

## Математическая модель вепольного горения жидкого топлива

Громцев С.А.

Санкт-Петербургский Государственный университет  
низкотемпературных и пищевых технологий

*В диапазоне напряженности поля от 20 до 40 кВ/м, что наиболее приемлемо для тепловых аппаратов малой теплопроизводительности, повышение массовой скорости горения составляет от 25 до 50 % и более, что позволяет в зависимости от необходимости или значительно уменьшить размеры топочных камер, или увеличить расход топлива и теплопроизводительность установки с сохранением ее размеров. Оба варианта использования вепольного эффекта имеют большое значение для стационарных и мобильных тепловых установок.*

Ключевые слова: математическая модель, жидкое топливо, горение.

Как показал анализ состояния исследований процесса горения жидкого топлива, наиболее приемлемой математической моделью процесса является следующее выражение:

$$m = (4\pi\lambda r_l / C_p) \times \ln \{ 1 + 1/L [C_p(T - T_B) + q_0 Y_{0,l} / W_0 v_0] \}, \quad (1)$$

так как оно полностью согласуется с постулативными утверждениями, характеризующими количество вещества, подаваемого в зону реакции для поддержания горения, и скорость его убывания.

Одновременно выражение (1) показывает зависимость массовой скорости горения  $m$  от свойств топлива  $m = f(\lambda/C_p)$ , теплоты реакции его окисления  $q_0$ , теплоты испарения  $L$  и слабую зависимость от температуры горения  $m = f(T - T_B)$  при независимости от давления.

Анализируя (1) представим зависимость массовой скорости горения  $m$  от ряда переменных величин для конкретного вида топлива:

$$m = f(r, \Delta T, Q). \quad (2)$$

С учетом утверждения [1], что скорость горения топлива является функцией скорости химических реакций, т.е.  $m = f(U_H)$ , где  $U_H = f(w, a)$ , а скорость химических реакций — через скорость образования активных центров  $w_0$  по зависимости (2) и с учетом теоретических предпосылок — зависит от параметров электрического поля, получим:

$$m = f(E). \quad (3)$$

С учетом изложенного можно записать, что:

$$m = f(r, \Delta T, Q, E), \quad (4)$$

а в общем случае:

$$m = f(r, \Delta T, Q, E, L, C_p, \lambda), \quad (5)$$

при коэффициенте расхода воздуха  $a = 1$ .

Выражение (5) отражает влияние на массовую скорость горения жидкого топлива в электрическом поле всех воздействующих факторов и может быть представлено как ее математическая модель.

Из анализа выражения (5), с учетом работ [2, 3], видно, что зависимость  $m = f(E)$  определяется зависимостями радиуса  $r$  (а через него общей поверхности капель), температуры горения и теплоты химической реакции горения от напряженности электрического поля, т.е.:

$$m = F[(r=f_1(E), \Delta T=f_2(E), Q=f_3(E), L, C_p, \lambda)]. \quad (6)$$

Из вышеизложенного следует, что математическую модель вепольного горения жидкого топлива в атмосфере окислителя более корректно представить системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} m &= F(r, \Delta T, \theta_0, L, C_p, \lambda), \\ r &= f_1(E), \\ \Delta T &= f_2(E), \\ \theta_0 &= f_3(E), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

С учетом (1), систему (7) можно записать в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} m &= (4\pi\lambda r_1 / C_p) \times \ln \left\{ 1 + 1/L [C_p (T - T_b) + g_0 Y_0 / W_0 v_0] \right\}, \\ r_1 &= C_1 + C_2 [C_3 + C_4 \exp(A_1 E + B_1)], \\ \Delta T &= C_5 + C_6 [C_7 + C_8 \exp(A_2 E + B_2)]^{-1}, \\ g_0 &= C_9 + C_{10} [C_{11} + C_{12} \exp(A_3 E + B_3)]^{-1}. \end{aligned} \right\}$$

Эмпирические коэффициенты  $A_j$ ,  $B_j$  и  $C_j$  определялись экспериментально с использованием при обработке опытных данных, теории подобия, теоремы Гаусса и вычислительной техники на основе моделирования процессов горения в тепловых установках характерных пищевым производствам.

Так как на входе в каналный газосток неизвестной является не только температура потока газов, но и его скорость, то определение реальной температуры осуществлялось согласно решению нелинейного уравнения:

$$g_{и.с.х} - g_{н.т.р} - g_{р.с} - U^2 / 2 - \int_0^{T_m} C_p dT = 0, \quad (8)$$

где  $g_{и.с.х}$  — тепло, вносимое в топку;  $g_{н.т.р}$  — потери тепла в камере сгорания;  $g_{р.с}$  — энергия разрыва связей топлива;  $U^2/2$  — кинетическая энергия потока;

$\int_0^{T_m} C_p dT$  — энтальпия продуктов сгорания.

Уравнение (8) решалось на ЭВМ при условии, что состав топлива и воздуха, их расход и температура на протяжении одного эксперимента были неизменны. Исходя из формулы (8) и на основании выдвинутых ранее теоретических предпосылок можно утверждать, что прирост температуры сгорания топлива при наложении электрического поля произошел за счет уменьшения энергии разрыва межмолекулярных связей топлива  $g_{p.c.}$  под воздействием энергии наложенного электрического поля. Из рисунка 1 следует, что при увеличении напряженности электрического поля, наложенного на факел пламени, температура горения возрастает и для мазута составляет 180—190°С при увеличении  $E$  до 50 кВ/м. Путем аппроксимации данных эксперимента были получены эмпирические зависимости прироста температуры горения от напряженности наложенного электрического поля:

$$\Delta T_k = 1,6 \times 10^2 - 1,5 \times 10^2 / \{1 + \exp[0,22(E - 29,2)]\} \quad (9)$$

для горения дизельного топлива:

$$\Delta T_o = 1,8 \times 10^2 - 1,7 \times 10^2 / \{1 + \exp[0,22(E - 27,5)]\} \quad (10)$$

для горения мазута:

$$\Delta T_m = 1,95 \times 10^2 - 1,91 \times 10^2 / \{1 + \exp[0,30(E - 25,1)]\} \quad (11)$$

Удельная теплота химических реакций или теплопроизводительность топлива определялась калориметрированием топок по стандартным методикам. Результаты калориметрирования показали, что при горении керосина прирост теплопроизводительности составляет 7—8, дизтоплива 8—9, а мазута 10—12 кДж/кг (рис.2).

При аппроксимации данных калориметрирования получены зависимости прироста удельной теплоты химических реакций от напряженности электрического поля.

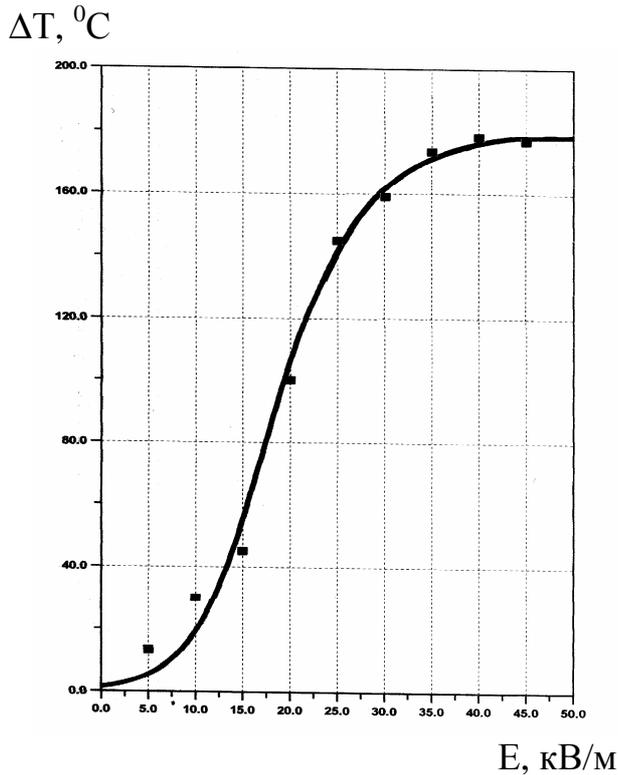


Рис. 1. Прирост температуры горения мазута.

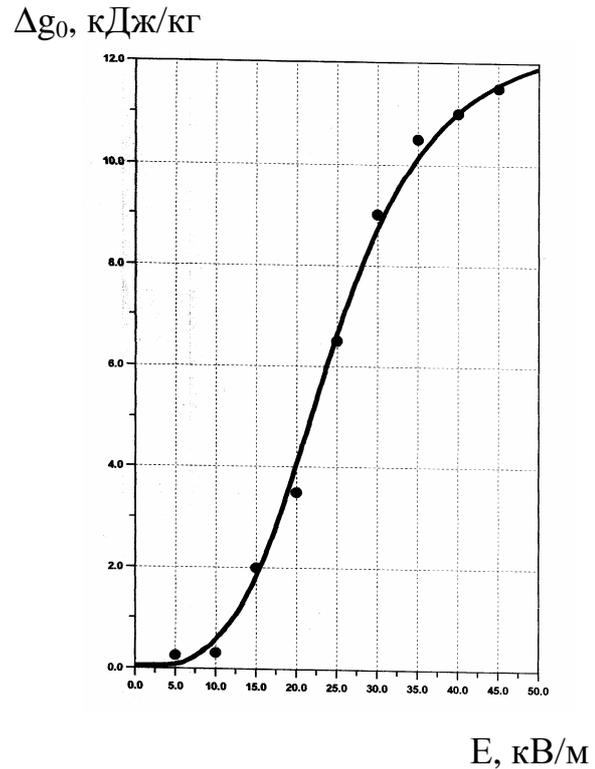


Рис. 2. Прирост удельной теплоты сгорания мазута.

В случае сжигания керосина зависимость имеет вид:

$$\Delta g_{ок} = 7,7 - 7,5 / \{1 + \exp[0,20(E - 24)]\}; \quad (12)$$

в случае сжигания дизельного топлива:

$$\Delta g_{од} = 8,9 - 8,8 / \{1 + \exp[0,20(E - 23)]\}; \quad (13)$$

в случае сжигания мазута:

$$\Delta g_{ом} = 10,2 - 10,3 / \{1 + \exp[0,21(E - 20)]\}. \quad (14)$$

Изменение радиуса капли топлива замеряли в соответствии с [3], в результате аппроксимации получили следующие уравнения: для керосина:

$$r_k = 5,4 \times 10^{-8} + 9,6 \times 10^{-5} \exp(-0,038E); \quad (15)$$

для дизельного топлива:

$$r_d = 1,7 \times 10^{-5} + 1,8 \times 10^{-4} \exp(-0,028E); \quad (16)$$

для мазута:

$$r_m = -1,6 \times 10^{-5} + 5,2 \times 10^{-4} \exp(-0,015E). \quad (17)$$

Результаты расчетов представлены в виде графика на рис. 3.

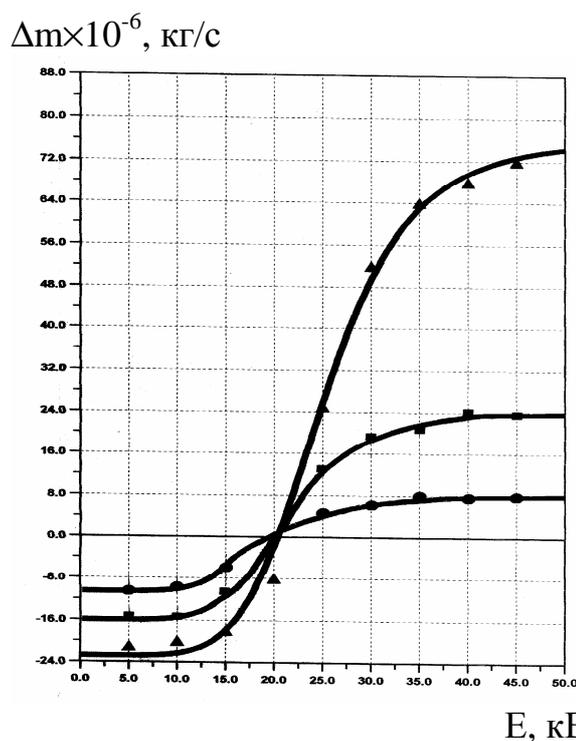
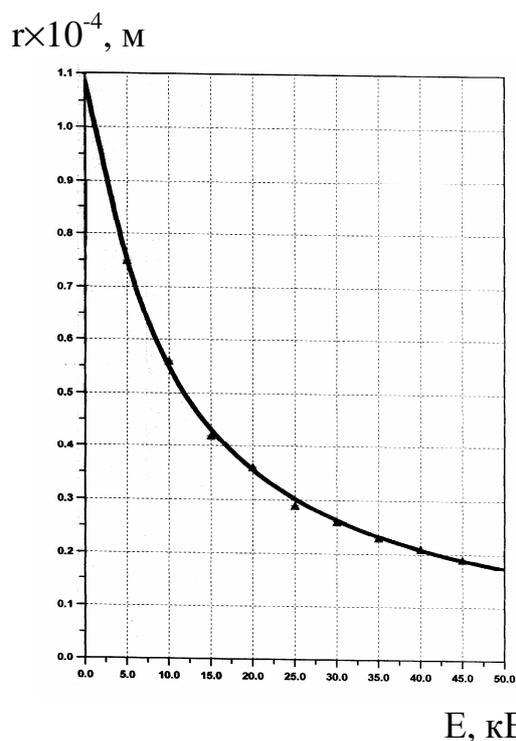


Рис. 3. Диспергирование капли мазута.

Рис. 4. Прирост массовой скорости горения: ▲ — мазут, ■ — диз. топливо, ● — керосин.

Из анализа состояния исследований процесса горения жидкого топлива, следует, что одной из важных характеристик этого процесса является массовая скорость горения топлива. В отношении форсуночных устройств данная характеристика в значительной степени соответствует понятию «расход топлива» и имеет размерность [кг/с]. При контрольном разогреве теплового устройства с помощью запорной арматуры и приборов контроля за расходом топлива устанавливался стандартный (паспортный) расход топлива, при этом фиксировались размеры факела (главным образом длина) и сопоставлялись с размерами топки. Для этого топка по длине имела несколько смотровых люков.

При работе теплового устройства по вепольной технологии, когда размеры факела изменились, их доводили до стандартных значений путем увеличения или уменьшения величины подачи топлива. Показания расходомеров фиксировались в журнале наблюдений. Таким образом, осуществлялся замер расхода жидкого топлива, в условиях эксперимента соответствующий массовой скорости горения.

В экспериментах производился замер массовой скорости горения жидких топлив, а именно: керосина и дизельного топлива на ПХП-4, мазута на ФТЛ-2, в диапазоне напряженности поля от 5 до 50 кВ/м. Результаты экспериментов показывают, что в указанном диапазоне массовая скорость горения керосина возрастает на 9 кг/ч, дизельного топлива — на 10 кг/ч и мазута — на 13 кг/ч, что в пересчете составит  $8 \times 10^{-6}$ ,  $24 \times 10^{-6}$  и  $76 \times 10^{-6}$  кг/ч соответственно, с учетом диспергирования топлива (рис. 4).

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что при вепольном сжигании жидкого топлива с повышением напряженности электрического поля массовая скорость горения факела и капель топлива повышается, причем интенсивность указанного процесса возрастает с увеличением вязкости топлива и понижением других качественных характеристик.

Графики подтверждают тот факт, что, во-первых, оптимальным является диапазон напряженности электрического поля от 20 до 40 кВ/м, а во-вторых, полученный эффект обратно пропорционален качеству топлива.

Математическая модель горения мазута в атмосфере окислителя при нормальном атмосферном давлении после определения коэффициентов аппроксимации будет выглядеть следующим образом (18) (рис.2):

$$\left. \begin{aligned} m &= (4\pi\lambda r_1 / C_p) \times \ln \left\{ 1 + 1/L [C_p (T - T_b) + g_0 Y_0 / W_0 v_0] \right\} \\ r_M &= -1,6 \times 10^{-0,5} + 5,2 \times 10^{-0,4} \exp(-0,015 E), \\ \Delta T_M &= 1,9 \times 10^2 - 1,9 \times 10^2 / \{1 + \exp[0,30(E - 25,1)]\}, \\ g_{0M} &= 10,2 \times 10^0 - 10,3 \times 10^0 / \{1 + \exp[0,21(E - 20,0)]\}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Зона отрицательного эффекта при напряженности от 0 до 20 кВ/м (рис. 4) объясняется затратой энергии на превращение поступательного движения ионов в колебательное с частотой поля и затратами энергии на переориентацию дипольных молекул в соответствии с силовыми линиями поля. Массовая скорость вепольного горения жидких топлив в зависимости от напряженности электрического поля при уменьшении радиуса капли определялась по формуле (1), причем  $T$  и  $q_0$  определялись экспериментально.

В диапазоне напряженности поля от 20 до 40 кВ/м, что наиболее приемлемо для тепловых аппаратов малой теплопроизводительности, повышение массовой скорости горения составляет от 25 до 50% и более, что позволяет в зависимости от необходимости или значительно уменьшить размеры топочных камер, или увеличить расход топлива и теплопроизводительность установки с сохранением ее размеров. Оба варианта использования вепольного эффекта имеют большое значение для стационарных и мобильных тепловых установок.

## Список литературы

1. Вулис Л.А. Перекисная теория горения./М.: Госэнергоиздат, 1954 г.
2. Вильямс Ф.А. Теория горения./ М.: Наука, 1971 г.
3. Громцев С.А. Вепольные технологии повышения эффективности энергетических источников техники тыла./Л.: ВАТТ, 1995 г.