

СФЕРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИСКРОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИСКРОБЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ РУДНИЧНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Бершадский И.А., Клименко М.С.

Донецкий национальный технический университет

Иохельсон З.М.

Макеевский научно-исследовательский институт, отдел электрооборудования

The mathematical model of electric ignition for explosive atmosphere is offered within the framework of the thermal theory of the ignition. The minimal parameters forming a nucleus of a flame in view of assumptions about absence of influence of electrodes and speed of their disconnection are established.

Актуальность проблемы. Одним из направлений повышения безопасности труда при эксплуатации электрооборудования во взрывоопасных средах является широкое применение искробезопасных систем. Искробезопасное исполнение основано на том, что электрические разряды малой энергии оказываются неспособными воспламенить взрывчатую смесь. К области его применения относятся слаботочные системы, аппаратура и приборы автоматики, связи, измерений, контроля и т.д. [1]

Однако до настоящего времени в недостаточной степени разработаны методы расчетной оценки искробезопасности электрических цепей, что существенно затрудняет выбор оптимальных вариантов искробезопасной аппаратуры на стадии её проектирования, усложняет её конструирование и оценку в период испытаний.

Количественная характеристика условий воспламенения может быть дана только на основе установления зависимостей (аналитических или численных, моделируемых) многообразных факторов, влияющих на процессы искрообразования и последующего зажигания взрывоопасной газовой смеси. Например, в [2] указывается, что условия взрыва в газе от электрической искры зависят от характера изменения и величины I , U , P , W_p , размеров, материала, формы, скорости расхождения контактов; параметров смеси, ее теплофизических свойств и движения в момент воздействия разряда.

Постановка задачи и принятые допущения. Анализ ряда литературных источников [3, 4] показал взаимосвязь, существующую между тепловым действием энергии электрического разряда и воспламенением газовой смеси. Согласно тепловой теории весь газ может быть воспламенен, если определенный (эквивалентный) сферический объем радиуса $R_{\text{жс}}$ будет нагрет до температуры воспламенения ($T_{\text{восп}} = 2100\text{K}$ для 8.62% метановоздушной смеси). Воздействие такого источника на взрывоопасную смесь (ВС) сводится к ее нагреву, развитию ядра пламени, а затем к достижению этим ядром пламени некоторых минимальных размеров, при которых реакция горения становится самоподдерживающейся. Тогда весь окружающий разряд взрывчатый газ воспламенится, если даже источник поджигания прекратит существование.

Математическая модель электрического зажигания взрывоопасной атмосферы, следовательно, может представлять собой систему уравнений в рамках тепловой теории зажигания [4], описывающую процессы теплопроводности, химической кинетики, а также учитывающую связь между значениями относительной концентрации горючего в любой точке пространства и значениями температур в этих точках, и содержащую внутренние источники тепла в столбе разряда.

Ввиду необходимости учета большого количества факторов, введем ряд упрощений и допущений:

1. Пренебрегаем влиянием электродов (достаточно быстро размыкающаяся цепь);
2. Считаем, что в областях, не занятых искрой, тепловые свойства газовой смеси подчиняются аппроксимирующим зависимостям, полученным по данным [5];
3. Распределение температуры определяется решением нестационарного уравнения теплопроводности в сферических координатах.
4. Дуговой столб имеет цилиндрическую форму, а температура по радиусу столба изменяется в соответствии с рассчитанной по «методу источников» [6];
5. При скорости движения пламени менее скорости звука можно пренебречь зависимостями параметров газовой смеси от давления [8].

Изложение основного материала исследований. Для разработки модели электрического зажигания газовой смеси применяется уравнение (1) с тепловыми источниками в виде эквивалентной мощности, выделяющейся при экзотермической реакции (Q), а также электрического разряда с заданной тепловой мощностью на единицу объема P_0 :

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + Q(t, R, F) + P_0(t, R), \quad (1)$$

где c [Дж/кг·К], ρ [кг/мм³] – теплоемкость и плотность газовой смеси; λ [Вт/мм·К] – коэффициент теплопроводности; Q – мощность теплового источника экзотермической реакции; P_0 [Вт/мм³] – мощность искрово-

го разряда; R – сферическая координата; T [К] – мгновенное значение температуры в момент времени t [мкс]; F – доля выгоревшего метана по отношению к его начальной концентрации.

Рассмотрим кинетику химической реакции горения метановоздушной смеси. Известно, что в качестве основного постулата химической кинетики принято положение, что скорость реакции пропорциональна произведению концентрации реагирующих веществ в данный момент времени. Для случая бимолекулярной реакции:

$$W = -\frac{dn_A}{dt} = -\frac{dn_B}{dt} = p n_A n_B d_{cp}^2 \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \sqrt{\frac{8\pi RT}{M_{кр}}}, \quad (2)$$

где W – скорость реакции, [молекул/см³·сек];

n_A, n_B – количество молекул веществ А и В в 1 см³;

$d_{cp} = \frac{d_A + d_B}{2}$ – средний эффективный диаметр сталкивающихся молекул, см;

$M_{кр} = \frac{M_A M_B}{M_A + M_B}$ – приведенный молекулярный вес;

$p \approx 1$ – вероятностный коэффициент;

E – энергия активации, [кал/моль];

$R = 1.987$, [кал/моль·К].

Если концентрация компонента C_i выражается в [г-моль/л], то получим $n_i = C_i \frac{N}{100}$, $N = 6.02 \cdot 10^{26}$. В результате для W имеем:

$$W = -\frac{dC_A}{dt} = 2.74 \cdot 10^{25} \cdot d_{cp}^2 p C_A C_B \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \sqrt{\frac{T}{M_{кр}}}, \quad [\text{г-моль/л-сек}]. \quad (3)$$

Константа “ E ” в данной газовой смеси принимается по рекомендации [4].

Данные для расчетов по (3) можно выбрать из табл. 1

Таблица 1

	водород	метан	кислород	воздух
d_{cp} , см	$2.74 \cdot 10^{-8}$	$4.14 \cdot 10^{-8}$	$3.61 \cdot 10^{-8}$	$3.72 \cdot 10^{-8}$
M	2.016	16.03	32	28.96

В итоге скорость реакции окисления метана:

$$W = 2.95 \cdot 10^{11} \sqrt{T} \cdot d_{cp}^2 C_A C_B \cdot e^{-\frac{30196}{T}}, \quad [\text{г-моль/мм}^3 \cdot \text{сек}].$$

Количество тепла, выделяющегося в единице объема:

$$Q = q \cdot W, \quad [\text{Вт/мм}^3],$$

где $q = 889.5 \cdot 10^3$ Дж/моль – удельная тепловая способность реакции.

В выражении (3) необходимо учесть выгорание в процессе реакции реагирующих компонентов и, следовательно, уменьшение их концентрации. При этом, исходя из уравнения реакции $CH_4 + 2O_2 = 2H_2O + CO_2$, текущая концентрация метана составит $C_A = C1 - FC1$, а кислорода $C_B = C2 - 2 \cdot FC1$ ($C1$ и $C2$ – начальные концентрации метана и кислорода).

Количество тепла, выделяющееся в m -й точке в k -тый момент времени зависит от доли выгоревшего компонента $f_{m,k}$. На $(k-1)$ -ом шаге по времени в m -той точке:

$$f_{m,k} = \frac{\Delta T_{m,k-1}}{T_M}, \quad (4)$$

где T_M – температура при полном сгорании компонента.

Суммарная доля сгоревшего компонента в m -той точке k -того шага по времени может быть найдена путем последовательного суммирования:

$$F_{m,k} = \sum_{s=1}^k f_{m,s}, \quad (5)$$

Моделирование зажигания газовой смеси должно учитывать, что на развитие очага влияет характер распределения температур в створе разряда при заданной мощности P_0 . Предварительные исследования различных моделей для расчета температуры электрической дуги [6] показали, что удовлетворительные результаты могут быть получены приближением к цилиндрической форме столба дуги. Отвод теплоты внутри столба осуществляется лишь теплопроводностью. Затем применим “метод источников” [6], предполагающий линейность уравнений (считается, что тепловые параметры дугового газа – неизменны).

Далее искровой разряд заменяется непрерывным линейным источником тепла мощностью P_0 , действующим, начиная с момента времени $t'=0$ до $t'=t$. Данный источник вносит в элемент объема в виде бесконечной длинной призмы с основанием $dx dy$ и осью, расположенной параллельно оси z , количество тепла Q_1 на единицу длины. Температура элемента повысится на $Q_1/c\gamma dx dy$. Распространение теплоты от линейного источника представляем в виде наложенных процессов бесконечного количества точечных источников, распределенных по оси z и вносящих элементарные количества теплоты $dQ=Q_1 dz$.

Для неограниченного тела нестационарному уравнению теплопроводности удовлетворяет решение:

$$T(r,t) = \frac{Q_1}{c\gamma(4\pi \cdot at)^{3/2}} e^{-r^2/4at}, \quad (6)$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ – сферический радиус-вектор; c – удельная теплоемкость газа; a – коэффициент температуропроводности.

Выражение (6) представляет решение уравнения теплопроводности для мгновенного точечного источника теплоты. Согласно принципу наложения решение уравнения нестационарной теплопроводности:

$$T(r,t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{Q_1 dz}{c\gamma(4\pi \cdot at)^{3/2}} e^{-\frac{x^2+y^2+z^2}{4at}} = \frac{Q_1}{4\pi\lambda t} e^{-\frac{r^2}{4at}}, \quad (7)$$

(7) является решением для условий нагрева мгновенным линейным источником. Процесс распространения тепла от непрерывно действующего источника на расстоянии r от оси для выделяемого в единицу времени количества теплоты P_0 определяется по методу наложения:

$$T(r,t) = \int_0^t \frac{P_0(t') dt'}{4\pi\lambda(t-t')} e^{-\frac{r^2}{4a(t-t')}} \quad (8)$$

где t – суммарное время действующего источника; t' – текущее время.

Если мощность искры неизменна во времени ($P_0 = \text{const}$), тогда решение (8) запишется в виде:

$$T(r,t) = \frac{P_0}{4\pi\lambda} \int_0^t \frac{1}{(t-t')} e^{-\frac{r^2}{4a(t-t')}} dt' \quad (9)$$

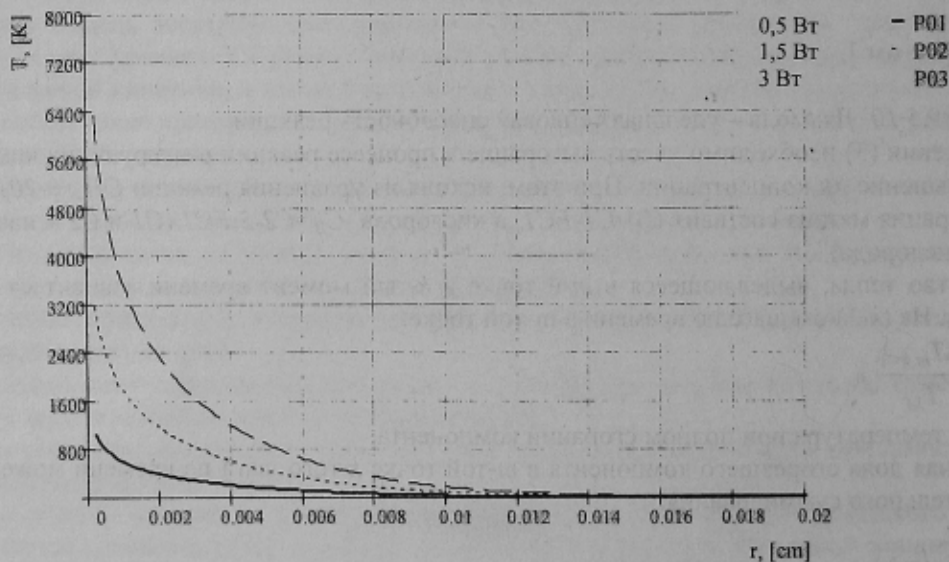
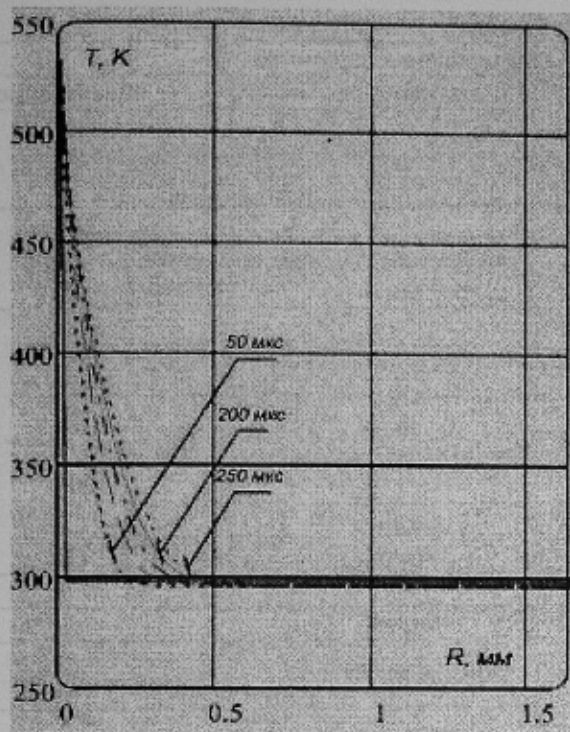
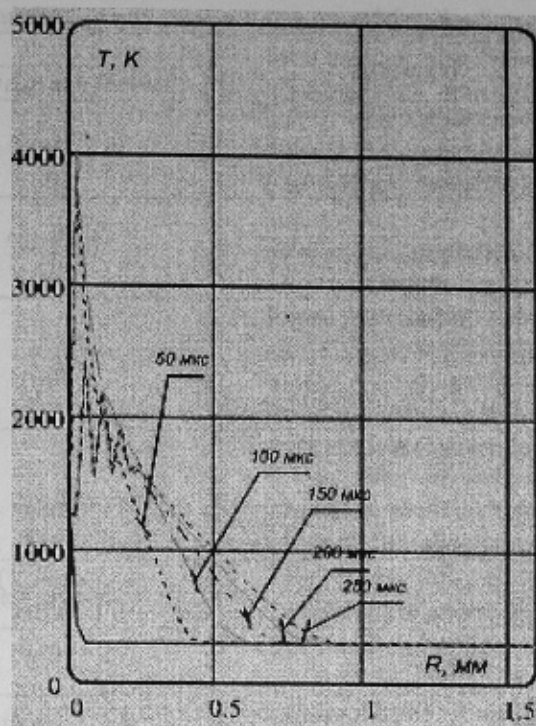


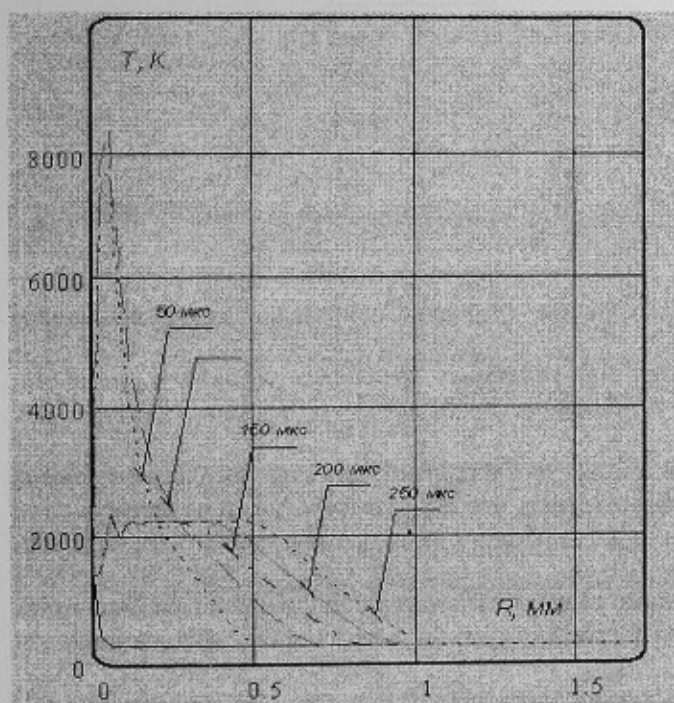
Рисунок 1 – Кривые распределения температуры по радиусу искры в зависимости от количества теплоты P_0 , выделяемой в единицу времени



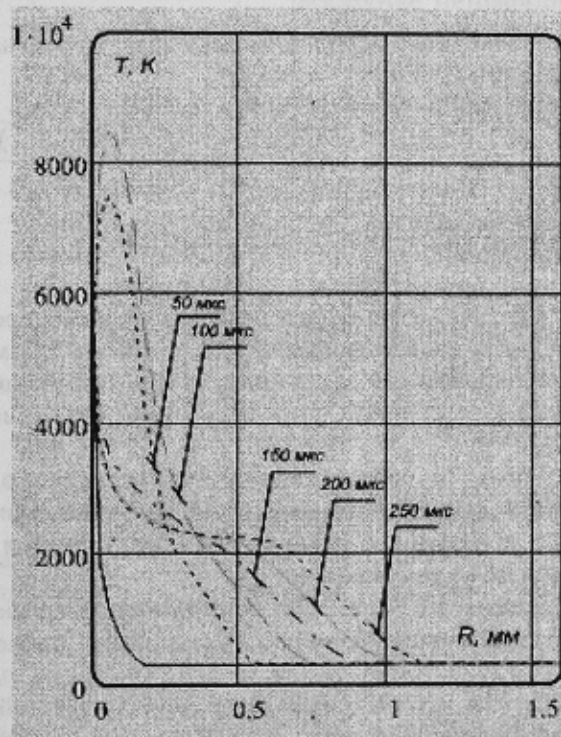
а) 0,1 мДж



б) 0,24 мДж



в) 0,26 мДж



г) 1 мДж

Рисунок 2 – Температура вдоль радиуса очага зажигания в различные моменты времени:
 а) и б) – самоподдерживающаяся химическая реакция не возникла,
 в) и г) – возникновение самоподдерживающейся химической реакции

Выражение (9) вычислялось методами приближенного интегрирования в пакете MathCad12, и формировалось семейство температурных зависимостей (рис.1) при различных мощностях $P_0=0.5; 1.5; \dots$ Вт. Критический радиус цилиндрического дугового столба R_d определялся как граница, за пределами которой $T(r,t) \leq 300\text{K}$.

Приняв во внимание рассмотренные свойства источников теплоты в уравнении (1), получили алгоритм, реализующий на ЭВМ сферическую модель зажигания метановоздушной смеси от маломощного искрового разряда. Укрупненная блок-схема приведена на рис.3, а используемые условные обозначения сведены в табл.2.

Таблица 2 – Коэффициенты и начальные значения параметров модели

Параметр	Характеристика параметра		
	начальное значение	размерность	обозначение
Количество шагов: - по радиусу - по времени	100 500	мм с	M n
Шаг: - по времени - по координате	$0.5 \cdot 10^{-6}$ 3	с мм	τ Δ
Температура химической реакции: - минимальная - максимальная	700 2173	К К	T_1 T_2
Концентрация в газовой смеси: - метана - кислорода	0.062 0.271	г-моль/л г-моль/л	$C1$ $C2$
Диаметр дугового столба	R_d (рис.1)	мм	rsh
Плотность холодного газа	$1.13 \cdot 10^{-9}$	кг/мм ³	ρ
Теплоемкость холодного газа	1340	Дж/кг*К	c
Коэффициент теплопроводности газа	$29.77 \cdot 10^{-6} \cdot (T/273.15)^{1.33}$	Вт/мм*К	λ
Доля выгоревшего компонента	0	-	F

В алгоритме использовалась следующая явная 4-х точечная разностная схема для уравнения теплопроводности [7]:

$$T_{m,k+1} = T_{m,k} + \frac{\tau \cdot D(T_{m-1,k})}{\Delta^2} T_{m-1,k} + \frac{\tau \cdot D(T_{m+1,k})}{\Delta^2} T_{m+1,k} - 2 \frac{\tau \cdot D(T_{m,k})}{\Delta^2} T_{m,k} + \frac{2\tau \cdot D(T_{m+1,k})}{\Delta^2} \times \\ \times \frac{T_{m+1,k} - T_{m,k}}{m} + q(m \cdot \Delta, T_{m,k}, F_m, t) \cdot \tau. \quad (10)$$

где D – коэффициент температуропроводности; q – функция источника, учитывающая одновременное выделение тепла в экзотермической реакции и плазме дуги.

Исследование зажигания метановоздушной смеси. Для указанных начальных условий и различных значений P_0 и времени разряда t_p определяли температуру пламени. Характерны три группы графиков (см. рис.2а-г).

Первая группа (рис.2а) соответствует случаю, когда температура в центре очага становится соизмеримой с температурой окружающей среды. Нами высказано предположение, что если температура в области занятой плазмой не достигает температуры воспламенения метана (400-500⁰С), то такой режим является безопасным (безыскровая коммутация).

Вторая группа (рис.2б) получена при энергии искрового разряда $P_0 T < 0.26$ мДж. Самоподдерживающаяся химическая реакция не возникает, т.к. фронт пламени с температурой устойчивого горения метановоздушной смеси $T_f = 2173$ К разрушается.

Третья группа (рис.2в,г) представляет устойчивую самоподдерживающуюся химическую реакцию (П-образный фронт пламени).

Следует отметить недостаток рассмотренной явной разностной схемы из-за неустойчивости, в некоторых случаях, решения, которое проявляется в колебательном характере зависимости $T(t)$ (см. рис.2б).

Выводы:

1. Разработана математическая модель очагового зажигания ВС в сферической системе координат, учитывающая процессы теплопроводности, выделение тепла в экзотермической реакции, физические свойства реагирующих компонент, а также начальное распределение температуры по радиусу искрового разряда.

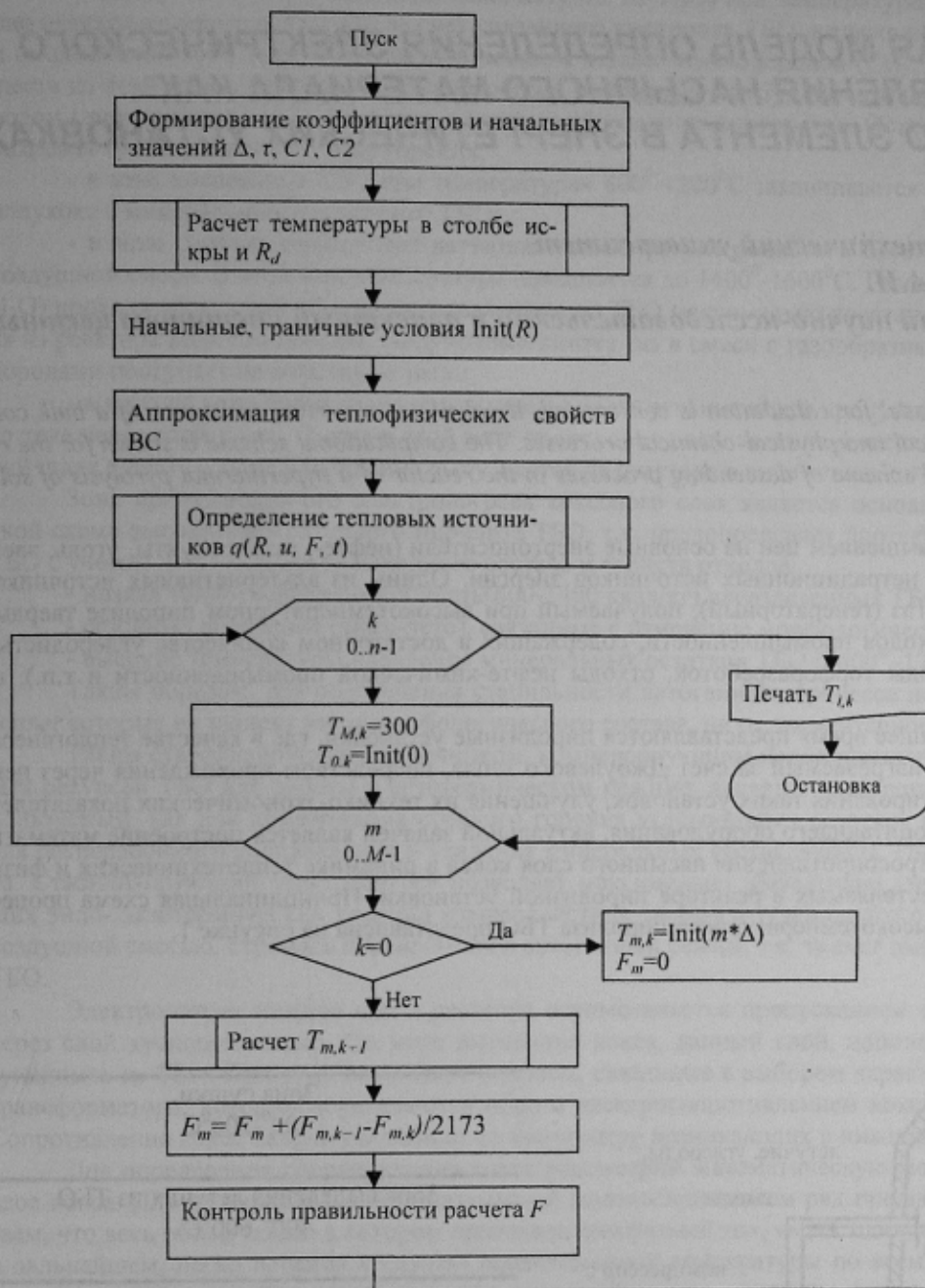


Рисунок 3 – Укрупненная блок-схема алгоритма сферической модели очагового зажигания взрывоопасной газовой смеси

ЛИТЕРАТУРА

1. Лейбов Р.М., Озерной М.И. Электрификация подземных горных работ. - М.: Недра, 1972. – 464 с.
2. Ерыгин А.Т., Трембицкий А.Л., Яковлев В.П. Методы оценки искробезопасности электрических цепей. - М.: Наука, 1984. -256 с.
3. Взрывобезопасность электрических разрядов и фрикционных искр / Под ред. В.С. Кравченко и В.А. Бондаря. - М.: Недра, 1976. -301 с.
4. Щетинков Е.С. Физика горения газов. - М.: Наука, 1965. -770 с.
5. Загорученко В.А., Журавлев А.М. Теплофизические свойства метана. - М.: Издат. стандартов, 1969.
6. Таев И.С. Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения. - М.: Энергия, 1973. -424 с.
7. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. - М.: Наука, 1989. -432 с.
8. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. – М.: Мир, 1968 – 592 с.

Рекомендовано проф., д.т.н. Ковалевым А.П.

2. Решение полученных систем уравнений выполнено на основе алгоритма численного расчета на ЭВМ, позволяющего рассмотреть возникновение устойчивого фронта пламени в зависимости от времени существования и мощности разряда.

3. Установлены минимальные параметры, формирующие ядро пламени с учетом допущений об отсутствии влияния электродов и скорости их размыкания – энергия разряда 0,26 мДж, время разогрева смеси до критического объема – 100..150 мкс.

4. Удовлетворительная адекватность рассмотренной сферической модели позволяет использовать ее в качестве базовой при разработке методов оценки искробезопасности электрического зажигания ВС.