Введение В рамках тепловой теории зажигания предполагается, что основные процессы, ответственные к зажиганию реагента, происходят в конденсированной фазе. В тепловой теории зажигания конденсирован-ных химических веществ имеет место недина-мические и динамические режимы. В первом случае параметры, входящие в граничные условия, явно от времени не зависят. В динамических режимах эти параметры являются функциями времени. Нединамический режим зажигания конденсированного вещества в форме сферы конвективным тепловым потоком рассмотрен в работе [1]. В настоящей статьи исследуется динамический режим зажигания конденсированного химического вещества в форме сферы, когда температура окружающей среды повышается по экспоненциальному закону $Tc (t) = Tm – (Tm – T0)exp(–kt)$, где Tm – максимальная температура среды, $T0$ – начальная температура, k – постоянная. Постановка задачи Реагирующее твердое химическое вещество в форме сферы нагревается внешним конвективным тепловым потоком, где коэффициент теплообмена α является постоянной величиной, а температура среды Tc изменяется по экспоненциальному закону от начального значения $T0$. Радиус сферического тела $R1$. Нагрев сферического тела осуществляется конвекцией по закону Ньютона. Под воздействием внешнего источника тепла в реагенте сферической форме развивается экзо-термическая химическая реакция нулевого порядка по закону Аррениуса. Требуется составить математическую модель рассматриваемой задачи и из ее решения получить выражения для определения основных характеристик зажигания. Математическая модель рассматриваемой задачи точного аналитического решения не имеет. Она решается приближенными или численными методами. В данной работе используется приближенный метод [2], согласно которому она описывается следующими уравнениями: уравнение теплопроводности для сферического тела $\partial T(r,t)/\partial t = a(\partial 2T(r,t)/\partial r2 + 2\partial T(r,t)/r\partial r)$, (1) граничные условия $\alpha(Tc(t) – T(R1,t)) = \lambda\ \partial T(R1,t)/\partial r$, (2) $\partial T(0,t)/\partial r = 0$, (3) начальное условие $T(r, 0) = T0$, (4) условие зажигания $\alpha(Tc(t) – Tп) = 4,2(\lambda Qvk0 \exp(– E/(RTп))RTп2/E)1/2$. (5) Значение температуры на поверхности $T(R1,t)$, входящее в условие зажигания, определяется из решения системы уравнений (1) – (4) и имеет вид [3]: $T(R1,t) = T0 + (Tm– T0)(1 – s – s1)$, где $s =Bi \sin(p) \exp(–pd Fo)/((Bi – 1) \sin(p) + + p \cos(p))$; (6) s1 = (7) $pd = kR12/a$; $p = (pd)1/2$. Численные значения μn и An зависят от критерия Био. Первые шесть значений μn и An приведены в таблицах [3]. В работе [3] показано, что в уравнении (6) ряды быстро сходятся, начиная со значений $Fo > Fo1 = 0,4 – 0,5$ можно ограничиться первым членом ряда. Однако, расчеты показывают, что быстрое зажигание сферического пороха проис-ходит при малых Fo Fo1. Поэтому рядами в уравнении (6) не удается пренебречь. Для иллюстрации приведем численный примеры Пример. Необходимо определить характер изменения температуры окружающей среды по экспоненциальному закону для зажигания сфери-ческого пороха с радисом $R1 = 1$мм в течение 1с. Коэффициент $k = 0,5$.

Начальная температура газового потока и реагента T_n = 300 K. Исходные теплофизические и кинетические данные пороха: λ = 0,1254; c = 1254; ρ = 1500; Q_vk_0 = 1,5·1028; E/R = 24000; Bi = 10; α = 627. Решение. При Bi = 10 из таблиц работы [3] определяются значения: μ_1 = 2,8363; μ_2 =5,7172; μ_3 = 8,6587; μ_4 = 11,6532; μ_5 = 14,6870; μ_6 =17,7481. A_1 = 1,9249; A_2 = – 1,7381; A_3 = 1,5141; A_4 = – 1,3042; A_5 = 1,1269; A_6 = – 0,9827. Вычисляются значения: f1 = A1 sin(μ1) exp(–μ1 2Fo)/ (1– μ12 /pd)/μ1 f2 = A2 sin(μ2) exp(–μ2 2Fo)/ (1– μ22 /pd)/μ2; f3 = A3 sin(μ3) exp(–μ32Fo)/ (1– μ3 2 /pd)/μ3; f4 = A4 sin(μ4) exp(–μ42Fo)/ (1– μ4 2 /pd)/μ4; f5 = A5 sin(μ5) exp(–μ52Fo)/ (1– μ5 2 /pd)/μ5 ; f6 = A6 sin(μ6) exp(–μ62Fo)/ (1– μ6 2 /pd)/μ6; s1 =Bi sin(p) exp(–pd Fo)/((Bi – 1) sin(p) + + p cos(p)); s = f1+f2+f3+f4+f5+f6. Тогда формула для определения температуры на поверхности пороха имеет вид T(R1,t) = Tn + bt(1 – s1 –s). (8) Численные значения T(R1,t) и времени зажигания tz определяются из решения уравнения (5) итерационным методом. Результаты расчетов примера 1: T(R1,t) = 551 K; tz =1,78 c. Пример 2. Радиус сферы R1= 1мм. Остальные условия, рассмотренные в примере 1, сохраняются. Табличные значения An и μn находятся при Bi = 5. Результаты расчетов: T(R1,t) = 520 K; tz = 1,69 c; Tm= 1442 K; Tc = 749; Fo = 0,057. Таким образом, решена задача зажигания сферического пороха при динамическом режиме, когда температура среды изменяется по экспоненциальному закону. Даны расчетные формулы для определения параметров зажигания. Обозначения T – температура материала, K; Tc – температура среды, K; r – координата, м; α – коэффициент теплообмена, Вт/(м2.K); Qv – тепловой эффект реакции на единицу объема, Дж/м3; k0 – предэкспоненциальный множитель, 1/c; E– энергия активации, Дж/моль; t – время, c; tz – время задержки зажигания; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль•K); Tn – начальная температура материала, K; a = l/(c•ρ) – коэффициент температуропро-водности, м2/c; λ – коэффициент теплопроводности, Вт / (м . K); ρ – плотность материала, кг/м3; c – коэффициент теплоемкости, Дж/(кг·K); T(R1,t) – температура на поверхности шара, K; Bi = α R1/ λ– критерий Био; Fo – критерий Фурье. Индексы: c – среда; v – объем; z – зажигание.