

УДК 621.4

В.П. ГУСЬКОВ, А.Ф. КИРПИКИН

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина***ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ НОВОГО СПОСОБА РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ПРИВОДНОЙ ТУРБИНЫ ДЛЯ ЖРД "РАСШИРИТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ"**

Темой статьи является оценка системы регулирования параметров ЖРД, основанной на новом способе регулирования мощности приводной турбины применительно к ЖРД "расширительной схемы" с разделными ТНА окислителя и горючего (кислорода и водорода). Этот способ предусматривает использование в качестве регулирующего воздействия давление на выходе из турбины ТНА горючего. Указанное регулирование реализуется при помощи подачи водорода от насоса горючего через регулятор давления в КС и специальное устройство ввода в поток рабочего тела (подогретого водорода) за турбину ТНА этого насоса. Этот способ позволяет существенно снизить потери давления в системе питания и повысить точность работы силовой установки в целом. Приведен анализ определяющих процесс регулирования параметров и дана оценка применимости этой системы регулирования. Определены преимущества и проблемы, связанные с применением указанного способа регулирования для ЖРД "расширительной схемы" использующего в качестве компонентов топлива кислород и водород.

кислород-водородные жидкостные ракетные двигатели, турбина, турбонасосный агрегат, регулирование, камера сгорания, регулятор, система подачи топлива

Принятые обозначения

G_T	— расход водорода через турбину;
G_H	— расход водорода через двигатель;
G_{Ox}	— расход кислорода через двигатель;
$K_m = G_{Ox} / G_H$	— коэффициент избытка окислителя;
P_c	— давление в камере сгорания ЖРД;
η_T	— коэффициент полезного действия турбины;
T_T	— температура газа на входе в турбину;
c_1	— скорость водорода (рабочего тела турбины) на выходе из соплового аппарата;
$P_{in,T}$	— давление водорода на входе в турбину;
$P_{out,T}$	— давление водорода на выходе из турбины;
P_1	— давление водорода на выходе из соплового аппарата;
χ	— показатель адиабаты процесса расширения рабочего тела на турбине;
ρ_T	— степень реактивности турбины;
u	— окружная скорость турбины в среднем сечении лопаток рабочего колеса;
$K_{Temp, in, T}$	— коэффициент влияния температуры водорода на входе в турбину на мощность турбины;
$K_{P, out, T}$	— коэффициент влияния давления на выходе из турбины на мощность турбины;
$K_{P, in, T}$	— коэффициент влияния давления на входе из турбины на мощность турбины;
$K_{u, T}$	— коэффициент влияния окружной скорости на мощность турбины;
c_x	— коэффициент теплоемкости охладителя (водорода);
$T_{out, X}$	— температура охладителя (водорода) на выходе из охлаждающего тракта;
$T_{in, X}$	— температура охладителя (водорода) на входе в охлаждающий тракт;
ΔS	— площадь боковой поверхности охлаждающего тракта КС ЖРД;
G_X	— расход охладителя (водорода) через охлаждающий тракт;
α_X	— коэффициент теплопередачи от стенки КС ЖРД в охладитель;

α_G	— коэффициент теплопередачи от газа в стенку КС ЖРД;
λ	— коэффициент теплопроводности материала стенки КС ЖРД;
Δl_W	— толщина внутренней стенки КС ЖРД;
q	— удельный тепловой поток через стенку КС ЖРД;
ΔT	— температура подогрева охладителя в охлаждающем тракте;
$K_{P, Cham, GOX}$	— коэффициент влияния G_{Ox} на давление в КС ЖРД;
$K_{P, Cham, GH}$	— коэффициент влияния G_H на давление в КС ЖРД;
$K_{P, Cham, Rm}$	— коэффициент влияния K_m на давление в КС ЖРД;
$\Delta P_{CONTR.VAL.CONV.}$	— потери давления в системе питания на регулирование давления в КС ЖРД для традиционной схемы размещения регулятора давления;
$\Delta P_{CONTR.VAL.NEW}$	— потери давления в системе питания на регулирование давления в КС ЖРД для схемы размещения регулятора давления по новой схеме;
α	— коэффициент эффективности устройства ввода водорода.

Введение

Предметом работы является оценка новой схемы регулирования параметров ЖРД "расширительной схемы" (РС), основанная на новом способе регулирования турбины [1]. Выбор применения данного способа для ЖРД "расширительной схемы" в первую очередь обусловлен тем, что для этого класса ЖРД потери давления в подводящих магистралях существенно ограничивают область их применения. Изложенный ниже подход позволяет получить оценки применимости данного способа для ЖРД других классов.

Возможная реализации системы регулирования, основанная на данном способе для ЖРД РС приведена в [2], где дано описание ЖРД комбинированной схемы регулирования, которое обсуждается ниже. Выбор класса ЖРД "расширительной схемы" как объекта для исследования применимости данного способа связано в первую очередь с требованиями, предъявляемыми к ЖРД верхних ступеней и космических буксиров тягой от 1×10^4 Н до 15×10^4 Н:

1. Достижение максимального удельного импульса для ЖРД верхних ступеней летательных аппаратов (ЛА) и орбитальных буксиров является актуальной. Для ЖРД наиболее подходящими компонентами топлива для данного случая являются жидкий кислород (ЛО) и жидкий водород (ЛН). При этом, при равной температуре и давлении в камере сгорания (КС) ЖРД

выгоднее использовать топливо с минимальным содержанием кислорода. Для каждого применения определяются соответствующие требования по K_m и P_c . Но снижение K_m и повышение P_c ограничивается располагаемыми энергетическими возможностями системы подачи топлива. Ниже, когда мы будем говорить о повышении P_c , мы будем подразумевать и снижение K_m , как еще один фактор, позволяющий увеличить удельный импульс. В настоящее время типичным является $K_m = 6,0$, хотя известны ЖРД ЛН/ЛО с $K_m = 5,7$ [3].

2. Обеспечение максимального ресурса. Для ЖРД верхних ступеней и космических буксиров стоит особенно остро, так как часто предполагается многократное использование как для перевода космических объектов с одной орбиты на другую, так и для коррекции штатных (расчетных) орбит космических ЛА. ЖРД РС являются предпочтительным, так как содержат один огневой агрегат (КС ЖРД) и имеют наиболее простые схемные решения.

3. Точность необходимых функциональных характеристик (тяги, импульса последействия). Здесь очень трудно провести какой – либо корректный анализ коротко, так как существует очень большое количество конкретных ЖРД разработанных под конкретные требования. В этих требованиях уровень точности функциональных характеристик предпола-

гался существенно различным. Однако, нет особых причин считать, что ЖРД "расширительной схемы" имеют экстремальные трудности по реализации требований к точности необходимых функциональных характеристик. Тем не менее, точность функциональных характеристик должна быть как можно более высокой и сами функциональные характеристики должны быть стабильными от запуска к запуску.

Первое и третье требования являются конкурентными, так как увеличение точности ведет к дополнительным энергетическим затратам, что, как правило, выражается в повышении потерь давления на исполнительных органах регуляторов. Это особенно критично для кислород-водородных ЖРД РС.

Имелись различные попытки увеличения давления в КС ЖРД РС. Это использование концепции ЖРД с центральным телом, размещение специального теплообменника в цилиндрической части КС ЖРД [4]. Эти концепции и усовершенствования могут быть применимы и для ЖРД РС, однако подробное рассмотрение этих решений выходит за рамки данного предложения.

Целью приведенного ниже анализа является исследование удовлетворения приведенным выше требованиям и выяснение проблем при применении указанного способа регулирования мощности приводной турбины [1] применительно к ЖРД РС [2].

В настоящее время известно четыре решения, касающихся размещения регуляторов в системе питания и регулирования ЖРД РС:

- непосредственно в подводящих магистралях водорода и кислорода [4] для регуляторов K_m и P_c ;

- установка регулятора K_m непосредственно в магистрали подачи кислорода. Регулятор P_c установлен в газовойде и осуществляет перепуск газообразного водорода в обход турбины привода турбо-насосного агрегата (ТНА) [5];

- установка регулятора P_c в трубопроводе перепуска горючего от выхода насоса горючего в его вход [6];

- установка регулятора P_c в газовойде за или перед турбиной привода ТНА. Существует два варианта реализации, которые предусматривают установку регулятора P_c как непосредственно в газовойде за турбиной ТНА, так и в магистралях перепуска водорода от входа турбины ТНА ЛН в КС ЖРД [7]. Следует отметить, что подобным путем перепуска может регулироваться K_m с использованием ТНА LO [7].

Первое решение приводит к существенным потерям давления на исполнительных органах регуляторов. При этом потери давления на регуляторе P_c , размещаемом, как правило, в магистрали подачи ЛН между насосом и входом в охлаждающий тракт КС ЖРД влияют существенно сильнее на снижение удельных характеристик ЖРД РС. Это является следствием двух факторов:

1. Подогретый в тракте охлаждения КС ЖРД поток водорода является, как правило, рабочим телом турбины (турбин) ТНА. Снижение располагаемого давления на входе в турбину, как будет показано ниже, существенно снижает ее мощность.

2. Полная энергия потока ЛН на выходе из насоса ТНА ЛН приблизительно в 3 раза превышает ее значение для потока LO на выходе из насоса ТНА LO. Поэтому, равные значения удельных потерь давления на регуляторах, расположенных в магистралях подачи ЛН за насосом ТНА ЛН оказывают более значимое влияние на снижение характеристик ЖРД РС в целом (\approx в 3 раза).

Второе решение применимо для ЖРД РС малых тяг (до 10000 Н), так как при увеличении расхода водорода габариты и вес регулятора P_c увеличиваются более быстрыми темпами. Кроме этого, как будет ясно из последующего анализа, это решение не является оптимальным для ЖРД РС.

Третье решение приводит к потерям мощности на турбине, так как насос работает на режиме с пониженным коэффициентом полезного действия [6]. Кроме этого, данное решение приводит к снижению антикавитационного запаса насоса, особенно при

использовании ЛН как горючего. Это, в свою очередь, может привести к автоколебательным процессам в ЖРД, которые инициируются и поддерживаются насосом ЛН. Особенностью этого способа является увеличение оборотов турбины ТНА при переходе на режим с пониженным P_c , что также нежелательно¹.

Четвертое решение связано с существенным увеличением габаритов и массы исполнительных органов регулятора в сравнении с соответствующими устройствами, расположенными в магистралях подачи компонента, не получившего подогрева. Следствием этого являются низкое качество динамических характеристик регулятора в целом.

1. Описание работы системы регулирования и анализ ее отдельных свойств

На рис. 1 приведена схема ЖРД РС, являющаяся по нашему мнению перспективной (смотри также [8]). Все рассуждения и выводы могут быть применимы к другим схемным решениям ЖРД РС, так как мы будем анализировать только то, что связано с ТНА водорода, регулятором P_c и газоводом вблизи ТНА водорода.

Жидкий водород поступает из бака на вход насоса ТНА ЛН (2). После насоса ТНА ЛН (2) часть ЛН подается в тракт охлаждения КС ЖРД (1), где подогревается. После тракта охлаждения КС ЖРД (1) эта часть подогретого водорода поступает на турбину ТНА ЛН (2). После турбины ТНА ЛН (2) подогретый водород поступает в КС ЖРД и, частично, на турбину ТНА LO (3). После ТНА LO (3) водород поступает в выходные каналы на сопле КС

ЖРД, где подогревается и выбрасывается в направлении, параллельном вектору тяги ЖРД. Для традиционной схемы весь водород поступает от насоса ТНА ЛН (2) в тракт охлаждения КС ЖРД (1) а регулятор давления P_c (4) устанавливается непосредственно в магистрали подачи водорода между насосом ЛН и входом в рубашку охлаждения КС ЖРД (1).

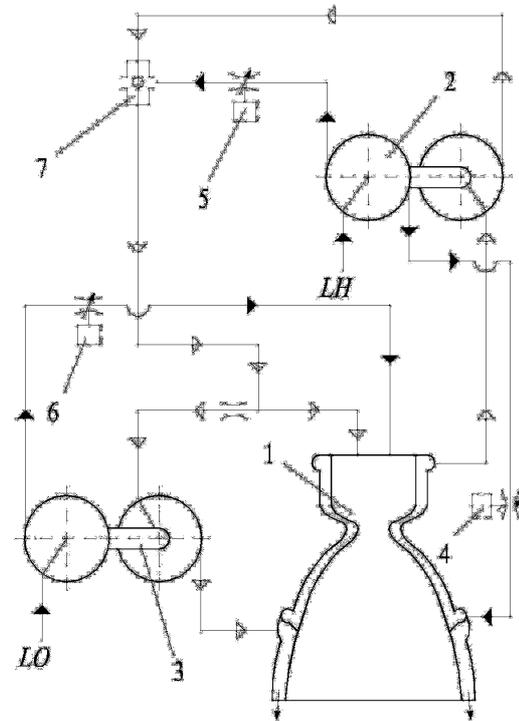


Рис. 1. Схема ЖРД РС: 1 – камера сгорания ЖРД; 2 – ТНА водорода; 3 – ТНА кислорода; 4 – регулятор давления в КС ЖРД (традиционное решение); 5 – регулятор давления в КС ЖРД (новое размещение); 6 – регулятор соотношения компонентов в КС ЖРД; 7 – устройство ввода

Как уже отмечалось, это приводит к существенным (до 50-60 бар) потерям давления на этом участке магистрали. В предлагаемом решении часть водорода отбирается непосредственно от насоса ТНА ЛН (2), подается через регулятор P_c (5) и устройство ввода (7) за турбину ТНА ЛН (2). Функцией устройства ввода (7) является увеличение давления на выходе из турбины ТНА ЛН (2) при увеличении расхода через регулятор P_c (5). Это приводит к дополнительному регулируемому воздействию на турбину ТНА ЛН (2). Располагаемый перепад давления на регуляторе P_c (5) достигает 180-200 бар.

¹ В случае применения ЛН о кавитации при давлении на входе выше чем $\approx 30 \text{ bar}$, обеспечиваемом давлением в баках и преднасосами можно говорить условно, так как ЛН находится в закритических условиях по давлению. Тем не менее, снижение плотности на входе, связанное с подводом подогретого трением водорода в насосе ЛН и эффекты генерации колебаний по этой причине проявляются в той или иной степени и в этом случае.

Регулирование K_m осуществляется традиционным способом. Окислитель от ТНА LO (3) через регулятор K_m (6) поступает в КС ЖРД.

Регулирование параметров ЖРД осуществляется следующим образом:

Вариант 1. На регулятор P_c (5) поступает сигнал о повышенном в сравнении с расчетным давлении в КС ЖРД (1). При этом гидравлическое сопротивление исполнительного элемента регулятора P_c (5) уменьшается. В результате увеличивается расход водорода в поток предварительно подогретого в рубашке КС ЖРД и отработанного на турбине ТНА LH (2) водорода. Это приводит к: повышению давления газа за турбиной ТНА LH (2) (с учетом функций устройства ввода (7)) и уменьшению расхода через рубашку охлаждения КС ЖРД и снижению располагаемой полной энергии потока водорода на входе в турбину ТНА LH (2).

Вариант 2. На регулятор P_c (5) поступает сигнал о пониженном, в сравнении с расчетным, давлении в КС ЖРД (1). В результате работы регулятора P_c (5) уменьшается расход водорода, подаваемого в поток предварительно подогретого в тракте КС ЖРД (1) и отработавшего на турбине ТНА LH (2) водорода. Результатом этих действий являются эффекты, противоположные изложенным в варианте 1.

Приведенное выше описание лишь поясняет работу системы регулирования в целом. Поэтому необходимо остановиться на отдельных вопросах анализа, связанных с оценкой влияния различных режимных параметров работы некоторых агрегатов на работу ЖРД РС в контексте предлагаемого способа регулирования.

1.1. Влияние изменения давлений на входе и выходе из турбины

Вариации давления на входе и на выходе из турбины при прочих неизменных параметрах ($\rho_T, R_T, \chi, T_{in,T}, u$) определяют вариацию мощности турбины, которая в свою очередь определяется как:

$$\delta N_T = \delta L_{Ad} + \delta G_T + \delta \eta_T. \quad (1)$$

Анализ коэффициентов влияния проводился в соответствии с [8] в предположении постоянства коэффициента реактивности турбины при определении:

— рабочего режима турбины как:

$$P_{in,T} / P_{out,T} \approx 1,4; \quad \chi \approx 1,4; \\ R_{H_2} = 4155; \quad \rho_T = 0,2.$$

— оценок параметров, влияющих на коэффициент полезного действия:

$$\eta_T \approx 0,7; \quad u / c_1 \approx 0,35; \\ n_{pu} \Delta \eta \approx 0,03 \quad \Delta (u / c_1) \approx 0,1.$$

В соответствии с проведенным анализом для типичных режимов работы турбин ТНА LH ЖРД РС коэффициенты влияния давлений на входе и на выходе из турбины составляют:

$$K_{P,inp,T} \approx 4,8994; \quad K_{P,out,T} \approx -2,855. \quad (2)$$

Данные коэффициенты сопоставимы по величине (имеют один и тот же порядок). В случае выполнения устройством ввода (7) своих функций, в том числе увеличения давления газа за турбиной при увеличении расхода водорода через регулятор P_c (5) при условии сохранения расхода водорода через турбину постоянным (или уменьшенным), легко представить следующий сценарий перенастройки силовой установки на режим с пониженным давлением P_c в КС ЖРД (1):

1. В начальный момент времени, при увеличении давления за турбиной ТНА LH, $P_{out,T}$ мощность турбины падает. При этом, в силу инерционности потока водорода, проходящего через рубашку охлаждения КС ЖРД и газовой от насоса горячего давление на входе в турбину ТНА LH $P_{in,T}$ меняется незначительно.

2. По истечению некоторого времени давление $P_{in,T}$ уменьшается, что усиливает первоначальное воздействие.

В отличие от работы по традиционной схеме регулирования, когда регулирующее воздействие осуществляется регулятором P_c (4) через инерционные звенья (тракт охлаждения КС ЖРД, газовод), мы имеем меньшую постоянную времени перенастройки двигателя при прочих неизменных условиях.

Останов ЖРД производится также с использованием регулятора P_c (5). В процессе останова ЖРД имеется возможность направить весь жидкий водород от насоса ТНА ЛН через регулятор P_c (5) и устройство ввода (7). Учитывая функции устройства ввода (7) и отсутствие взаимодействия потока водорода с инерционными звеньями (тракт охлаждения КС ЖРД, газовод) останов ЖРД будет осуществляться быстрее и, кроме этого, импульс последствия будет существенно ниже и легче прогнозируемым.

1.2. Влияние изменения расхода водорода через охлаждающий тракт

В этом случае предполагаем неизменными значения η_T , $P_{in,T}$, $P_{out,T}$, u/c_1 . Это предельный случай. Уменьшение расхода водорода через охлаждающий тракт предполагает на самом деле и уменьшение перепада давления на нем, что приводит к уменьшению давления на входе в турбину и также давлений по газовому тракту за турбиной, включая КС ЖРД. Данный случай рассматривается для того, чтобы проиллюстрировать отсутствие опасности повышения мощности турбины из-за увеличения температуры водорода перед турбиной которое, в свою очередь, является следствием уменьшения расхода водорода через тракт охлаждения КС ЖРД. Более подробно предположения и описание вывода соотношения (3) изложены в Приложении 1. Вариация мощности турбины определяется как:

$$\delta N_T = 0,327 \cdot \delta G_T - \beta_T \cdot (\delta P_{out,T} - \delta P_{in,T}) + \delta \eta_T. \quad (3)$$

То есть при уменьшении расхода подогретого в рубашке охлаждения КС ЖРД водорода, несмотря на

повышение температуры водорода перед турбиной, её мощность падает за счет расходного фактора.

1.3. Снижение потерь давления в тракте подачи водорода

Потери давления на регуляторах обусловлены в первую очередь необходимыми энергетическими затратам на восстановление расчетного режима (или на перенастройку на новый расчетный режим) за заданный промежуток времени. Нетрудно показать, что потери давления связаны со свойствами управляемого устройства (в нашем случае турбины ТНА ЛН) через коэффициенты влияния управляющих воздействий. Для традиционной схемы регулирования можно записать:

$$\Delta P_{CONTRVAL.CONV} \sim 1/K_{P,in,T}. \quad (4)$$

Для предлагаемой схемы регулирования подобное выражение имеет вид:

$$\Delta P_{CONTRVAL.NEW} \sim 1/(K_{P,in,T} + \alpha \cdot |K_{P,out,T}|), \quad (5)$$

где α определяет эффективность работы устройства ввода (7).

Тогда при $\alpha = 0,35$ (заниженная, по нашему мнению, оценка) соотношение потерь давления можно определить как:

$$\Delta P_{CONTRVAL.CONV} / \Delta P_{CONTRVAL.NEW} \approx (1/K_{P,in,T}) / [1/(K_{P,in,T} + \alpha \cdot |K_{P,out,T}|)]. \quad (6)$$

Для приведенных оценок выражение (6) соответствует $\approx 1,175$, то есть для предлагаемой схемы ожидаемые потери на управление давлением в КС ЖРД ниже на $\approx 15 \div 20\%$.

1.4. Влияние ввода дополнительного расхода водорода за турбиной на давление в КС ЖРД

В предыдущем рассмотрении мы предполагали, что устройство ввода обеспечивает повышение давления за турбиной ТНА ЛН при условиях роста массового расхода через регулятор P_c (5), уменьшении расхода водорода через турбину и, соответственно,

через КС ЖРД. Здесь мы рассмотрим наихудший вариант, когда имеет место увеличение расхода водорода через КС ЖРД. При этом мы рассматриваем наиболее жесткие условия, когда отсутствует отбор водорода для привода турбины ТНА LO, нет демпфирующего влияния газоваода и форсуночной головки КС ЖРД.

Вариация давления P_C определяется как [10]:

$$\delta P_C = K_{P, Cham, GOX} \cdot \delta G_{OX} + K_{P, Cham, GH} \cdot \delta G_H + K_{P, Cham, Rm} \cdot \delta K_m, \quad (7)$$

где:

$$K_{P, Cham, GOX} = \bar{K}_m / (\bar{K}_m + 1);$$

$$K_{P, Cham, GH} = 1 / (\bar{K}_m + 1);$$

$K_{P, Cham, Rm}$ имеет порядок $\approx 10^{-5} - 10^{-6}$, поэтому им можно пренебречь.

При $\bar{K}_m = 6$ $K_{P, Cham, GH} = 0,143$, то есть при 5% увеличении расхода водорода через КС ЖРД давление в КС ЖРД увеличится приблизительно на 0,7%. Это нежелательный результат, хотя и является малым по абсолютному значению. Для устранения этого эффекта устройство ввода (7) должно удовлетворять своему функциональному назначению, то есть обеспечивать:

- увеличение давления водорода за турбиной ТНА LH (2) при увеличении расхода через устройство ввода (7);

- уменьшение или сохранение значения суммарного расхода водорода через турбину ТНА LH (2) и устройство ввода (7) G_H при увеличении расхода через устройство ввода (7) в начальный момент времени с последующим его уменьшением через более продолжительный промежуток времени (при уменьшении расхода через устройство ввода (7) эффект должен быть противоположным). Условие сохранения или уменьшения G_H в начальный момент времени является функцией устройства ввода (7). Последующее уменьшение расхода через продолжительный интервал времени происходит само по себе.

Заключение

Приведенный выше анализ показывает преимущества и работоспособность нового способа регулирования. Однако не нужно забывать, что приведенный анализ является весьма приближенным с точки зрения оценки динамики ЖРД. Поэтому, для определения динамических свойств системы регулирования необходимы дополнительные исследования:

1. Не ясно место расположения и конфигурация устройства ввода водорода от насоса LH в поток газа за турбиной ТНА LH. Это ключевой вопрос, определяющий эффективность системы регулирования в целом. На рис.2 приведены возможные места установки этого устройства. Направления подаваемых потоков не указано, так как они должны быть определены в результате исследований.

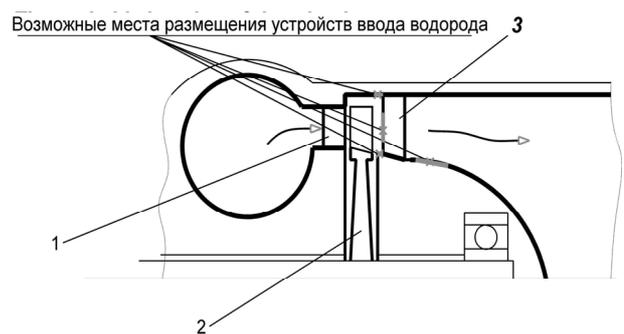


Рис. 2 Возможные места размещения устройства ввода: 1 – сопловой аппарат турбины ТНА подачи водорода; 2 – турбина ТНА водорода; 3 – спрямляющий аппарат турбины

2. Исследование динамики охлаждающего тракта. В ЖРД РС он выполняет функции газогенератора. При этом появляются проблемы выбора оптимальной конфигурации охлаждающего тракта, генерации пространственных колебаний давления в охлаждающем тракте и исследование демпфирующих свойств завесы при охлаждении внутренней стенки КС.

3. В предыдущем рассмотрении мы практически не касались вопросов, связанных с регулированием соотношения компонентов в КС ЖРД для рассматриваемой схемы ЖРД РС. Мы только определили

требования к устройству ввода водорода в поток рабочего тела турбины (газообразного водорода) за турбиной, в частности, необходимость уменьшения или сохранения значения суммарного расхода водорода при необходимом увеличении давления за турбиной. Однако, в случае невыполнения этого требования контур регулирования соотношения компонентов и совместная работа регуляторов давления и соотношения компонентов в КС ЖРД нуждаются в отдельном исследовании.

4. На основании динамических моделей соответствующих контуров управления необходимо выработать требования и разработать конструкцию соответствующих регуляторов (в первую очередь, регулятор P_c). При этом, вероятно, необходимо исследование модели всего ЖРД с учетом полученных нелинейных характеристик тракта охлаждения и устройства ввода.

Приложение 1. Влияние изменения расхода охладителя через охлаждающий тракт КС ЖРД на мощность турбины

В действительности, определение влияния расхода охладителя через охлаждающий тракт является сложной задачей по следующим причинам:

- теплообмен при регенеративном охлаждении является сопряженной задачей теплопередачи, то есть при изменении расхода охладителя величина удельного конвективного теплового потока и температуры поверхностей теплообмена изменяются;
- изменяются свойства охладителя (водорода) в зависимости от его температуры и давления;
- параметры теплопередачи и геометрические характеристики КС ЖРД, влияющие на теплообмен, существенно изменяются по ее длине.

Здесь делается приближенная оценка коэффициента влияния без учета приведенного выше.

Оценка влияния подогрева охладителя в охлаждающем тракте определяется по известной зависимости для участка площадью ΔS [11]:

$$\Delta T = T_{out, X} - T_{in, X} = \frac{1}{G_X \cdot c_X} \cdot q \cdot \Delta S. \quad (8)$$

Таким образом, можно записать:

$$T_{out, X} = \frac{1}{G_X \cdot c_X} \cdot q \cdot \Delta S + T_{in, X}. \quad (9)$$

Производная по интересующему параметру определяется как:

$$\begin{aligned} \frac{d T_{out, X}}{d G_X} &= \frac{d}{d G_X} \left(\frac{1}{G_X \cdot c_X} \right) \cdot q \cdot \Delta S + \\ &+ \frac{d}{d G_X} (q) \cdot \Delta S \cdot \frac{1}{G_X \cdot c_X}. \end{aligned} \quad (10)$$

При выводе значения для коэффициента влияния были сделаны следующие предположения и допущения:

- выражение для теплового потока определялось как:

$$q = \frac{(T_e - T_X)}{\frac{1}{\alpha_G} + \left(\frac{\Delta l_W}{\lambda} \right)_W + \frac{1}{\alpha_X}}$$

и предполагалось, что $q = f(\alpha_X)$, а

$$\alpha_X \approx \alpha_{X_0} \cdot \left(\frac{G_X}{G_{X_0}} \right)^{0,7}, \text{ где } \alpha_{X_0} \text{ и } G_{X_0} \text{ — значения}$$

коэффициента теплопередачи от стенки в охладитель и расхода охладителя на расчетном режиме;

- на расчетном режиме предполагалась $T_{out, X} \approx 300K$; $T_{in, X} \approx 40K$;

- эффективная температура пограничного слоя потока газа в КС ЖРД $T_e \approx 1000K$, температура стенки со стороны потока газа $T_{W, G} \approx 700K$, температура стенки со стороны охладителя $T_{W, X} \approx 400K$, температура охладителя $T_X \approx 100K$.

После соответствующих преобразований и подстановки численных значений имеем:

$$\delta T_{out, X} \approx -0,673 \cdot \delta G_X. \quad (11)$$

Вариация мощности турбины в общем случае определяется как [9]:

$$\delta N_T = \delta L_{Ad} + \delta G_T + \delta \eta \quad (12)$$

Вариация удельной адиабатной работы турбины определяется как [9]:

$$\delta L_{Ad} = 2 \cdot \delta c_1 = \delta T_T - \beta_T \cdot (\delta P_{out,T} - \delta P_{in,T}), \quad (13)$$

где:

$$\beta_T = \frac{(\chi-1) \cdot (P_{out,T} / P_{in,T})^\chi}{\chi \cdot [1 - (P_{out,T} / P_{in,T})^\chi]} \quad (14)$$

Используя (A1.4), (A1.5), (A1.6) и принимая во внимание, что

$$\delta T_{out,X} = \delta T_T \text{ и } \delta G_X = \delta G_T$$

имеем:

$$\delta N_T = 0,327 \cdot \delta G_T - \beta_T \cdot (\delta P_{out,T} - \delta P_{in,T}) + \delta \eta_T \quad (15)$$

Литература

1. Способ регулирования мощности приводной турбины / А.Ф. Кирпикин, В.П. Гуськов. – Патент SU 1626755A1 F 01 D 17/00.
2. Жидкостный ракетный двигатель на криогенных компонентах / А.Ф. Кирпикин; – Патент RU 202477 C1 5 F 02 K 9/48.
3. Current Status and Future Prospects of Rocket Propellants / Nobuyuki Yatsuyanagi // J. Fuel Soc. Jap. – 1987. – No. 6. – P. 411-417.
4. The Study of High Pressure Expander Cycle with Advanced Concept Combustion Chamber / N. Tanatsugu, K. Suzuki // Acta astronautica. – 1986. – 13, No. 1. – P. 1-7.

5. Hot Fire Ignition Test With Densified Liquid Hydrogen Using a RL10B-2 Cryogenic H_2/O_2 Rocket Engine / Nancy B. McNelis, Mark S. Haberbush // NASA Technical Memorandum 107470 AIAA-97-2688.

6. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей / Б.В. Овсянников, Б.И. Боровский – М.: Машиностроение, 1986. – 376 с.

7. Cryogenic Upper Stage Bed Engine / R. Pauckert, A. Zachary, E. DeGaetano, R. Sutton // AIAA Pap., – 1985. – N 1339. – P. 1-10.

8. Review of turbopump cycles for upper stage cryogenic engine / B. Kanaka Raju, N.K. Gupta, C.V.R. Pillai, E.V.S. Namboodiri // Indian J. Cryog. – 1985. – 10, No. 3. – P. 167-172.

9. Автоматическое регулирование жидкостных ракетных двигателей / Б.Ф. Гликман. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.

10. Статика и динамика ракетных двигательных установок / Е.Б. Волков, Т.А. Сырицин, Г.Ю. Мазинг. – М.: Машиностроение, 1978. – 224 с.

11. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей / А.П. Васильев, В.М. Кудрявцев, В.А. Кузнецов, В.Д. Курпатенков, А.М. Обельницкий, В.М. Поляев, Б.Я. Полуян. – М.; Высш. шк., 1983. – 703 с.

Поступила в редакцию 1.04.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.