электронный научно-технический журнал
ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51036. ISSN 2307-0595

Теоретическая оценка влияния параметров работы воспламенительного устройства на характеристики процесса воспламенения твердого ракетного топлива

 # 08, август 2014

Козичев В. В.[1,a], Сергеев А. В.[1], Сухов А. В.[1]

УДК: 621.454.3

[1]Россия, МГТУ им. Баумана
[a]samuraijack85@rambler.ru

Воспламенение является неотъемлемым этапом рабочего процесса любого РДТТ. При расчете воспламенения заряда необходимо рассчитать массу навески и другие параметры воспламенительного устройства для обеспечения надежного воспламенения заряда без существенного заброса давления или задержек. При этом необходимо учитывать такие особенности топлива как наименьшее давление устойчивого горения. Воспламенение является сложным нестационарным физико-химическим процессом, в ходе которого холодная поверхность заряда твердого ракетного топлива (ТРТ) под действием внешнего теплового потока прогревается до температуры газификации всех компонентов, после чего газифицирующиеся продукты вступают в самоподдерживающуюся реакцию горения. Необходимым (но не достаточным) условием воспламенения топлива является нагрев до температуры газификации поверхностных слоев топлива (для смесевого топлива – и окислителя и горючего, имеющих различные теплофизические свойства и температуру газификации).

Современные применяемые на практике модели воспламенения заряда ТРТ, как правило, являются либо эмпирическими, либо кретериальными [1, 2]. С одной стороны это упрощает их применение в соответствующих ограничениям моделей случаях, а с другой стороны не позволяют проводить теоретический анализ факторов, влияющих на параметры и характеристики процесса воспламенения. Целью работы является получение информации о качественном и количественном влиянии теплофизических параметров топлива и плотности теплового потока к поверхности топлива на период задержки воспламенения и скорость горения топлива после воспламенения.

При теоретическом анализе процесса нестационарного прогрева поверхностного слоя в качестве условного времени подготовки топлива к горению выбран интервал времени между началом теплового воздействия и достижением поверхности температуры, соответствующей равновесной температуре поверхности горения топлива при данных условиях. Этот интервал при заданных допущениях метода расчета может быть определен

достаточно точно, тогда как оценка периода задержки от начала газификации до начала устойчивого процесса горения представляет собой определенные сложности.

Для качественной и количественной теоретической оценки периода задержки воспламенения использована численная модель нестационарного прогрева поверхностного слоя топлива. Схема расчетной системы модели приведена на рис. 1.

Оценка комплексного влияния параметров окружающей среды требует определения влияния данных параметров на величину коэффициента конвективного теплообмена. В качестве характерного примера, рассмотрено воспламенение внутренней поверхности канального заряда. Следует заметить, что в рассматриваемом случае нагрев поверхности топлива осуществляется исключительно газообразными продуктами сгорания (без частиц конденсированной фазы, обеспечивающих очаговое воспламенение).

При расчетах приняты следующие основные допущения:

- в процессе прогрева поверхностного слоя принимаются постоянными давление в камере сгорания, температура и скорость ядра потока ПС воспламенительного состава;
- теплофизические параметры топлива принимаются постоянными, и независящими от температуры;
- теплопередача от продуктов сгорания воспламенителя к поверхности осуществляется за счет конвекции;
- необходимая температура газификации соответствует температуре поверхности при стационарном горении топлива в условиях заданного давлении.

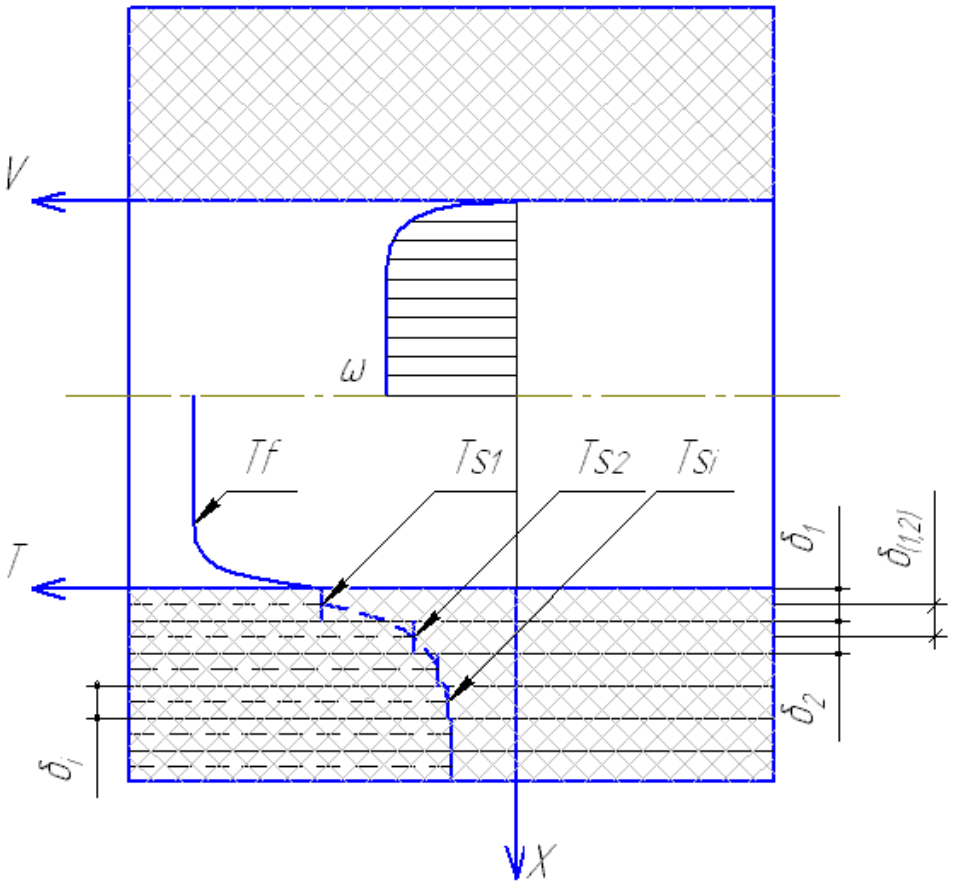


Рис. 1 Схема моделируемой системы: показаны профиль скорости потока продуктов сгорания воспламенителя и профиль температуры.

Для расчета величины коэффициента теплоотдачи в канале круглого сечения воспользуемся критериальной зависимостью [3]

$$\alpha_к = 0,0206 \cdot C_{p1} \cdot \mu_1^{0,18} \cdot \frac{\dot{m}^{0,82}}{D^{1,82}} \cdot \left(\frac{T_f}{T_{S1}} \right)^{0,35},$$

где C_{p1} – теплоемкость продуктов сгорания, μ_f – динамическая вязкость продуктов сгорания, m – массовый расход ПС через поперечное сечение канала, D – диаметр поперечного сечения канала, T_f – температура продуктов сгорания в ядре потока, T_f – температура стенки.

Выразив массовый расход через плотность газа (определяемую по уравнению состояния газа), скорость потока и диаметр канала, после преобразования данное выражение может быть записано в следующем виде:

$$\alpha_к = 0,0169 \cdot C_{p1} \cdot \left(\frac{\mu_1}{D} \right)^{0,18} \cdot \left(\frac{p \cdot \omega}{R_f \cdot T_f} \right)^{0,82} \cdot \left(\frac{T_f}{T_{S1}} \right)^{0,35}$$

где p – давление продуктов сгорания воспламенителя, ω – скорость потока ПС воспламенителя вдоль канала, R_f – газовая постоянная продуктов сгорания воспламенителя. Применение данной зависимости позволит определить коэффициент конвективной теплоотдачи в зависимости от величины давления в камере сгорания при известных термодинамических и теплофизических параметрах продуктов сгорания.

Модель нестационарного прогрева создана на основе уравнений теплопроводности. Поверхностный слой материала разбит на множество слоев малой толщины. Шаг сетки задан переменным – толщина слоя обратно пропорционально градиенту температуры, что повышает точность расчетов. За счет большого отношения диаметра канала к толщине поверхностного слоя, при расчете процесса теплообмена между слоями последние можно условно считать плоскими.

Величина плотности теплового потока от i-го слоя к $i+1$ слою определяется уравнением теплопроводности [4]

$$q_{(i,i+1)} = -\frac{\lambda_S}{\delta_{(i,i+1)}} \left(T_{Si} - T_{Si+1} \right),$$

здесь λ_s – коэффициент теплопроводности материала, δ – расстояние между средними поверхностями соседних слоев, T_s – температура слоя, $i=1..N$ – номер слоя ($i=1$ соответствует поверхностному слою топлива).

Разница между величинами плотности тепловых потоков, входящих в слой со стороны более горячего соседнего слоя, и выходящих в сторону более холодного, соответствует скорости изменения избыточной тепловой энергии рассматриваемого слоя

$$\Delta q_i = q_{(i+1,i)} - q_{(i,i-1)}.$$

Изменение запасенной тепловой энергии приводит к изменению температуры слоя:

$$\Delta q_i = \frac{\rho_S \cdot c_S \cdot \delta_i}{\tau} \left(T_{Si}^{t+1} - T_{Si}^{t} \right),$$

$$T_{Si}^{t+1} = T_{Si}^{t} + \frac{\Delta q_i \cdot \tau}{\rho_S \cdot c_S \cdot \delta_i},$$

здесь ρ_s – плотность материала, c_s – теплоемкость материала, δ_i – толщина рассматриваемого слоя, τ – шаг времени расчета.

Для первого (внешнего) слоя величина входящего теплового потока определяется уравнением теплового потока при конвективном теплообмене с потоком газа

$$q_{(0,1)} = \alpha_к \cdot (T_f - T_{S1}),$$

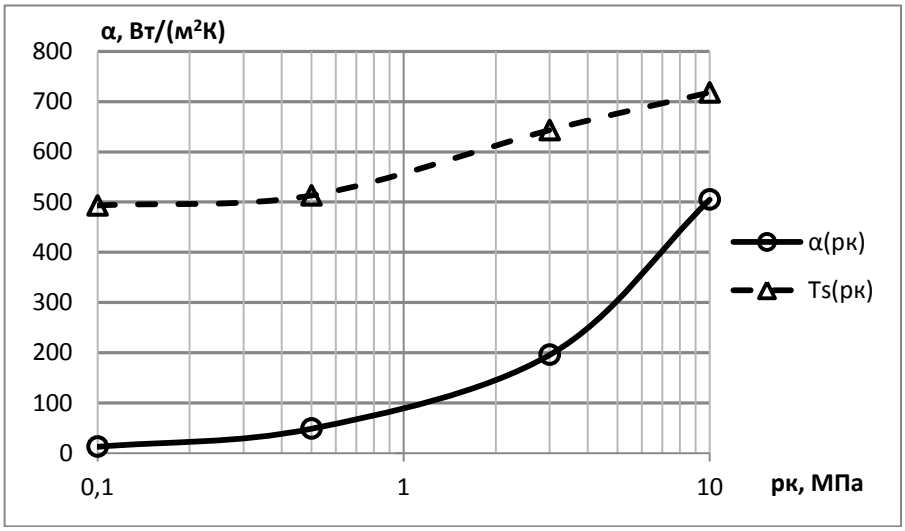
где $\alpha_к$ – коэффициент конвективной теплоотдачи, T_f – температура ядра потока продуктов сгорания ВУ.

Таким образом, при расчете изменения теплового состояния поверхностного слоя материала по времени учитывается влияние температуры поверхности на величину теплового потока со стороны продуктов сгорания воспламенительного состава.

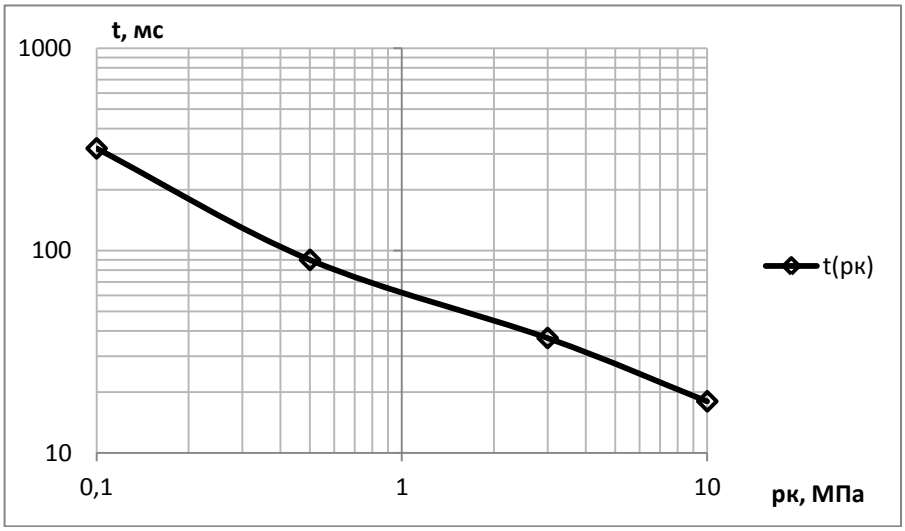
Модель учитывает зависимость плотности подводимого теплового потока от величины давления с помощью коэффициента конвективной теплоотдачи α(p), а так же от текущей температуры поверхности и заданной температуры продуктов сгорания воспламенительного устройства.

Алгоритм расчета реализован в виде программы в комплексе Matlab; характерная толщина слоя составляет порядка $\delta_1=10^{-5}$ м, а шаг по времени $\tau=10^{-6}$ с.

С использованием представленной модели для баллиститного топлива марки Н проведена оценка влияния давления в камере сгорания на этапе работы воспламенительного устройства на период задержки воспламенения. Начальная температура топлива на всей глубине принята равной 300 К, температура потока продуктов сгорания воспламенителя 1500 К, диаметр канала 0,1 м, скорость потока продуктов сгорания 5 м/с. Температура поверхности топлива, соответствующая завершению этапа прогрева, соответствует температуре поверхности горения топлива при заданном давлении [5]. На рис. 2 представлены графики зависимости температуры газификации и коэффициента конвективной теплоотдачи от величины давления в камере сгорания, а так же время прогрева.



а



б

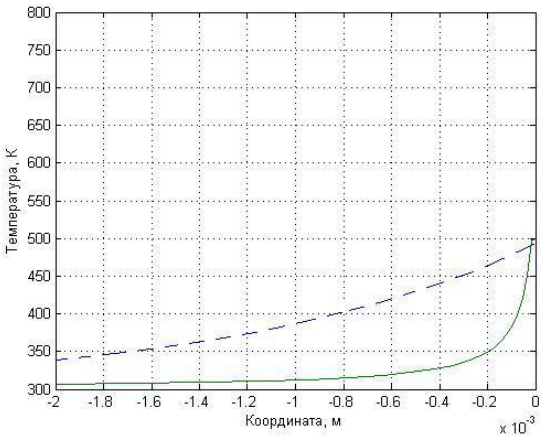
Рис. 2 Зависимость конечной температуры прогрева поверхности горения (температуры газификации) и коэффициента конвективной теплоотдачи (а), и времени прогрева поверхности топлива до температуры горения (б) от величины давления в КС.

В результате нестационарного прогрева поверхностного слоя материала, на момент начала газификации формируется определенный температурный профиль поверхностного слоя. Запасенная в поверхностном слое тепловая энергия после прекращения внешнего теплового воздействия расходуется на газификацию материала и, в случае начала экзотермической реакции достаточной интенсивности в газовой фазе, это может привести к окончанию воспламенения и началу устойчивого горения топлива. При заданном значении давления скорость стационарного горения топлива, в соответствии с законом горения, имеет определенную величину, для которой характерен установившийся температурный профиль поверхностного слоя, определяемый уравнением Михельсона. В дальнейшем будем называть этот температурный профиль, соответствующий стационарному горению – равновесным. Для того чтобы скорость горения с самого начала соответствовала стационарному значению, необходимо соответствие начального температурного профиля (полученного в результате нестационарного прогрева) равновесному. При меньшей толщине прогретого слоя запас тепловой энергии оказывается заниженным что, при отсутствии дежурного источника тепла, поддерживающего тепловой поток к поверхности на достаточном для газификации уровне может привести к неустойчивому горению или погасанию топлива. При начальном температурном профиле расположенном выше равновесного (больше глубина прогретого слоя), до выгорания прогретой толщины материала и стабилизации температурного профиля скорость горения топлива будет завышена, что увеличивает заброс давления, и это необходимо учитывать при проектировании РДТТ и расчетах внутренней баллистики. Таким образом, с точки зрения скорейшего выхода процесса горения на установившейся режим, необходимо добиваться формирования в процессе прогрева топлива температурного профиля, близкого к равновесному.

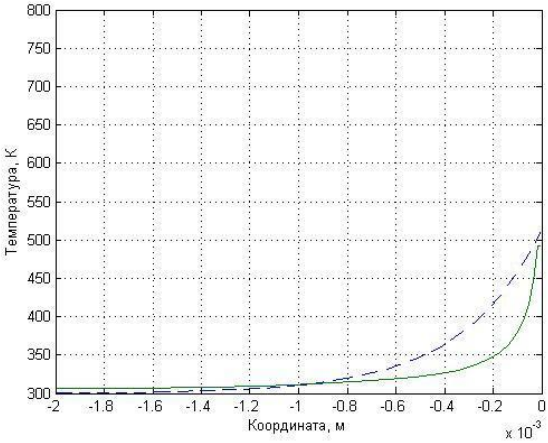
На рис. 3 приведен результат расчета температурного профиля на момент завершения прогрева для различных значений давления при фиксированном значении плотности

теплового потока. Как видно из иллюстраций, конечный температурный профиль при прочих равных существенно зависит от величины давления, и различным образом соотносится с равновесным для данного давления. Наиболее близок к равновесному температурный профиль, образовавшийся в процессе прогрева при давлении в камере сгорания 0,5 и 3,0 МПа (рисунки б и в соответственно). При этом профиль, полученный при давлении 0,5 МПа обеспечивает запас тепловой энергии в поверхностном слое ниже номинального, что может привести к затяжному либо неустойчивому процессу воспламенения. Для давления 3 МПа глубина прогрева существенно выше равновесной, что приведет после воспламенения к реализации повышенной скорости горения на протяжении порядка 0,5 мм толщины свода. Таким образом, можно сделать вывод о том, что для баллиститного топлива марки Н при указанных условиях оптимальный процесс воспламенения осуществляется при давлении порядка 1,0-1,5 МПа.

Результаты расчетов свидетельствуют о том, что для заданного топлива при постоянном давлении во время прогрева оптимальный температурный профиль может быть сформирован за счет реализации переменного по времени значения плотности теплового потока. Температурный профиль, близкий к оптимальному, может быть реализован за счет подбора соответствующего значения плотности теплового потока при постоянной величине последнего. То есть при заданном значении величины давления достижение оптимального температурного профиля на момент воспламенения может быть обеспечено регулировкой параметров, влияющих на величину коэффициента теплоотдачи (термодинамических параметров и скорости потока горячего газа вдоль поверхности топлива), а так же настройкой зависимости данных параметров от времени.



а



б

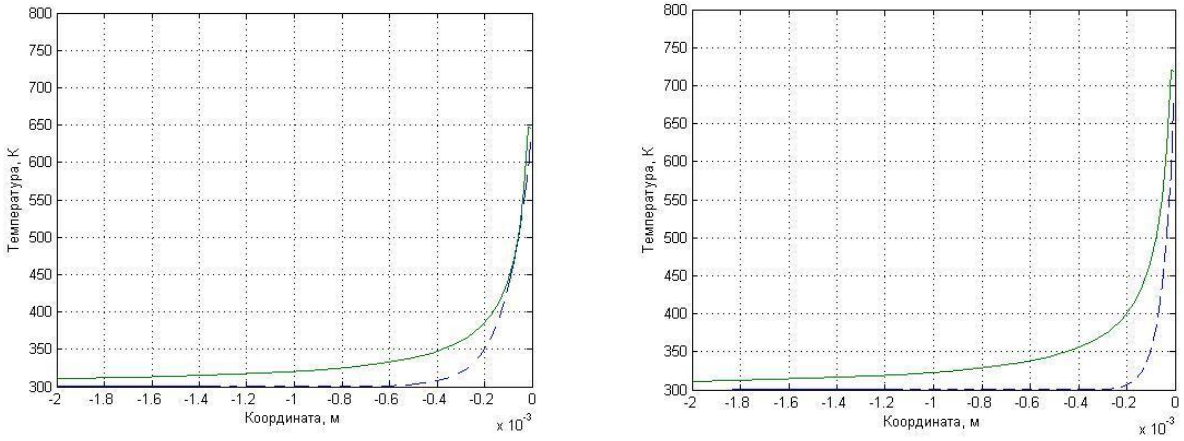


Рис. 3 Температурные профили для различных значений давления в КС. а) 0,1 МПа, б) 0,5 МПа, в) 3 МПа, г) 10 МПа. Сплошная линия – температурный профиль по результатам прогрева,пунктирная линия – равновесный температурный профиль.

Общие закономерности, рассмотренные выше, идентичны для баллиститных и смесевых ТРТ. Различие заключается в несколько усложненном механизме прогрева смесевых топлив (трехмерная картина тепловых потоков в поверхностном слое, различные температуры газификации компонентов) и необходимости смешения продуктов газификации перед воспламенением.

Подтверждением зависимости скорости горения на начальном этапе работы от профиля теплового воздействия служат результаты серии контрольных испытаний смесевого топлива на основе нитрата калия и эпоксидного связующего. Эксперименты проведены на установке для изучения скорости горения ТРТ СВЧ-методом [6] в составе которого применено газофакельное воспламенительное устройство [7]. В качестве периода задержки воспламенения при экспериментальном изучении процесса выбран временной интервал между моментом начала роста давления в камере сгорания и моментом начала перемещения фронта горения с медленно меняющейся скоростью. Момент начала роста давления в камере сгорания, соответствует началу интенсивного выгорания заряда воспламенителя и, соответственно, началу теплового воздействия продуктов сгорания воспламенительного состава на поверхность топлива. Достижение постоянного значения скорости свидетельствует о выходе процесса горения на установившийся режим, т.е. о завершении процесса воспламенения.

Две серии экспериментов проведены в идентичных условиях с одинаковой массой воспламенительного состава. В первом случае применялся гранулированный воспламенитель, во втором – цельный торообразный заряд. Соответственно, в первом случае тепловое воздействия имеет значительную величину, но малую длительность – поверхность топлива быстро прогревается до температуры газификации, но не успевшее прогреться вглубь топливо набирает номинальную скорость горения постепенно, по мере перестройки температурного профиля. Во втором случае имеет место длительный малоинтенсивный прогрев поверхности до температуры газификации на значительную глубину. После воспла-

менения следует заброс скорости горения и снижение её до номинального значения. Графики изменения скорости горения двух характерных экспериментов приведены на рис. 4.

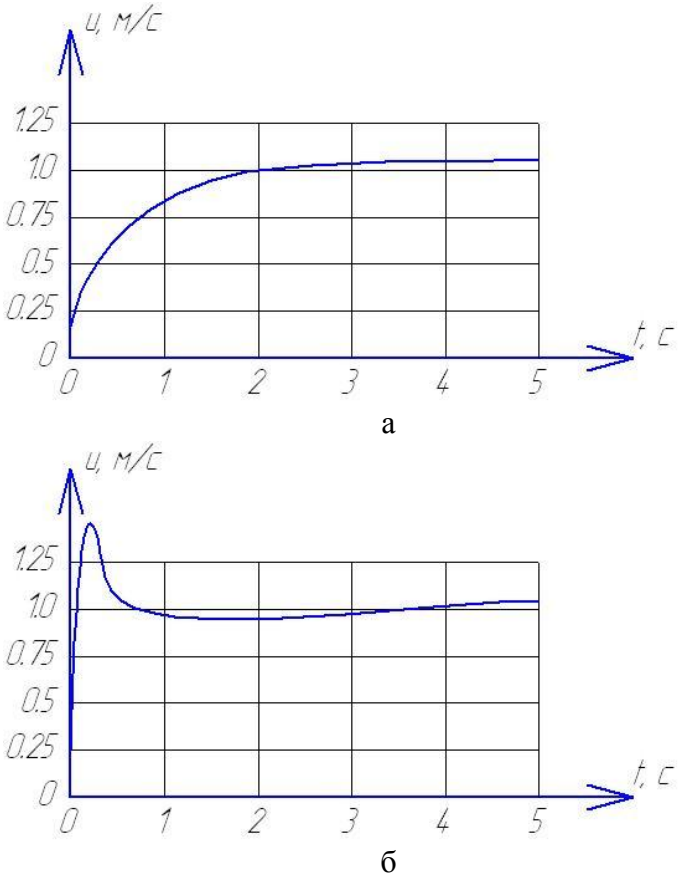


Рис. 4 Влияние характера теплового воздействия на профиль скорости горения топлива а) интенсивный прогрев топлива на малую глубину, б) затяжной прогрев топлива на значительную глубину

Медленный рост скорости до номинального уровня (рис. 4 а) может привести к затяжному выходу двигателя на рабочий режим. Заброс скорости горения при интенсивном прогреве поверхности (рис. 4 б) может привести к забросу величины давления в камере сгорания.

Процесс воспламенения заряда реального РДТТ, даже при использовании продуктов сгорания воспламенительного устройства без конденсированных частиц, отличается от рассмотренного случая переменной величиной давления, скорости обдува поверхности, коэффициента теплоотдачи. При работе воспламенительного устройства в составе камеры сгорания постоянного объема (при наличии сопловой заглушки) скорость потока газа так же будет различной по длине канала. В этом случае параметры расчета существенно зависят от конфигурации камеры сгорания и формы заряда топлива.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что оптимальным является процесс прогрева топлива, в результате которого к моменту воспламенения формируется температурный профиль поверхностного слоя, близкий к равновесному при данном давлении. При постоянном значении коэффициента теплоотдачи, значению последнего соответствует определенное давление, при котором реализуется профиль, близкий к равновесному. Точ-

ное соответствие итогового температурного профиля равновесному может быть обеспечено за счет настройки соответствующей зависимости теплового потока от времени.

Список литературы

1. А.М. Липанов, А.В. Алиев Проектирование ракетных двигателей твердого топлива: Учебник для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 1995 г. – 400 с.
2. Шишков А.А. и др. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива: Справочник. – М.: Машиностроение, 1988 г. – 240 с.
3. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: Учебник для вузов./ Под ред. Д.А. Ягодникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 488 с.
4. А.В. Болгарский, Г.А. Мухачев, В.К. Щукин Термодинамика и теплопередача./ Под ред. Самсонова М.Т. – М.: Изд-во «Высшая школа», 1964. – 458 с.
5. Новожилов Б.В. Нестационарное горение твердых ракетных топлив./ Акад. Наук СССР, Ин-т химич. физики. - М. : Наука, 1973. — 175 с.
6. Лавров Б. П., Шарай Ю. М., Сергеев А. В. Определение скорости горения твёрдого топлива с применением измерителя полных сопротивлений СВЧ-диапазона // Вестник МГТУ им Н.Э.Баумана. – 2009. – Приборостроение, №1 – С. 28-36.
7. Сухов А.В., Лавров Б.П., Гавриленко И.В., Сергеев А.В. Газофакельное воспламенительное устройство // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2010. № 3. С. 70-76.