

УДК 621.454.3

Канд. техн. наук Н.П. Ушкин, В.Г. Мороз, М.В. Тихая

## МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТНОЙ ОЦЕНКИ РАСХОДНО-ТЯГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАРШЕВОГО РДТТ ПОСЛЕ ОТДЕЛЕНИЯ СТУПЕНИ

*Рассмотрены и оценены факторы, влияющие на величину и характер изменения расходно-тяговых характеристик РДТТ после отделения ступени (на участке глубокого спада). Показано, что изменение тяги на глубоком спаде определяется двумя основными процессами: догоранием в течение первых 3–5 с остатков заряда твердого топлива и массоприходом продуктов деструкции внутреннего теплозащитного покрытия в течение последующих нескольких десятков секунд. Предложены зависимости для проектной оценки внутрибаллистических и расходно-тяговых характеристик РДТТ.*

*Розглянуто й оцінено фактори, які впливають на величину і характер змінювання витратно-тягових характеристик РДТП після відокремлення ступеня (на ділянці глибокого спаду). Показано, що зміну тяги на глибокому спаді визначають двома головними процесами: догоранням протягом перших 3–5 с залишків заряду твердого палива та масоприходом продуктів деструкції внутрішнього теплозахисного покриття протягом наступних кількох десятків секунд. Запропоновано залежності для проектного оцінювання внутрішньобалістичних і витратно-тягових характеристик РДТП.*

*The factors are considered that have an impact on the value and behavior of SRM flow rate and thrust characteristics after stage separation (in the leg of deep decay). It is shown that thrust behavior in the leg of deep decay is determined by two main processes: afterburning of solid propellant charge residues within the first 3-5 s and mass input of internal thermal protection coating destruction products within the following several tenths of second. The dependences are proposed for design evaluation of SRM intra-ballistic and flow rate/thrust characteristics.*

### Введение

Диаграмму работы РДТТ можно разделить на ряд участков с характерным изменением внутрибаллистических (ВБХ) и расходно-тяговых характеристик (РТХ): выход на режим, установившийся (основной) режим, участок спада. После завершения участка спада происходит разделение (отделение) ступеней.

Однако работа двигателя продолжается и после отделения ступени за счет догорания остатков заряда и разложения теплозащитного покрытия (ТЗП), при этом создается некоторый импульс тяги. Данный период работы РДТТ получил название глубокого спада. Определение значения этого импульса тяги является необходимым при баллистическом расчете ракеты для предотвращения соударения ступеней при разделении, расчете районов падения отделяемых маршевых ступеней либо полете ракеты в атмосфере с неотделяемой мар-

шевой ступенью (оперативно-тактические ракеты).

В связи с этим актуальной практической задачей является изучение внутрикамерных процессов на участке глубокого спада и разработка методологии проектной оценки возмущающих тяговых усилий.

### Физическая картина внутрикамерных процессов на участке глубокого спада

Полное время работы маршевого РДТТ определяется как время от момента появления тяги до достижения давления в камере  $P_k=2...3$  кгс/см<sup>2</sup> на участке спада в конце работы двигателя. В этот момент в камере находятся остатки заряда твердого топлива, продукты его сгорания и продукты разложения внутреннего ТЗП корпуса. Расходно-тяговые характеристики двигателя на участке глубокого спада определяются истечением через сопло смеси продуктов сгорания остатков топлива и газообразных продуктов разложения ТЗП [1].

На момент окончания работы двигателя ( $P_k=2...3$  кгс/см<sup>2</sup>) массовая доля продуктов

разложения ТЗП во внутрикамерном газе на основании проведенных расчетов составляет 20–30% и по мере догорания остатков топлива (3–5 с в зависимости от конструкции заряда) возрастает до 100%. Далее РТХ определяются истечением только продуктов разложения ТЗП, а характер и длительность этого процесса зависит от целого ряда факторов (характеристики внутреннего ТЗП, теплового режима конструкции, параметров внешней среды и др.).

### Математическое описание внутрикамерных процессов на участке глубокого спада

С учетом представленной физической картины внутрикамерных процессов период глубокого спада можно разбить на две стадии:

– совместное истечение продуктов сгорания остатков топлива и продуктов разложения ТЗП. При этом суммарный газоприход  $\dot{m}_c$  (и соответственно расход через сопло) можно представить в виде суммы газоприхода от догорающих остатков твердого топлива  $\dot{m}_T$  и газоприхода продуктов разложения внутреннего ТЗП  $\dot{m}_{ТЗП}$ :

$$\dot{m}_c = \dot{m}_T + \dot{m}_{ТЗП}; \quad (1)$$

– газоприход и расход через сопло только продуктов деструкции ТЗП после выгорания остатков заряда ( $\dot{m}_T = 0$ )

$$\dot{m}_c = \dot{m}_{ТЗП}. \quad (2)$$

В общей постановке РТХ на участке глубокого спада определяются на основе решения сопряженной задачи внутренней баллистики и теплового расчета [1]. В настоящей статье предлагается упрощенная модель для оценки параметров РДТТ на этом участке.

На основе уравнения баланса массы газа, находящегося в камере сгорания,

$$\frac{dM}{dt} = \dot{m}_T + \dot{m}_{ТЗП} - \dot{m}_c \quad (3)$$

система уравнений внутренней баллистики может быть записана следующим образом:

$$\frac{V}{RT} \frac{dp}{dt} = \rho_T S_T u + g S_{ТЗП} - ApF; \quad (4)$$

$$\dot{m}_T = \rho_T u S_T; \quad (5)$$

$$\dot{m}_{ТЗП} = g S_{ТЗП}; \quad (6)$$

$$\dot{m}_c = ApF; \quad (7)$$

$$\frac{dV}{dt} = u S_T; \quad (8)$$

$$\frac{de}{dt} = u; \quad (9)$$

$$A = \frac{1}{\beta}; \quad (10)$$

$$u = u_1 p^v; \quad (11)$$

$$R_n = \dot{m}_c I_{уд.n}, \quad (12)$$

где  $\dot{m}_T$ ,  $\dot{m}_{ТЗП}$  – приход в камеру продуктов сгорания топлива и разложения ТЗП соответственно;  $\dot{m}_c$  – расход через сопло;  $p$ ,  $\rho$ ,  $R$ ,  $T$  – давление, плотность, газовая постоянная и температура газа в камере;  $V$  – объем камеры;  $F$  – площадь критического сечения сопла;  $\rho_T$  и  $S_T$  – плотность и площадь поверхности горения топлива;  $S_{ТЗП}$  – площадь поверхности теплозащиты;  $g$  – массоприход продуктов разложения ТЗП с единицы площади;  $A$  – коэффициент истечения для внутрикамерного газа;  $\beta$  – расходный комплекс;  $u$  – скорость горения топлива;  $u_1$ ,  $v$  – параметры закона скорости горения топлива;  $R_n$  – тяга в пустоте;  $I_{уд.n}$  – удельный пустотный импульс.

### Анализ влияющих параметров

Как видно из правой части уравнения (4), основными определяющими параметрами являются:

- изменение площади поверхности горения топлива;
- скорость горения твердого топлива;
- параметры внутрикамерного газа (температура, газовая постоянная, коэффициент истечения);
- удельный импульс тяги в пустоте;
- газоприход продуктов разложения ТЗП с единицы площади.

Площадь критического сечения сопла на участке глубокого спада можно считать постоянной и равной значению в конце работы РДТТ.

Изменение площади поверхности оголяющегося ТЗП определяется с помощью программного обеспечения для расчета геометрических характеристик заряда либо приближенно как

$$S_{ТЗП} = S_{ТЗП0} - S_T, \quad (13)$$

где  $S_{\text{тзпо}}$  – полная площадь поверхности теплозащиты корпуса РДТТ.

### Поверхность горения топлива

Геометрическая конфигурация остатков топлива в камере на момент начала глубокого спада определяется в основном исходной формой заряда. Примеры расчетной конфигурации остатков для заряда со звездообразным и цилиндро-коническим каналами представлены на рис. 1. Более сложная конфигурация остатков из отдельных фрагментов топлива, распределенных по внутренней поверхности корпуса РДТТ, может иметь место при наличии различных дополнительных элементов (кольцевых проточек, щелей) или неоднородного поля скоростей по объему заряда за счет различных причин (заряд из нескольких сливов топливной массы, неоднородное поле температур, эрозионное горение, напряженно-деформированное состояние и т.п.).

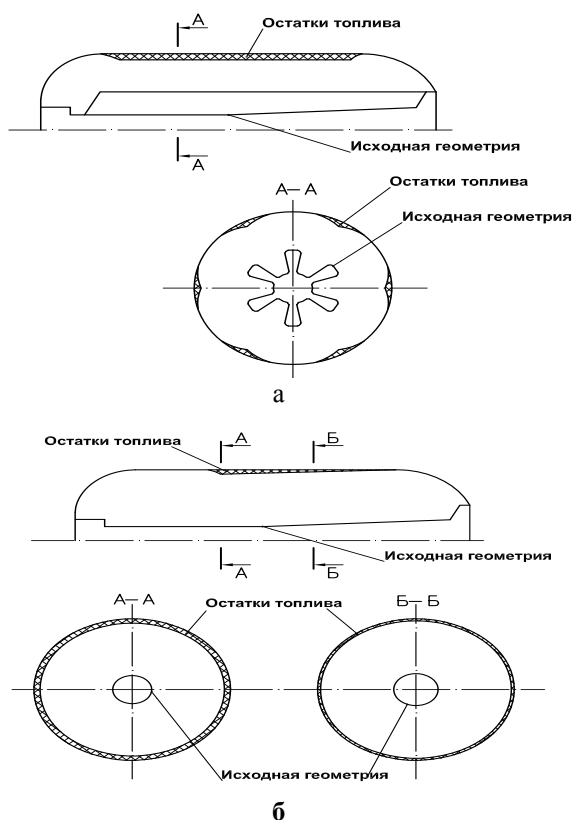


Рис. 1. Пример остатков топлива в камере сгорания РДТТ в конце работы двигателя:  
а – заряд со звездообразным каналом;  
б – заряд с цилиндро-коническим каналом

Изменение поверхности горения при догорании остатков топлива приближенно можно принять по линейному закону. Поверхность горения заряда на момент начала глубокого спада определяется из внутрибаллистического расчета основного режима работы РДТТ, а горящий свод наряду со скоростью горения топлива влияет на продолжительность догорания остатков топлива.

### Скорость горения топлива

Для расчета внутрибаллистических характеристик РДТТ, как правило, используют степенной закон скорости горения топлива в виде зависимости

$$u = u_1 p^\nu, \quad (14)$$

где  $u_1$  – коэффициент ("единичная скорость");  $\nu$  – показатель степени.

Параметры  $u_1$ ,  $\nu$  определяют экспериментально путем сжигания стандартных образцов топлива в установке постоянного давления. Расчет внутрибаллистических параметров на основном режиме работы РДТТ проводится при значениях параметров  $u_1$ ,  $\nu$ , соответствующих рабочему диапазону давлений (как правило, от 20 до 150 кгс/см<sup>2</sup>).

На параметры закона скорости горения также влияет ряд других факторов (дисперсность порошка алюминия, тип окислителя, катализаторы скорости горения, стабилизаторы и т.п.).

В области давлений участка глубокого спада ( $p \leq 3$  кгс/см<sup>2</sup>) параметры закона скорости горения имеют ряд особенностей [2-8], в частности показатель степени  $\nu$  в законе скорости горения по сравнению с основным режимом увеличивается на 50–80%, отмечается увеличение  $\nu$  при увеличении содержания окислителя за счет связующего (при постоянном содержании алюминия).

С учетом этого в рамках решения задачи оценки параметров глубокого спада предлагается следующий подход:

1. Основываясь на общих тенденциях "поведения" показателя степени в законе скорости горения (повышение на 50–80%), принять на участке глубокого спада

$$v_{гл. сп} = (1,65 \dots 1,70) v_{осн}, \quad (15)$$

где  $v_{осн}$  – значение  $v$  для основного режима работы.

2. В качестве точки увязки скорости горения на основном режиме и участке глубокого спада принимаем конец работы РДТТ, например давление  $p = 2 \text{ кгс/см}^2$ , в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2 для закона скорости горения  $u = 1,787p^{0,35}$ .

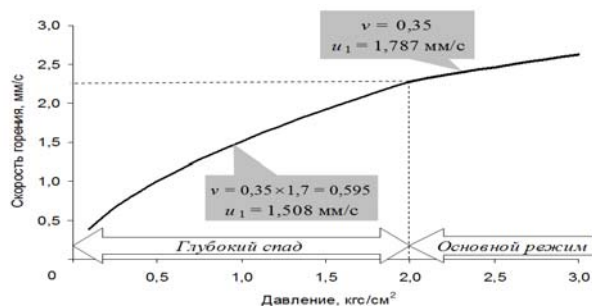


Рис. 2. Зависимость скорости горения от значения давления в камере сгорания

Отсюда получим зависимость

$$u_{1гл. сп} 2^{v_{гл. сп}} = u_{1осн} 2^{v_{осн}}; \quad (16)$$

$$u_{1гл. сп} = u_{1осн} 2^{(v_{осн} - v_{гл. сп})}. \quad (17)$$

### Термодинамические и энергетические параметры

Расчеты термодинамических и энергетических характеристик смеси продуктов сгорания топлива и продуктов разложения ТЗП для условий глубокого спада ( $p \leq 3 \text{ кгс/см}^2$ ) показали, что они в основном зависят от доли продуктов деструкции теплозащиты в суммарном газоприходе

$$K_{ТЗП} = \frac{\dot{m}_{ТЗП}}{\dot{m}_T + \dot{m}_{ТЗП}}. \quad (18)$$

При этом в отличие от основного режима работы РДТТ зависимость характеристик от давления является очень слабой (в пределах 1–3%). Примеры изменения коэффициента истечения  $A$ , комплекса  $RT$  и удельного пустотного импульса  $I_{уд. n}$  пока-

заны на рис. 3. Представленные зависимости хорошо аппроксимируются аналитическими выражениями в форме многочленов или кусочно-линейных функций.

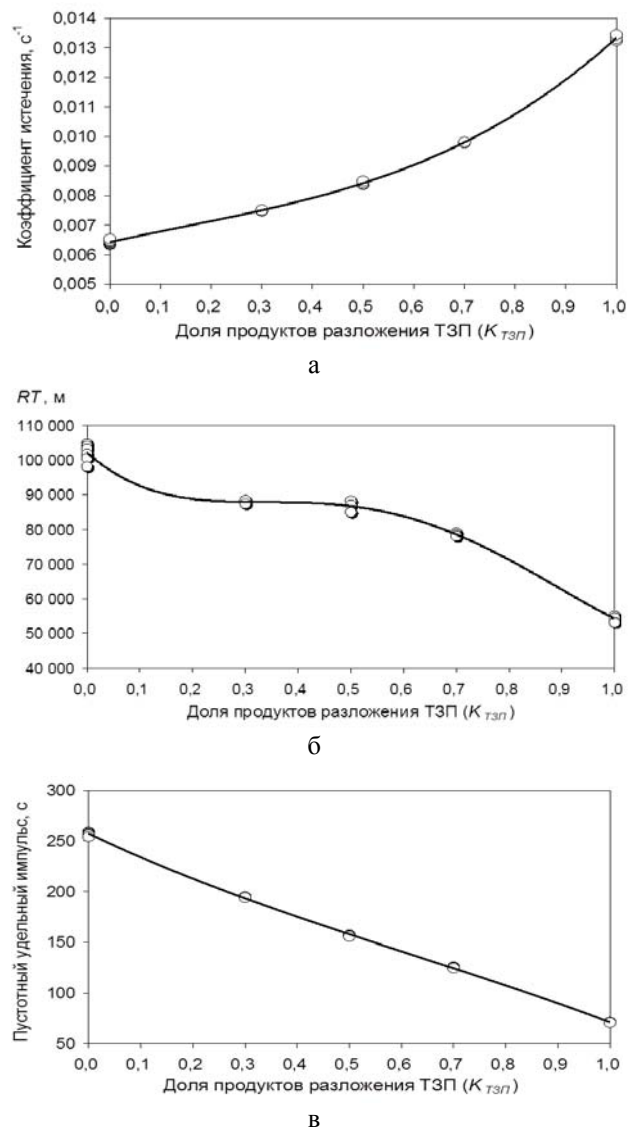


Рис. 3. Влияние доли ТЗП на термодинамические и энергетические параметры:

- а – коэффициент истечения  $A$ ;
- б – комплекс  $RT$ ;
- в – пустотный удельный импульс  $I_{уд. n}$

### Газоприход продуктов разложения ТЗП

Процесс деструкции внутреннего ТЗП корпусов РДТТ представляет собой достаточно сложный физический процесс, требующий проведения специальных экспериментальных и теоретических исследований [1, 9-13]. Авторы в работе [1] отмечают, что "...потеря массы ТЗП и секундный расход массы ТЗП по времени работы натуральных

РДТТ практически не могут быть определены экспериментально и рассчитываются только теоретически". Задача определения уноса ТЗП требует решения сопряженной задачи внутренней баллистики и теплового состояния двигателя.

Анализ имеющейся информации по деструкции внутреннего ТЗП позволяет отметить некоторые общие закономерности:

- температура начала интенсивного разложения ТЗП на основе резин типа 51-2110 составляет 500–800 К;

- изменение суммарного массоприхода с единицы площади ТЗП на основном режиме работы РДТТ имеет выраженный нелинейный характер с забросом в начале работы двигателя и последующим выравниванием и стабилизацией к моменту начала глубокого спада;

- деструкция ТЗП на участке глубокого спада определяется в основном перераспределением тепла, накопленного в прококсованном слое, и теплообменом с газовой средой в камере сгорания. При этом догорание остатков топлива влияет в основном на температуру газа в камере, но в целом не приводит к увеличению удельного прихода продуктов разложения ТЗП.

На рис. 4 представлен пример расчета изменения температуры по времени работы для сечения на переднем днище (а), цилиндрической части (б) и заднем днище (в) корпуса РДТТ (разные кривые соответствуют разным точкам по глубине ТЗП).

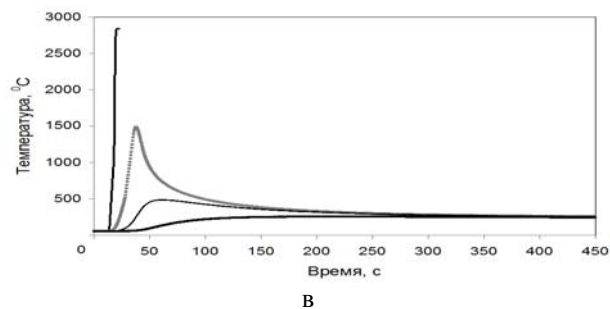
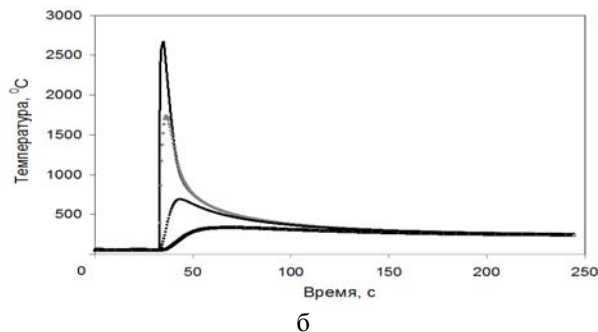
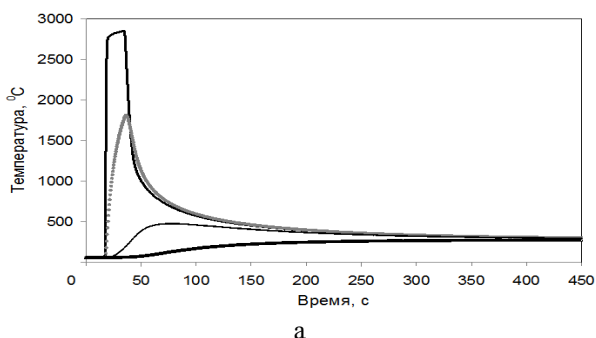


Рис. 4. Зависимость температуры корпуса по времени работы РДТТ:

- а – пример изменения температуры точки переднего днища по времени работы РДТТ;
- б – изменение температуры точки на цилиндрической части корпуса по времени работы РДТТ;
- в – пример изменения температуры точки заднего днища по времени работы РДТТ

В течение длительного времени (~400 с) после окончания работы двигателя происходит постепенное выравнивание температуры по объему ТЗП практически до уровня начала интенсивного разложения. Логично предположить, что удельный газоприход продуктов разложения пропорционален некоторой средней температуре зоны деструкции (по толщине ТЗП). Это позволяет, задавшись уровнем на момент начала глубокого спада (по предварительным оценкам, полученным для РДТТ верхних ступеней, – 0,08...0,15 кг/(м<sup>2</sup>·с)), построить аналитическую зависимость удельного газоприхода продуктов разложения ТЗП в виде, например, кусочно-линейной функции от времени.

### Методология проектной оценки

Анализ основных факторов, влияющих на внутрикамерные процессы РДТТ на участке глубокого спада, позволяет выполнить обоснованную оценку РТХ при наличии ограниченного объема исходных данных, что необходимо на этапе проектиро-

вания двигателя и ракеты. Предлагаемая схема определения внутривалистических и расходно-тяговых характеристик на участке глубокого спада состоит из ряда этапов.

1. Определение зависимостей изменения площади поверхности горения  $S_T(e)$  и площади поверхности ТЗП  $S_{ТЗП}(e)$  в функции сгоревшего свода на участке глубокого спада, а также площади критического сечения сопла и свободного объема камеры на момент начала глубокого спада по результатам расчета основного режима работы РДТТ.

2. Определение зависимостей изменения коэффициента истечения  $A$ , комплекса  $RT$  и пустотного удельного импульса  $I_{уд. n}$  в функции доли продуктов разложения ТЗП  $K_{ТЗП}$  по результатам термодинамического расчета смеси "топливо + ТЗП". Указанные зависимости могут быть представлены в дискретном виде (таблица) с последующей интерполяцией искомых значений либо в виде аналитических соотношений (степенной многочлен, линейная или кусочно-линейная функция) для непосредственного вычисления искомых значений.

3. Оценка параметров закона скорости горения на участке глубокого спада с использованием соотношений (15)–(17).

4. Оценка удельного (с единицы площади) массоприхода продуктов разложения ТЗП на участке догорания заряда.

Учитывая небольшую продолжительность периода догорания остатков топлива, удельный массоприход продуктов разложения ТЗП можно принять постоянным.

По оценкам ГП "КБ "Южное" для двигателя-аналога с резиноподобным ТЗП удельный газоприход продуктов разложения на момент начала глубокого спада составляет 0,08–0,15 кг/(м<sup>2</sup>·с). Эти значения могут быть использованы для предварительной оценки параметров глубокого спада.

5. Оценка удельного массоприхода продуктов разложения ТЗП после догорания заряда.

На этом этапе проводится анализ теплового состояния ТЗП и выработки алгоритма определения эффективной температуры в

расчетных точках внутреннего ТЗП и вычисления эффективной площади ТЗП (с температурами не ниже температуры начала разложения).

В первом приближении удельный массоприход продуктов разложения ТЗП можно считать пропорциональным средней температуре прогретого слоя ТЗП.

По результатам этого этапа работы необходимо получить зависимость изменения удельного массоприхода продуктов разложения ТЗП  $g(t)$  и эффективной площади ТЗП  $S_{ТЗП}(t)$  от времени.

6. С учетом параметров, определенных на этапах 1–5, проводится расчет характеристик маршевого РДТТ на глубоком спаде.

Для периода догорания остатков заряда система уравнений (4)–(12) принимает вид

$$\frac{V(e)}{RT(K_{ТЗП})} \frac{dp}{dt} = \rho_T S_T(e)u + g_0 S_{ТЗП}(e) - A(K_{ТЗП})pF; \quad (19)$$

$$\frac{dV}{dt} = uS_T(e); \quad (20)$$

$$\frac{de}{dt} = u; \quad (21)$$

$$u = u_1 p^v; \quad (22)$$

$$K_{ТЗП} = \frac{g_0 S_{ТЗП}(e)}{\rho_T u(e) S_T(e) + g_0 S_{ТЗП}(e)}; \quad (23)$$

$$\dot{m}_C = A(K_{ТЗП})pF; \quad (24)$$

$$R_n = \dot{m}_C I_{уд. n}(K_{ТЗП}). \quad (25)$$

В уравнениях (19)–(23)  $g_0$  – постоянный удельный массоприход продуктов разложения ТЗП на участке догорания заряда. Расчет проводится до момента  $S_T=0$  (соответствует значению  $K_{ТЗП}=1$ ).

После догорания остатков заряда система уравнений упрощается:

$$\frac{V_1}{(RT)_1} \frac{dp}{dt} = g(t)S_{ТЗП}(t) - A_1 pF; \quad (26)$$

$$\dot{m}_C(t) = A_1 p(t)F; \quad (27)$$

$$R_n(t) = \dot{m}_C(t)I_{уд. n1}, \quad (28)$$

где  $V_1$ ,  $(RT)_1$ ,  $A_1$ ,  $I_{уд. n1}$  – значения параметров при  $K_{ТЗП}=1$ ;  $g(t)$ ,  $S_{ТЗП}(t)$  – удельный

массоприход продуктов разложения и эффективная площадь ТЗП.

В общем случае решение систем (19)–(25) и (26)–(28) может быть найдено методами численного анализа. При аналитическом задании зависимостей  $g(t)$  и  $S_{ТЗП}(t)$  решение уравнения (26) может быть также получено в виде функциональной зависимости.

Пример полученных зависимостей давления в камере, секундного расхода и тяги в пустоте на участке глубокого спада представлен на рис. 5.

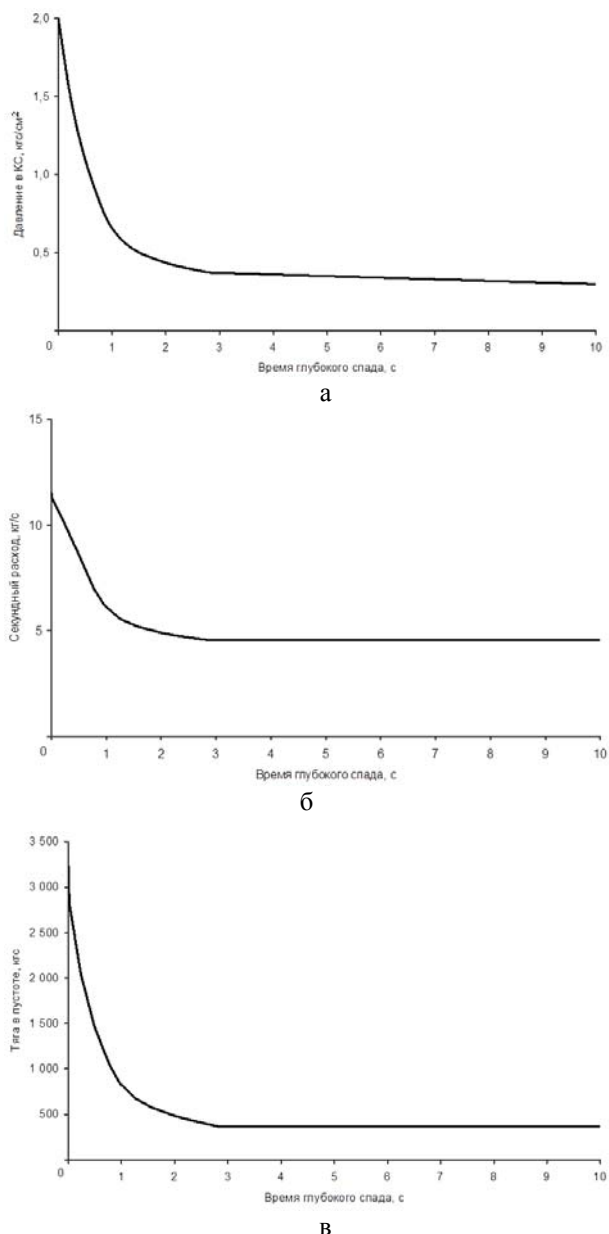


Рис. 5. Характеристики РДГТ на глубоком спаде: а – давление в камере; б – расход; в – тяга в пустоте

Для повышения точности прогнозирования параметров глубокого спада РДГТ требуется проведение дополнительных исследований в части:

- определения закона скорости горения твердого топлива в области низких давлений ( $0,1...5$  кгс/см<sup>2</sup>);
- определения газоприхода внутреннего ТЗП в условиях воздействия продуктов сгорания топлива;
- определения зависимости газоприхода продуктов разложения от температуры ТЗП после выгорания остатков топлива (т.е. при отсутствии воздействия высокотемпературных продуктов сгорания);
- расчета изменения температуры внутреннего ТЗП на основном режиме работы и в течение длительного времени (400–600 с) по окончании работы РДГТ.

С целью проверки и уточнения расчетной модели целесообразно также предусматривать регистрацию параметров участка глубокого спада при проведении огневых стендовых и летно-конструкторских испытаний (при наличии технической возможности).

### Выводы

1. Проведен анализ основных факторов, влияющих на внутрикамерные процессы в РДГТ на участке глубокого спада.
2. Разработана упрощенная математическая модель и методология проектной оценки возмущающих тяговых усилий маршевого РДГТ на участке глубокого спада после отделения ступени. При расчете учитывается догорание остатков заряда и деструкция внутреннего ТЗП.
3. Для уточнения методологии расчета РТХ необходима дополнительная информация по горению твердого топлива при низких давлениях и процессу разложения ТЗП по времени в зависимости от изменения температуры ТЗП после сгорания топлива.
4. Исследование влияния процессов деструкции внутреннего ТЗП на внутрикамерные процессы позволит построить единую расчетную модель (основной режим + глубокий спад) для внутрибаллистических параметров РДГТ.

### Список использованной литературы

1. Губертов А.М., Миронов В.В. и др. Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива / Под ред. А.С. Коротева. – М.: Машиностроение, 2004.
2. Горбенко Т.И. Влияние соотношения компонентов на горение металлизированных топлив при субатмосферных давлениях // Вестник Томского государственного университета. – 2007. – №298. – С. 125–128.
3. Горбенко Т.И. Закономерности горения высокоэнергетических гетерогенных систем, содержащих ультрадисперсный алюминий, в широком диапазоне давлений: Автореферат дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2007.
4. Пестерев А.В. Влияние компонентного состава на характеристики горения высокоэнергетических материалов. Автореферат дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2012.
5. Arkhipov V. A. Ignition and combustion of high-energy materials with aluminium nanopowders / 7 ISFS. – Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University.
6. Aziz A., Mamat R., Wan Ali W. K. Low pressure strand burner for solid propellant burning rate studies // International Conference on Mechanical Engineering Research. ICMER 2013: Bukit Gambang Resort City, Kuantan, Pahang, Malaysia, 1-3 July 2013.
7. Krishnan S., Swami R.D. Effect of Burning Rate Modifiers on Subatmospheric Flame Temperatures of AP/HTPB Composite Solid Propellants / Defence Science Journal. – Vol. 48. – № 2. – 1998. – P. 211-217.
8. Schöyer H.F.R., Korting P.A.O.G. Low Pressure Combustion Characteristics of Composite Propellant / Report LR-367. – Delft University of Technology, 1982.
9. Белов В.П. Тепловая защита элементов конструкции ракетных двигателей на твердом топливе. – СПб: "Военмех", 2010.
10. Кузнецов Г.В. Высокотемпературное разрушение резиноподобных теплозащитных материалов в условиях высоких давлений // Теплофизика высоких температур. – Т. 34. – № 6. – 1996. – С. 919–923.
11. Кузнецов Г.В. Аналогичность процессов высокотемпературного разрушения резиноподобных теплозащитных материалов в газовых потоках и эрозионного горения порохов // Физика горения и взрыва. – Т. 34. – № 1. – 1998. – С. 65–69.
12. Кузнецов Г.В., Рудзинский В.П. Высокотемпературный тепломассоперенос в слое кокса теплозащитных материалов // Теплофизика высоких температур. – Т. 38. – № 4. – 2000. – С. 654–660.
13. Кузнецов Г.В. Экспериментальная оценка прочности кокса обугливающегося резиноподобного теплозащитного материала // Физика горения и взрыва. – Т. 32. – № 5. – 1996. – С. 143–150.

Статья поступила 20.12.2015