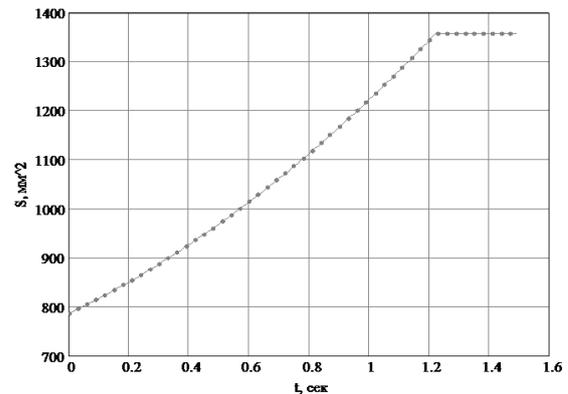


Рис. 1. Изменение площади поверхности горения при переходе с малого режима на большой

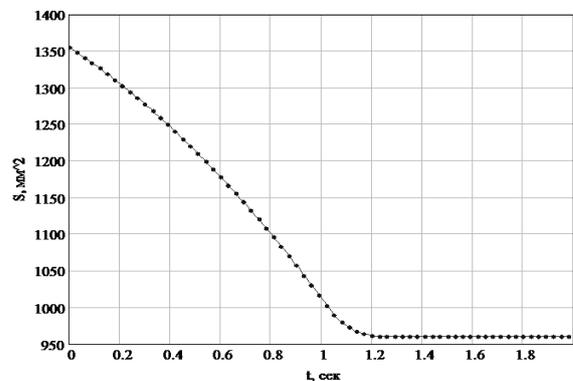


Рис. 2. Изменение площади поверхности горения при переходе с большого режима на малый

Комбинированный способ управления ТТГГ, в котором предусмотрено управление и по каналу площади поверхности и по каналу площади критического сечения сопла, требует включения в систему уравнений обоих рассмотренных выше вариантов. Управление по двум каналам существенно расширяет возможности по улучшению характеристик ТТГГ.

МОДЕЛЬ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА

Регулирование критическим сечением сопла можно осуществлять перемещением центрального тела.

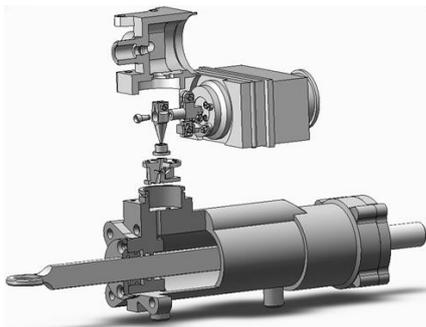


Рис. 3. Твёрдотельная модель СГРМ

В современных системах гидроавтоматики управления летательных аппаратов в качестве исполнительных механизмов применяются электрогидравлические следящие приводы, в том числе и струйные электрогидравлические рулевые машины (СГРМ).

Система дифференциальных уравнений СГРМ (рис. 3) с высоконапорным струйным гидроусилителем [5] выглядит следующим образом:

- уравнение усилителя сигнала ошибки;
- уравнение обратной связи;
- уравнение электромеханического преобразователя;
- уравнение баланса расходов;
- уравнение движения гидродвигателя.

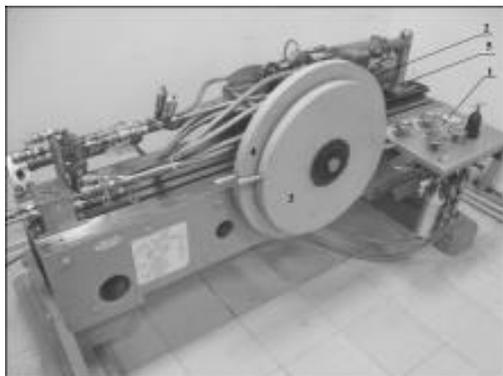


Рис. 4. Нагружающие устройства стенды испытаний СГРМ

$$\begin{aligned}
 J_{\text{ЭМП}} \frac{d^2 \alpha}{dt^2} &= K_{M1} I - K_{Ma} - b_{\text{ЭМП}} \frac{d\alpha}{dt} - C_n \alpha; \\
 R_{\text{ЭМП}} I + L \frac{dI}{dt} + K_{\text{ПЭ}} \frac{dI}{dt} &= (U_{\text{ex}} - k_{oc} p_{\text{max}}) K_U; \\
 \left(\frac{W_0 + Ay}{E_i} + C_n \right) \frac{dp_d}{dt} + A \frac{dy}{dt} &= \\
 &= \begin{cases} \frac{1}{2} \left[(1 + \bar{z}) \sqrt{1 - \frac{p_d}{\xi_{pm}}} - (1 - \bar{z}) \sqrt{1 + \frac{p_d}{\xi_{pm}}} \right], z \leq z_n; \\ \sqrt{1 - \frac{p_d}{\xi_{pm}}}, z_{\text{max}} > z > z_n, \end{cases} \quad (2) \\
 \begin{cases} M \frac{d^2 y}{dt^2} = C_c (y - y_n) - b \frac{dy_n}{dt} - R - F_{tr} \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = A p_d - b_p \frac{dy_n}{dt} - F_{tr} - C_c (y - y_n) \end{cases}
 \end{aligned}$$

Экспериментальные исследования характеристик СГРМ проводились на специализированном стенде (рис. 4), позволяющем имитировать следующие виды нагружений: постоянная нагрузка от 0 до 1862 Н·м (от 0 до 8820 Н на штоке); инерционная нагрузка до 90 кг; позиционная нагрузка от 0 до 294 Н·м/град, а также люфт в системе тяг до 3 мм.

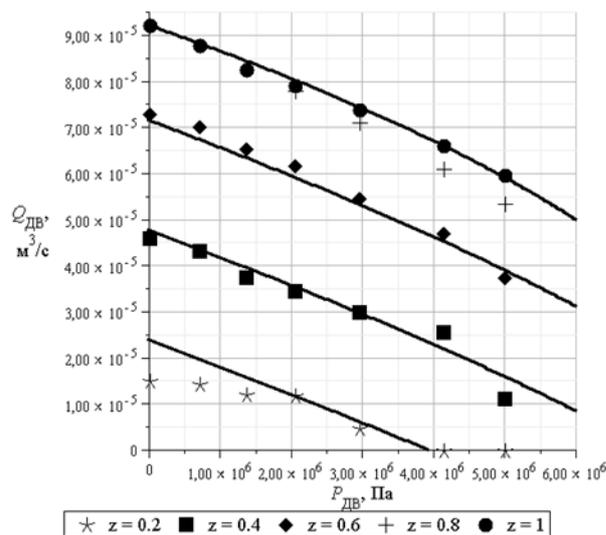


Рис. 5. Сравнение теоретической и экспериментальной расходно-перепадной характеристик СГРМ (точками показан эксперимент)

На рис. 5 представлены внутренние характеристики СГРМ, показавшие удовлетворительное отклонение расчетов менее 5%.

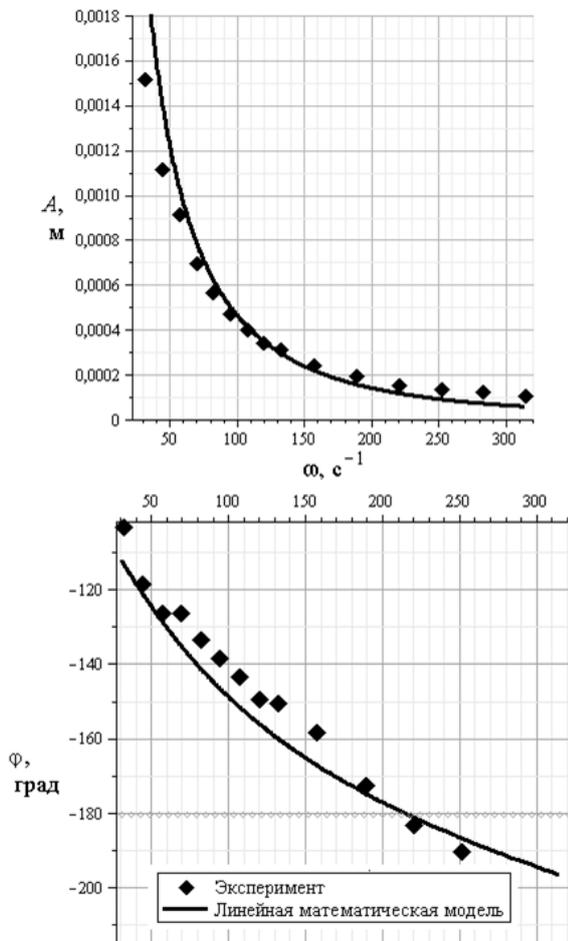


Рис. 6. Амплитудно-фазовые частотные характеристики ненагруженной СГРМ

На рис. 6 представлены в качестве примера амплитудно-фазовые частотные характеристики (АФЧХ) ненагруженной СГРМ, выявлена достаточная сходимость результатов имитационного моделирования и экспериментальных исследований. В результате численного и экспериментального исследований были получены: расходно-перепадная характеристика СГРМ, характеристика зоны нечувствительности при воздействии на исполнительный механизм позиционной нагрузки и при ее отсутствии, характеристика изменения коэффициента расхода при разных положениях струйной трубки, АФЧХ поршня СГРМ и инерционной нагрузки.

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ

Система уравнений для описания процессов в ТТГГ составляется под конкретную конструктивную схему и под заданную функцию каждого элемента. В частности, для управления газоприходом посредством изменения площади поверхности гидравлическим методом требуется задавать уравнение движения поршня в кана-

ле, и зависимость изменения площади поверхности от прогорающего свода. Для управления площадью критического сечения сопла, кроме уравнений, описывающих работу привода регулирующего элемента, требуется задать цель функционирования. Например, данная система может поддерживать постоянное давление в камере сгорания.

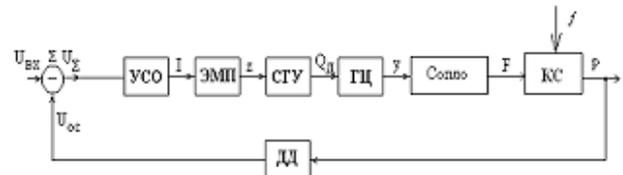


Рис. 7. Блок-схема регулятора [6]

На рис. 7 представлена функциональная схема подсистемы регулирования в камере сгорания. В ее состав входит электронный усилитель сигнала ошибки (УСО), который в общем случае может быть нелинейным, измеритель электрического сигнала рассогласования (Σ), электромеханический преобразователь (ЭМП), струйный гидроусилитель (СГУ), исполнительный гидродвигатель (ГЦ), датчик давления в камере сгорания (ДД) и объект регулирования (КС).

Математическая модель подсистемы регулирования давления в камере сгорания состоит их дифференциальных уравнений динамики камеры сгорания (1) и СГРМ (2), дополненная уравнением обратной связи. Также необходимо ввести функцию, описывающую изменение площади критического сечения сопла от перемещения центрального тела, $F_* = f(y)$. Исследования особенностей течения газа в регулируемых соплах представлено в работе [7].

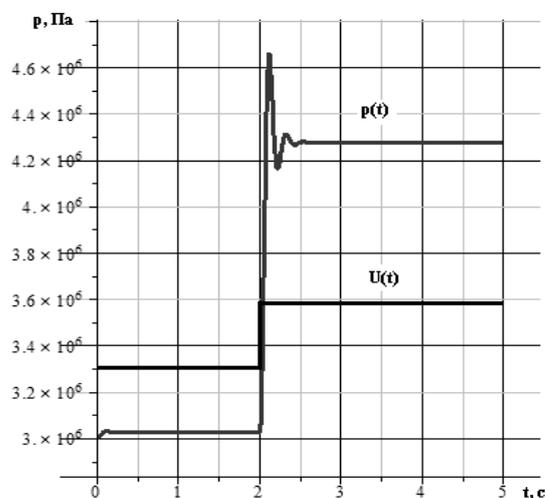


Рис. 8. Изменение давления в камере сгорания при ступенчатом изменении задающего сигнала по напряжению [6]

На рис. 8 представлен график переходных процессов в камере газогенератора при условии постоянства площади поверхности горения и дискретного изменения управляющего сигнала на СГРМ.

На рис. 9 показано, как система поддержания постоянного давления обрабатывает возмущающее воздействие в виде дискретного изменения площади поверхности горения. Система обрабатывает заброс давления увеличением площади критического сечения сопла, после чего давление понижается до заданного значения.

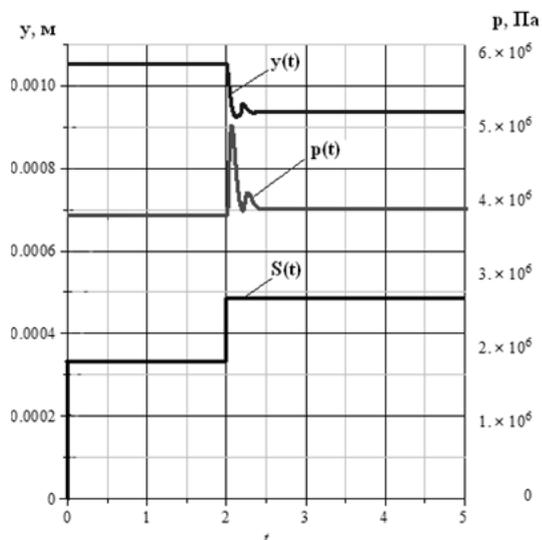


Рис. 9. Работа системы поддержания постоянного давления в камере сгорания [6]

Процесс регулирования сильно зависит от многих параметров, и в ряде случаев может отмечаться колебательный или вообще неустойчивый характер развития процесса работы ТТГГ (рис. 10).

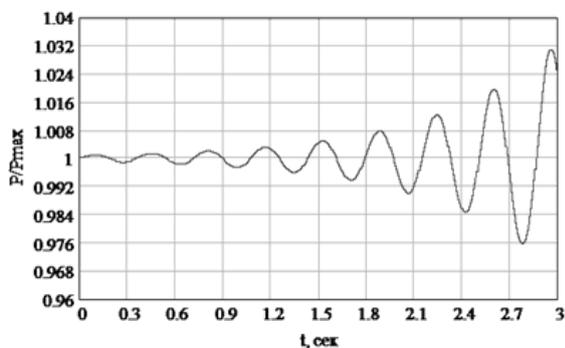


Рис. 10. Пример неустойчивой работы системы поддержания постоянного давления в камере сгорания

Систему поддержания постоянного давления в камере сгорания можно применять при комбинированной схеме управления модулем тяги РДТГ совместно с подсистемой «гидравлического» управления площадью поверхности горения заряда твердого топлива.

Поддерживая давление на максимальном значении, которое ограничивается прочностными параметрами конструкции, можно регулировать газоприход и тягу, изменением поверхности горения. Глубина регулирования газоприхода и тяги, в принципе, ограничена только длиной заряда. Максимальное значение давления в камере сгорания обеспечит наиболее короткие переходные процессы по перестройке поверхности горения с одного режима на другой.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ НА НАТУРНОЙ МОДЕЛИ

Наиболее поздние экспериментальные работы по управлению ТТГГ, проведенные под руководством А. М. Русака, были посвящены комбинированному способу. Комбинированный способ является развитием гидравлического способа, исследованного теоретически и экспериментально И. А. Кривошеевым.

Управление газоприходом производилось с помощью гидравлического способа – включение жиклера слива жидкости из канала для малого режима и включением дополнительного жиклера для перехода на большой режим.

Система управления газорасходом через сопло осуществлялась в режиме поддержания давления возле некоторого постоянного уровня. Для этого сигнал с датчика давления в камере сгорания подавался на блок управления, подающий соответствующий сигнал на СГРМ. На рис. 11 представлена схема экспериментальной установки.

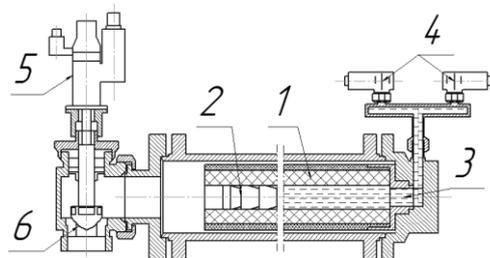


Рис. 11. Схема экспериментальной установки:

1 – заряд ТТ; 2 – поршень; 3 – жидкость;
4 – дроссели; 5 – СГРМ;
6 – центральное тело

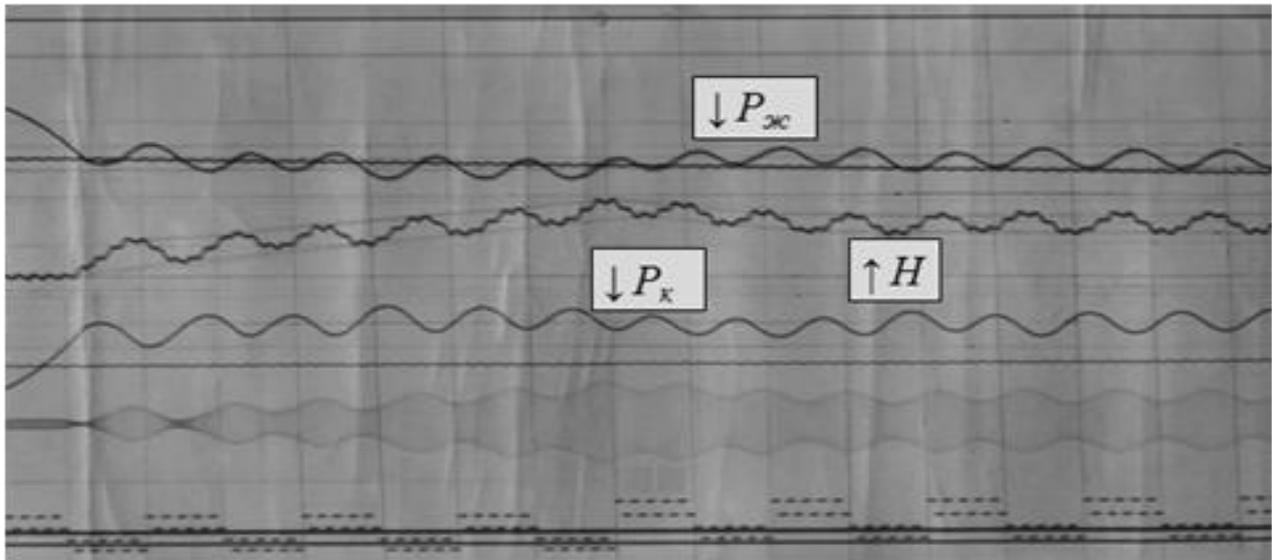


Рис. 12. Начальный фрагмент осциллограммы

На рис. 12 показан участок фотоснимка с самой осциллограммы (0,3–1 с). На нем отчетливо наблюдается колебательный характер изменения величины каждого из параметров. На рис. 14 и 15 показаны графики эксперимента в целом, полученные при оцифровке осциллограмм. Результаты экспериментов были опубликованы в [8] в осредненных значениях, для иллюстрации глубины регулирования расхода. Эти данные приведены на рис. 13 – давления в камере сгорания (P_k), давления в жидкости ($P_ж$), перемещение центрального тела (H).

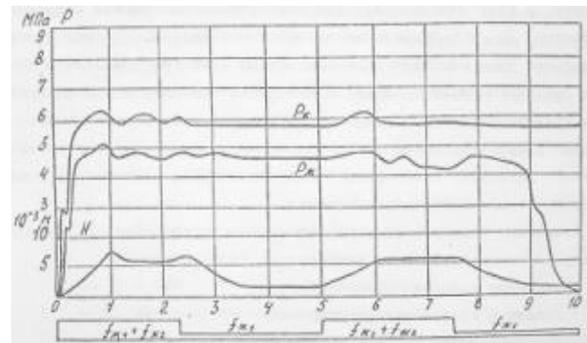


Рис. 13. Осредненные значения результатов экспериментов [2]

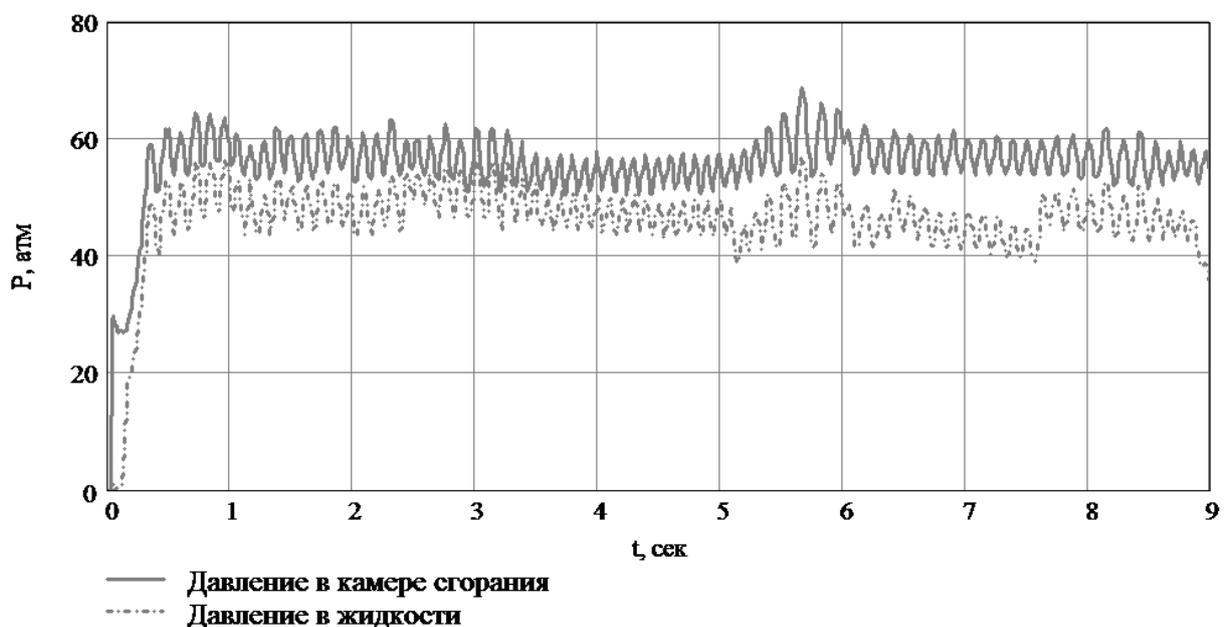


Рис. 14. Оцифрованные данные с осциллограмм (давление в КС и давление в жидкости канала ТТ)

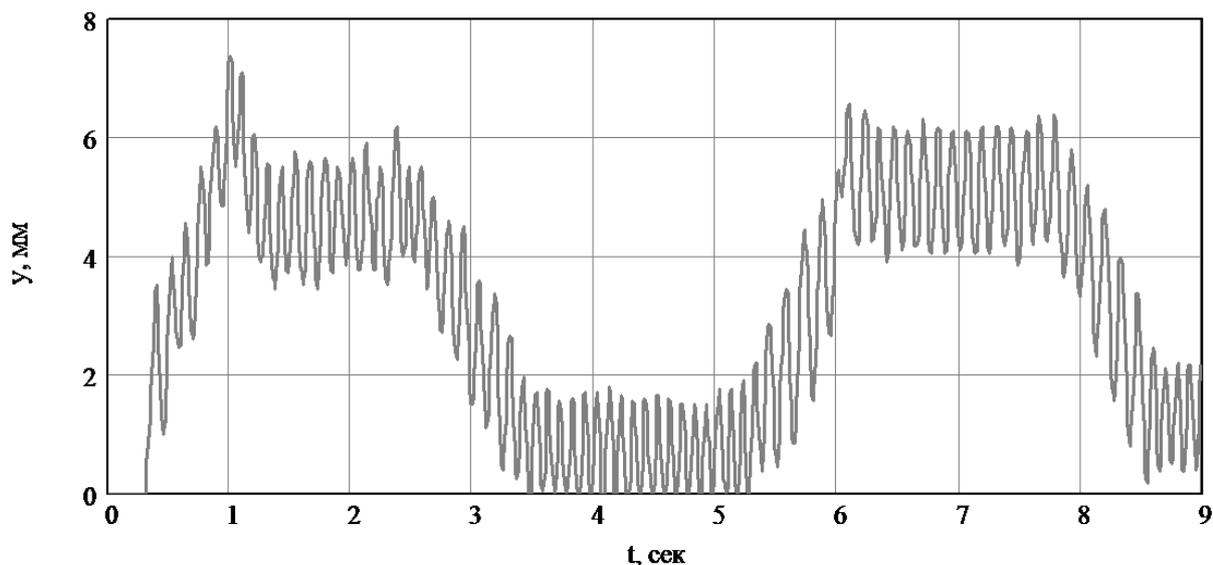


Рис. 15. Оцифрованные данные с осциллограмм (перемещение центрального тела)

Эксперимент показал возможности получения разных уровней расхода и тяги комбинированным способом управления. При этом поставили новые вопросы по исследованию динамических характеристик, совершенствованию теоретических моделей и конструктивных решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами представлены основные направления научной деятельности ФГБОУ ВО «УГАТУ» в области разработки электрогидравлических систем автоматического управления РДТТ, основанные профессорами Шайхутдиновым З. Г. и Русаком А. М. Приведены результаты современных экспериментальных и теоретических исследований исполнительных рулевых машин и характеристик газогенератора с системами управления площадью поверхности горения и регулирования давления посредством управления площадью критического сечения сопла.

Перспективы развития исследований связаны с дальнейшим совершенствованием двухканальной системой управления ДЛА (по газоприходу и газорасходу). В частности, с оптимизацией параметров процессов в газогенераторе и совершенствованием характеристик струйных рулевых машин для повышения точности, устойчивости и управляемости САУ в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Опыт разработки комбинированного РДТТ многократного включения / Кривошеев И. А. [и др.] // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 2 (47). С. 174–188. [I. A. Krivosheev, et. al., "Experience in the development of the combined SRM

with multiple engaging", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 16, no. 2 (47), pp. 174-188, 2012.]

2. Управляемые энергетические установки на твердом ракетном топливе / В. И. Петренко [и др.], М.: Машиностроение, 2003. 464 с. [V. I. Petrenko, et. al., *Controlled power plants for solid propellants*, (in Russian). М.: *Mashinostroenie*, 2003.]

3. Соркин Р. Е. Теория внутрикамерных процессов в ракетных системах на твердом топливе. М.: Наука, 1983. 288 с. [R. E. Sorokin, *The theory of intra-chamber processes in missile systems for solid fuels*, (in Russian). М.: *Nauka*, 1983.]

4. Волков Е. Б., Сырицын Т. А., Мазинг Г. Ю. Статика и динамика ракетных двигательных установок. Кн. 1. Статика М.: Машиностроение, 1978, 224 с. [E. B. Volkov, T. A. Syritsyn and G. Y. Masing, *Statics and dynamics of rocket propulsion. Book 1. Statics*, (in Russian). М.: "Mashinostroenie", 1978.]

5. Месропян А. В., Целищев В. А. Моделирование гидравлических рулевых машин / под. ред. А. В. Месропяна; Уфа: УГАТУ, 2008, 211 с. [A. V. Mesropyan and V. A. Tselishev, *Simulation of hydraulic steering gears under*. Ed. A. Mesropyan, (in Russian). Ufa: *USATU*, 2008.]

6. Бачурин А. Б. Гидроавтоматика регулируемой двигательной установки (разработка и исследование): дисс... канд. техн. наук. Уфа, 2014. 145 с. [A. B. Bachurin "Hydraulics of adjustable propulsion system (development and research)" (in Russian), thesis for the degree of Ph.D. Ufa, 2014, 145 p.]

7. Экспериментальные и теоретические исследования в регулируемых соплах с центральным телом / Целищев В. А. [и др.] // Вестник УГАТУ. 2010. Т. 14, № 5(40), С. 52–61. [V. A. Tselishev [et al.] "Experimental and theoretical studies in regulated nozzles with a central body" (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 14, no. 5 (40), pp. 52-61, 2010.]

8. РДТТ с регулируемым модулем тяги / Петренко В. И. [и др.]. Миасс: ГРЦ, 1994. 245 с. [V. I. Petrenko, et. al., "SRM with adjustable module of traction" Miass: *GRC*, 1994.]

ОБ АВТОРАХ

БУШУЕВ Сергей Юрьевич, вед. инж. ООО «ФЕСТО», дипл. инж.-мех. по специальности Авиационные двигатели (УАИ, 1978).

БУШУЕВ Антон Сергеевич, маг-т каф. прикл. гидромех. Дипл. бакалавра по гидравл. машинам (УГАТУ, 2015). Иссл. в обл. систем управления ГГТТ

ЦЕЛИЩЕВ Владимир Александрович, проф., зав. каф. прикл. гидромех. Дипл. инж.-мех. по гидравл. машинам (УАИ, 1982). Д-р техн. наук по тепловым двигателям (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. систем автоматики ЛА и двигательных установок.

ЦЕЛИЩЕВ Дмитрий Владимирович, доц. каф. прикл. гидро-мех. канд. техн. наук по гидравл. машинам (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. электрогидравл. рулевых приводов для систем упр-я летательн. аппаратами.

METADATA

Title: UAI–UGATU scientific school of module and vector thrust SRM control.

Authors: S. U. Bushuev¹, A. S. Bushuev², V. A. Tselishev³, D. V. Tselishev³

Affiliation:

¹ FESTO, Russia.

^{2,3} Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹bsyufa@mail.ru, ²bushuev.ant@gmail.com, ³vgl.ugatu@mail.ru, ⁴nuked@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 21, no. 2 (76), pp. 42-50, 2017. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The main directions of scientific researches "UGATU" in the field of solid propellant engines founded by professors Z. G. Shaikhutdinov and A.M. Rusak are considered. The results of modern researches of the gas generator characteristics with a pressure control system through the control area of the nozzle throat are discussed. The results of experiments on the combined SRM control method to change the surface area of the combustion space and the nozzle throat are observed.

Key words: Solid rocket engine fuel; control system; a combustion chamber; nozzle; steering booster.

About authors:

BUSHUEV, Sergey Iurievich, Researcher of Dept. of Applied Fluid Mechanics (UGATU, 1978-1992). Dipl. of mechanical engineer in aviation engines (UAI, 1978).

BUSHUEV, Anton Sergeyevich, Postgrad. (M.Sc.) Student, Dept. of Applied Fluid Mechanics. Bachelor of Sci. in hydraulic machines (UGATU, 2015)

TSELISHEV, Vladimir Alexandrovich, Prof., Dept. of Applied Fluid Mechanics. Dipl. of mechanical engineer in hydraulic machines (UGATU, 1982). Cand. of Tech. Sci. (UGATU, 1988), Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2000).

TSELISHEV, Dmitrij Vladimirovich, Docent, Dept. of Applied Fluid Mechanics. PhD on hydraulic machines (UGATU, 2009).