

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОБМЕНА КАПЕЛЬ ЭМУЛЬГИРОВАННОГО ТОПЛИВА ШИРОКОГО ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА

И.Г. Мироненко

В основу описания процесса прогрева и испарения капли водотопливной эмульсии (ВТЭ) широкофракционного состава положена математическую модель, разработанная в Новосибирской государственной академии водного транспорта. Введены некоторые коррективы, связанные с широким фракционным составом топлива. В математическую модель добавлена формула Исакова А.Я. для определения температуры перегрева воды в каплях ВТЭ. Предложено математическое описание условий возникновения второго и последующих микровзрывов.

В [1, 2, 3 и др.] рассмотрены процессы теплообмена капель ВТЭ топлив достаточного узкого фракционного состава. При этом расчёты ведутся по определённым физико-химическим параметрам топлива. Если дисперсионная среда имеет широкий фракционный состав, то такой подход малоприемлем, что убедительно показано в [4]. В данной работе делается попытка рассмотреть особенности процессов прогрева и испарения капель ВТЭ, которые могут быть вызваны широким фракционным составом базового топлива. Сформулируем задачу. При этом, будем опираться на исследования [3, 5].

Предположим, что капля ВТЭ с начальной температурой T_{m0} помещена в возмущённую газовую среду. Параметры последней (давление P_1 , температура T_1 , частота f и амплитуда A пульсаций скорости движения, а также закономерности изменения этой скорости) будем считать известными. Допустим далее, что $T_1 \gg T_{m0}$. Последнее вызовет интенсивный теплообмен между газом и каплей. При этом будет происходить следующая цепочка процессов [3]:

1. Прогрев частицы эмульсии до температуры T_{II} перегрева воды. В течение этого периода будет происходить интенсивный процесс испарения легких фракций;

2. Первый «микровзрыв»;

3. Прогрев и испарение топлива, испарение воды в капле, перегрев образующихся водяных паров. Данный процесс продолжается до момента, когда объём капли достигнет критического объёма;

4. Второй «микровзрыв» и т.д.

В соответствии с описанной выше физической картиной процесса теплообмена капли ВТЭ разделим последний на j периодов: $j = 1$ - период от начала прогрева частицы до первого «микровзрыва»; $j = 2$ - период между первым и вторым «микровзрывами»; $j = 3$ - период между вторым и третьим «микровзрывами» и т.д. Используя [3 и 4], опишем эти явления.

В основу описания процесса прогрева и испарения капли ВТЭ при $j = 1$ положим математическую модель, разработанную в [3]. Однако введём некоторые коррективы [5], связанные с широким фракционным составом топлива. При этом все определяемые величины первого и последующих процессов отметим, соответственно, цифрой 1 и буквой j .

Рассматриваемый процесс может быть описан следующей системой уравнений.

Уравнение движения газовой среды

$$V_1 = A \sin 2\pi f \tau, \quad (1)$$

где V_1 - текущее значение скорости движения газовой среды;

A, f - соответственно амплитуда скорости и частота колебаний газовой среды;

τ - текущее время.

Уравнение движения центра масс твёрдого шара [6]

$$\frac{\pi \rho_3 d_{k1}^3}{6} \cdot \frac{\partial \omega_1}{\partial \tau} = \psi_1 F_M \rho_1 \frac{(V_1 - \omega_1)}{2}, \quad (2)$$

где d_{k1} - текущий диаметр капли ВТЭ;

ρ_1, ρ_3 - соответственно плотности газовой среды и ВТЭ;

ω_1 - скорость движения капли;

ψ_1, F_M - соответственно коэффициент сопротивления и модель капли.

Согласно [6], величина ψ_1 определяется следующим выражением:

$$\psi_1 = \frac{14}{\sqrt{\text{Re}}},$$

где число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{|V_1 - \omega_1| \cdot d_{k1}}{\nu_1} = \frac{|V_1 - \omega_1| \cdot d_{k1} \cdot \rho_1}{\mu_1}.$$

Уравнение баланса теплоты для капли ВТЭ широкофракционного состава (ШФС) запишется так:

$$-\sum_1^n \Delta i_i \frac{\partial M_{mi1}}{\partial \tau} + \left(\sum_1^n M_{mi1} C_{mi1} \right) \frac{\partial t_{m1}}{\partial \tau} + \frac{1}{6} \rho_{B1} \cdot \pi \cdot d_{k1}^3 \cdot C_{B1} \cdot S_{B1}^* \cdot \frac{\partial t_{m1}}{\partial \tau} = \pi \lambda_1 d_{k1} (T_1 - T_{m1}) \cdot Nu_{cm1}^* \cdot [1 + F_1 \cdot F_2], \quad (3)$$

где

Δi_i - разность энтальпий пара и жидкости для i -го компонента топлива ШФС;

M_{mi1}, C_{mi1} - масса и теплоёмкость i -той фракции топлива ШФС;

λ_1 - коэффициент теплопроводности парогазовой среды;

F_1, F_2 - безразмерные параметры, которые определяют собой влияние на исследуемый процесс обдува капли и оттока от неё паров топлива;

$\rho_{B1}, C_{B1}, S_{B1}^*$ - соответственно плотность, теплоёмкость и безразмерная объёмная доля воды;

T_{m1} - температура капли ВТЭ.

Осреднённый критерий Нуссельта без обдува капли

$$Nu_{cm1}^* = \sum_1^n (Nu_{cmi1} \cdot S_{mi1}), \quad (4)$$

где

S_{mi1} - безразмерная концентрация i -той фракции топлива в дисперсионной среде.

Число Нуссельта для i -го компонента топлива ШФС

$$Nu_{cmi1} = \frac{2 \chi_i}{\left(\frac{1}{1 - C_{0i1}} \right)^{\chi_i} - 1} \ln \frac{1}{1 - C_{0i1}}, \quad (5)$$

где

$$\chi_i = \frac{\rho_{cmi} D_{ni1}}{\lambda_{cmi} / C_{p_{cmi}}};$$

D_{ni1} - коэффициент диффузии паров i -той фракции топлива;

$\rho_{cmi}, \lambda_{cmi}, C_{p_{cmi}}$ - соответственно плотность, коэффициент теплопроводности, теплоёмкость смеси воздуха и паров i -го компонента топлива ШФС;

C_{0i1} - концентрация паров i -го компонента топлива ШФС на поверхности капли.

Связь между концентрациями находим так:

$$\sum_1^n S_{mi1} = 1;$$

$$S_{B1} + S_{m1}^* = 1,$$

где

S_{mi1} - безразмерная концентрация i -той фракции в топливе;

S_{m1}^* - безразмерная концентрация топлива во ВТЭ;

S_{B1} - безразмерная концентрация воды во ВТЭ.

Параметры F_1 и F_2 (уравнение 3) можно оценить по формулам [6].

$$F_1 = \left[\frac{d_{k1} \cdot \rho_1}{\mu_1} \cdot (V_1 - \omega_1) \right]^{0,5}, \quad (6)$$

$$F_2 = 0,51 \left[2 \cdot Nu_{cm1}^* \left(\frac{1}{1 - C_{01}^*} \right)^{\chi} \right]^{-0,5}, \quad (7)$$

где

$$C_{01}^* = \sum_1^n C_{0i1} \cdot S_{mi1} \quad (8)$$

Величину коэффициента D_{ni1} определим как

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССООБМЕНА КАПЕЛЬ
ЭМУЛЬГИРОВАННОГО ТОПЛИВА ШИРОКОГО ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА

$$\rho_1 D_{ni1} = \rho_{10} \cdot D_{n0i} \cdot \frac{1 + t_2/273}{1 - \left(1 - \frac{1}{\bar{M}_i}\right) \cdot C_{0i1}}, \quad (9)$$

где

ρ_{10}, D_{n0i} - плотность воздуха и коэффициент диффузии паров i -той фракции топлива ШФС при нормальных условиях;

$$\bar{M}_i = \frac{M_{mi}}{M_B},$$

где M_{mi}, M_B - молекулярные массы i -го компонента топлива и воздуха.

Массовую безразмерную концентрацию паров топлива на поверхности капли будем находить по формуле

$$C_{0i1} = \frac{\bar{M}_i \cdot \delta_{ni}^* / \delta_{i1}}{1 + (\bar{M}_i - 1) \cdot \delta_{ni}^* / \delta_{i1}}, \quad (10)$$

$$\text{где } \delta_{ni}^* = \frac{p_{ni}^*}{p_{Ki}};$$

p_{ni}^* - парциальное давление пара i -той фракции топлива на поверхности капли;

p_{Ki} - критическое давление i -той фракции топлива ШФС;

$$\delta_{i1} = \frac{p_1}{p_{Ki}};$$

p_1 - давление среды.

Величину δ_{ni}^* будем определять по выражению

$$\delta_{ni}^* = \bar{Z}_i \cdot \delta_{i1} + (1 - \bar{Z}_i) \cdot \delta_{ni}, \quad (11)$$

где

$\bar{Z}_i = 1 - (1 - \delta_{ni})^{0,2}$ - приведённая сжимаемость жидкости в состоянии насыщения;

$$\delta_{ni} = \frac{p_{ni}}{p_1};$$

p_{ni} - парциальное давление паров i -той фракции топлива при низких давлениях среды.

Определение величины δ_{ni} будем производить по одному из решений уравнения Клапейрона – Клаузиуса

$$\ln \delta_{ni} = -\frac{2Wa_i}{3} \cdot \frac{1 - g_i^*}{g_i^*}, \quad (12)$$

где

Wa_i - критерий Ватсона для i -той фракции топлива;

$$g_i^* = \frac{T_{m1}}{T_{Ki}};$$

T_{Ki} - критическая температура i -той фракции топлива,

Параметр Δi_i оценим по формуле

$$\Delta i_i = R_{ni} \cdot Wa_i \cdot T_{Ki} \cdot (1 - g_i^*)^{2/5}, \quad (13)$$

где

R_{ni} - газовая постоянная пара i -той фракции топлива;

Теплоёмкость топлива будем определять по известной зависимости Крега

$$C_{mi1} = C_{m0i} (1 + 0,002 \cdot t_{m1}), \quad (14)$$

где

C_{m0i} - теплоёмкость i -той фракции топлива при температуре 0°C.

Плотность и теплоемкость «парогаза» оценим по известным выражениям

$$\rho_{см} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{p_{ni}^*}{R_{ni} \cdot T_{1cp}} + \frac{p_1 - \sum_{i=1}^n p_{ni}^*}{R_B \cdot T_{1cp}}, \quad (15)$$

$$C_{рсм} = \sum_{i=1}^n C_{pni} \cdot C_{0i1} + C_{pB} \cdot (1 - C_{01}^*), \quad (16)$$

где

R_B - газовая постоянная воздуха;

C_{pni}, C_{pB} - теплоёмкости паров i -той фракции топлива и воздуха.

Изобарная теплоёмкость топливных паров определяется зависимостью

$$C_{pni} = C_{pni0} \cdot (1 + 0,0012 \cdot t_{1cp}), \quad (17)$$

где

C_{pni0} - изобарная теплоёмкость паров топлива при 0°C;

$$t_{1cp} = T_{1cp} - 273.$$

Плотность воздуха оценим по формуле

$$\rho_1 = \rho_{10} \cdot \left(\frac{p_1}{p_{10}} \right) \cdot \left(\frac{T_{10}}{T_1} \right), \quad (18)$$

где

$\rho_{10}, p_{10}, T_{10}$ - плотность, давление и температура воздуха, соответствующая нормальным условиям.

Коэффициент теплопроводности «парагаза» может быть принят равным теплопроводности воздуха, которая определяется зависимостью [6]

$$\lambda_1 = \lambda_{10} \cdot \left(\frac{T_{1cp}}{273} \right)^{0,82}, \quad (19)$$

где

λ_{10} - коэффициент теплопроводности воздуха при 0°C.

Коэффициент динамической вязкости воздушной среды найдём по выражению [7]

$$\mu_1 = \mu_{10} \cdot \left(\frac{T_{1cp}}{273} \right)^m, \quad (20)$$

где

μ_{10} - динамическая вязкость воздуха при 0°C;

m - опытный коэффициент;

$$T_{1cp} = \frac{T_1 + T_{m1}}{2} - \text{средняя температура}$$

«парагаза».

Плотность эмульсии

$$\rho_{\Sigma} = (1 - S_{B1}) \sum_1^n (\rho_{mi1} \cdot S_{mi1}) + \rho_B \cdot S_{B1}, \quad (21)$$

где

ρ_{mi1}, ρ_B - соответственно плотности i -го компонента ТШФС и воды;

S_{mi1}, S_{B1} - объёмные доли i -го компонента ТШФС в дисперсионной среде и воды во ВТЭ.

Уравнение баланса массы фракций топлива ШФС

$$\frac{\partial M_{mi1}}{\partial \tau} = -2\pi d_{K1} \rho_{cm1} S_{mi1} D_{ni1} \ln \frac{1}{1 - C_{0i1}} (1 + F_1 F_2). \quad (22)$$

Объёмы фракций ТШФС в капле определяются так

$$V_{mi1} = \frac{M_{mi1}}{\rho_{mi}}, \quad (23)$$

где

ρ_{mi} - плотность i -той фракции ТШФС.

Суммарный объём капли будет равен

$$V_{K1} = \sum_1^n V_{mi1} + V_{B1}, \quad (24)$$

где

V_{B1} - объём воды в капле.

Диаметр капли

$$d_{K1} = \sqrt[3]{\frac{6V_{K1}}{\pi}}. \quad (25)$$

Объёмные концентрации фракций в дисперсионной среде

$$S_{mi1} = \frac{V_{mi1}}{V_{K1} - V_{B1}}. \quad (26)$$

Уравнение перемещения капли

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} = \omega_1 \partial \tau. \quad (27)$$

Объёмная концентрация воды в капле ВТЭ

$$S_{B1} = \frac{V_{B1}}{V_{K1}}, \quad (28)$$

где

V_{B1} - объём воды в капле.

Объёмная суммарная концентрация топлива в капле

$$S_{m1}^* = \frac{\sum_1^n V_{mi1}}{V_{K1}}. \quad (29)$$

Объём воды в капле ВТЭ

$$V_{B1} = \frac{\pi d_{K0}^3}{6} \cdot S_{B10}, \quad (30)$$

где

S_{B10} - объёмная начальная концентрация воды во ВТЭ.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОБМЕНА КАПЕЛЬ ЭМУЛЬГИРОВАННОГО ТОПЛИВА ШИРОКОГО ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА

Исходные параметры воздуха оценим следующим образом:

1. Динамическая вязкость при 0°С

$$\mu_{10} = 1,71 \cdot 10^{-5}, \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}.$$

2. Плотность при нормальных условиях

$$\rho_{10} = 1,293 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

3. Изобарная теплоёмкость воздуха принимается постоянной и равной

$$C_{pB} = 1,0 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = 0,24 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

4. Коэффициент теплопроводности воздуха

$$\lambda_0 = 48,9 \cdot 10^{-6} \cdot \left(0,7 + 0,025 \frac{P}{P_0}\right)^{1,25} = 11,7 \cdot 10^{-6} \cdot \left(0,7 + 0,025 \frac{P}{P_0}\right)^{1,25} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}, \quad (31)$$

где

P_{10} - характерное давление, равное 0,1 МПа;

P_1 - давление среды.

5. Опытный коэффициент в формуле (20) $m = 0,683$.

Исходные параметры, которые зависят от топлива, приведены в таблице 1.

Система (1) - (31) замкнута, т.к. состоит из 18+13i уравнений и включает в себя 18+13i неизвестных:

$$V_1, \omega_1, T_{m1}, Nu_{св1}^*, Nu_{св1}, C_{01}^*, F_1, F_2, D_{m1}, C_{011}, \delta_{m1}^*, \delta_{m1}, \Delta t_{i1}, C_{m11}, \rho_{св1}, C_{pсв1}, C_{p1}, \lambda_1, \mu_1, \rho_2, M_{m1}, V_{K1}, V_{св1}, d_{K1}, S_{m1}, H, S_{B1}, S_{m1}^*, V_{B1}, \lambda_{01}.$$

Для решения к указанной системе необходимо применить условия однозначности. В начальные условия войдут: начальные значения скорости движения V_0 газовой среды и

ω_0 частицы ВТЭ. Сюда же войдут начальная температура T_{m0} капли эмульсии, начальные значения её диаметра d_{K10} и пути H_0 , начальные значения концентраций топлива и воды S_{m0}^*, S_{B0} , характеристики возмущения среды A и f .

Таблица 1. Параметры, зависящие от сорта топлива

Сорт топлива	Параметр										
	$\alpha_{т0}, \frac{H}{M}$	$\rho_{m0}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$R_n, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$D_{п0} \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$C_{pп0}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	Wa	$T_k, \text{К}$	$P_k, \text{МПа}$	$C_{т0}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	M_T	\bar{M}
Бензин	0,021	740	80,5	9	1490	10,5	543	2,75	1960	103	3,53
Керосин	0,026	791	53,2	7,1	1460	11	667	2,25	1880	156	5,38
Дизельное	0,030	820	46	6,7	1450	12	710	2,08	1860	185	6,38
Моторное	0,031	905	29	5,5	1420	13	830	1,62	1760	287	9,9
Мазутные фракции	0,032	950	24	3,9	1410	14	895	1,00	1660	374	12,9

Рассмотрим далее математическое описание первого микровзрыва, а затем отметим

характерные отличия остальных. Исходными (начальными) данными для расчёта этого пе-

риода являются конечные значения искомым величин предыдущего периода (j=1), т.е.

$$V_1, \omega_1, H, T_{II}, d_{K1}, V_{m1}, V_{B1}, M_{B1}, S_{m1}^*, S_{B1}, \rho_{\text{Э}}.$$

Будем считать, что первый «микровзрыв» происходит мгновенно при температуре T_{II} перегрева воды. Изменение значений V, ω, H при «микровзрыве» не происходит. Остальные величины будем определять в следующей последовательности:

Объем i -той фракции топлива в капле ВТЭ после «микровзрыва»

$$V_{mi20} = \frac{M_{mi20}}{\rho_{mi}}, \quad (32)$$

где

M_{mi20} - масса топлива i -той фракции ТШФС после первого «микровзрыва» (в начале второго периода)

$$M_{mi20} = M_{miK1} - k_1 \cdot M_{nK1}^* \cdot S_{miK1}, \quad (33)$$

где

M_{miK1} - масса i -той фракции топлива в капле, в конце первого периода ($j = 1$);

M_{nK1}^* - масса водяного пара, ушедшего из капли в результате первого «микровзрыва»;

S_{miK1} - объемная концентрация i -той фракции топлива в капле, в конце первого периода;

k_1 - опытный коэффициент.

Значение M_{nK1}^* найдём так:

$$M_{nK1}^* = M'_n + M''_n, \quad (34)$$

где M'_n, M''_n - соответственно массы пара, которые образуются за счёт перегрева воды и теплоты топлива.

$$M'_n = \frac{C_B \cdot (T_{II} - T_H)}{r} \cdot M_{BK1}, \quad (35)$$

где C_B - теплоёмкость воды;

T_{II} - температура перегрева воды;

T_H - температура насыщения воды при данном давлении среды;

r - удельная теплота парообразования воды;

M_{BK1} - масса воды в капле ВТЭ в конце первого периода (до «микровзрыва»).

Величины γ и C_B берутся по рекомендациям [8].

В [10] показано, что температура перегрева воды в каплях эмульгированного топлива удовлетворительно описывается формулой предложенной Исаковым А.Я. в [11]:

$$T_{II} = \frac{k_2 T_K}{\ln(k_1 p_k) - \ln \left\{ P_1 + 2,38 \cdot \frac{\alpha_B}{R_K \cdot \sqrt[3]{S_{B1}} \cdot \sqrt[3]{\sigma}} \right\}},$$

где $p_k \cong 2,2 \cdot 10^7$ - давление насыщенных паров воды в критической точке, Па;

$T_K \cong 647,3$ - температура воды в критической точке, °К;

$k_1 = 1263,8$ и $k_2 = 7,19$ - постоянные коэффициенты;

P_1 - внешнее давление или давление среды, Па;

R_K - радиус капли эмульгированного топлива, м;

$\alpha_B = 3,73 \cdot 10^{-2}$ - усреднённое по температуре значение коэффициента поверхностного натяжения на границе раздела вода - воздух, Н/м;

σ - объемное газосодержание воды при использовании отстоявшейся водопроводной воды с $\sigma = 10^{-11}$. Однако в большинстве случаев водотопливную эмульсию получают в механических диспергаторах, где имеет место кавитационное воздействие на смешиваемые жидкости. При этом их газосодержание может увеличиваться до $\sigma = 10^{-4}$.

Количество пара, которое образуется за счёт теплоты топлива

$$M''_n = 0,9 \cdot \frac{\sum_{mi}^n C_{mi} (T_{II} - T_H) \cdot M_{miK1}}{r}, \quad (36)$$

где $C_{mi} = C_{mi1}$ - теплоёмкость топлива i -той фракции.

Масса воды после первого «микровзрыва»

$$M_{B20} = M_{BK1} - M_{nK1}^* \cdot \left(1 + k_2 \cdot \frac{S_{B1}}{S_{m1}^*} \right), \quad (37)$$

где k_2 - опытный коэффициент.

Объем воды в капле ВТЭ после первого «микровзрыва»

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОБМЕНА КАПЕЛЬ ЭМУЛЬГИРОВАННОГО ТОПЛИВА ШИРОКОГО ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА

$$V_{B20} = \frac{M_{B20}}{\rho_B} \quad (38)$$

Суммарный объем капли ВТЭ после первого «микровзрыва»

$$V_{K20} = \sum_1^n V_{mi20} + V_{B20} \quad (39)$$

Диаметр капли ВТЭ после первого «микровзрыва»

$$d_{K20} = \sqrt[3]{\frac{6V_{K20}}{\pi}} \quad (40)$$

Объемная безразмерная концентрация *i*-той фракции топлива ШФС в капле ВТЭ после первого «микровзрыва»

$$S_{mi20} = \frac{V_{mi20}}{V_{K20}} \quad (41)$$

Объемная безразмерная концентрация воды в капле ВТЭ после первого «микровзрыва»

$$S_{B20} = \frac{V_{B20}}{V_{K20}} \quad (42)$$

Плотность капли ВТЭ после первого «микровзрыва»

$$\rho_{\varepsilon 20} = \sum (\rho_{mi20} \cdot S_{mi20}) + \rho_B \cdot S_{B20} \quad (43)$$

Таким образом, найдены все начальные параметры, необходимые для расчёта следующего (*j*=2) периода тепломассообмена капли ВТЭ, т.е. *V*, ω , *H*, *d*_{К20}, *M*_{mi20}, *V*_{mi20}, *V*_{B20}, *V*_{К20}, *S*_{mi20}, *S*_{B20}, $\rho_{\varepsilon 20}$.

Рассмотрим особенности последующих (за первым) «микровзрывов». Они сводятся к следующему.

Величину *M*_{mij0} находят по формуле (33), которая в данном случае записывают так:

$$M_{mij0} = M_{m,i,K,j-1} - k_1 \cdot M_{n,K,j-1}^* \cdot S_{m,i,K,j-1}, \quad (44)$$

где *M*_{m,i,K,j-1} - масса *i*-той фракции топлива в капле, в конце *j*-1 периода;

*M*_{n,K,j-1}^{*} - массу пара в конце *j*-1 периода находят как сумму масс пара, образующихся в результате внутрикапельного испарения воды в течение *j*-1 периода (*M*_{n,K,j-1}) и при выравнивании температур топлива и воды (*M*_n^m).

Величину (*M*_{n,K,j-1}) находят при рас-

чёте *j*-1 периода. Параметр *M*_n^m определяют по формуле (36), которую записывают так:

$$M_n^m = 0,9 \cdot \sum_1^n \frac{C_{mi}(T_{m,K,j-1} - T_H) \cdot M_{m,i,K,j-1}}{r}, \quad (45)$$

где

*T*_{m,K,j-1} - конечная температура топлива в *j*-1 периоде.

Количество *i*-той фракции топлива, которое остаётся в капле ВТЭ после *j*-1 «микровзрыва»

$$M_{mij0} = M_{m,i,j-1} - k_1(M_{n,i,K,j-1} + M_n^m) \cdot S_{m,i,j-1} \quad (46)$$

Объём *i*-той фракции топлива в капле ВТЭ после *j*-1 «микровзрыва»

$$V_{mij0} = \frac{M_{mij0}}{\rho_{mi}} \quad (47)$$

Масса воды в капле ВТЭ после *j*-1 «микровзрыва»

$$M_{Bj0} = M_{B,j-1,K} - \sum_1^n \left[0,9 \cdot \frac{C_{mi}(T_{m,j-1,K} - T_H) M_{m,j-1,K}}{r} + k_2 \cdot \frac{S_{B,j-1,K}}{S_{m,j-1}^*} \cdot M_{n,j-1,K}^* \right] \quad (48)$$

Объём воды в капле ВТЭ после *j*-1 «микровзрыва»

$$V_{Bj0} = \frac{M_{Bj0}}{\rho_B} \quad (49)$$

Суммарный объём капли ВТЭ после *j*-1 «микровзрыва»

$$V_{Kj0} = \sum_1^n V_{mij0} + V_{Bj0} \quad (50)$$

Диаметр капли ВТЭ после *j*-1 «микровзрыва»

$$d_{Kj0} = \sqrt[3]{\frac{6V_{Kj0}}{\pi}} \quad (51)$$

Концентрация *i*-той фракции топлива в капле ВТЭ после *j*-1 «микровзрыва»

$$S_{mij0} = \frac{V_{mij0}}{\sum_1^n V_{mij0} + V_{Bj0}} \quad (52)$$

Концентрация воды в капле ВТЭ после *j*-1 «микровзрыва»

$$S_{Bj0} = \frac{V_{Bj0}}{\sum_1^n V_{mij0} + V_{Bj0}} \quad (53)$$

Плотность капли ВТЭ после j-1 -го «микровзрыва»

$$\rho_{Эj0} = (1 - S_{Bj0}) \sum_1^n (\rho_{mi} \cdot S_{mij0}) + \rho_B \cdot S_{Bj0} \quad (54)$$

Таким образом, и в этом случае найдены все начальные параметры, необходимые для расчёта последующих (j=3, ..., n) периодов тепломассообмена капли ВТЭ, т.е.

$$V, \omega, H, d_{Kj0}, M_{mij0}, V_{mij0}, V_{Bj0}, V_{Kj0}, S_{mij0}, S_{Bj0}, \rho_{Эj0}.$$

В соответствии с принятой физической интерпретацией процессов тепломассообмена капель ВТЭ, второй (j=2) и последующие (j=3; 4 и т.д.) периоды имеют одинаковое математическое описание. Физическая картина этих процессов сводится к следующему. Для них характерно интенсивное испарение воды внутри капель ВТЭ. Этот процесс протекает при постоянной температуре влаги, равной T_H . Образующийся пар препятствует теплообмену между топливом и водой. В результате температура топлива будет повышаться.

Это очень сложный процесс, точное математическое описание которого весьма затруднительно. Воспользуемся приближённым методом. Будем полагать, что количество теплоты, идущее на испарение воды, будет пропорционально величине

$$\left(\frac{M_{Bj}}{M_{nj} + M_{Bj}} \right)^{k_3}, \quad (55)$$

где k_3 - опытный коэффициент.

Представим уравнение энергии в следующем виде:

$$-\sum_1^n \left(\Delta i_i \frac{\partial M_{mij}}{\partial \tau} \right) - \Delta i_B \cdot \frac{\partial M_{Bj}}{\partial \tau} = \pi \lambda \cdot d_{Kj} (T_1 - T_{mj}) \cdot N_{L_{mj}}^* \cdot (1 + F_1 F_2), \quad (56)$$

где

Δi_B - разность энтальпий пара и жидкости воды;

M_{mij} - текущая масса i-той фракции топлива в капле ВТЭ;

M_{Bj}^* - условная масса воды в капле эмульсии.

Истинная величина M_{Bj} определится по выражению

$$\frac{\partial M_{Bj}}{\partial \tau} = \left(\frac{M_{Bj}}{M_{nj} + M_{Bj}} \right)^{k_3} \cdot \frac{\partial M_{Bj}^*}{\partial \tau} \quad (57)$$

Нагрев i-той фракции топлива найдётся по зависимости

$$\sum_1^n M_{mij} \cdot C_{mi} \cdot \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \Delta i_B \cdot \left[1 - \left(\frac{M_{Bj}}{M_{nj} + M_{Bj}} \right)^{k_3} \right] \cdot \frac{\partial M_{Bj}^*}{\partial \tau} \quad (58)$$

Величина Δi_B определится по рекомендациям [8].

Уравнение баланса массы топлива будет иметь вид

$$\frac{\partial M_{mij}}{\partial \tau} = -2d_{Kj} S_{mij} \rho_{cmij} D_{ni} \cdot \ln \frac{1 - C_{\infty ij}}{1 - C_{0ij}} \cdot (1 + F_1 F_2), \quad (59)$$

текущий диаметр капли во время j-го периода;

$C_{\infty ij}$ - концентрация паров i-го компонента топлива на большом удалении от капли.

Величину M_{nj} для всех периодов находят по выражению

$$\frac{\partial M_{nj}}{\partial \tau} = - \frac{\partial M_{Bj}}{\partial \tau} \quad (60)$$

Объёмы i-той фракции топлива, воды и пара можно определить так:

$$V_{mij} = \frac{M_{mij}}{\rho_{mi}}, \quad (61)$$

$$V_{Bj} = \frac{M_{Bj}}{\rho_B}, \quad (62)$$

$$V_{nj} = \frac{M_{nj}}{\rho_n}. \quad (63)$$

Суммарный объём капли ВТЭ находят как сумму

$$V_{Kj} = \sum_1^n V_{mij} + V_{Bj} + V_{nj}. \quad (64)$$

Текущий диаметр капли ВТЭ

$$d_{Kj} = \sqrt[3]{\frac{6V_{Kj}}{\pi}}. \quad (65)$$

Объёмные безразмерные концентрации топлива, отдельных фракций топлива, воды и пара в капле ВТЭ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОБМЕНА КАПЕЛЬ ЭМУЛЬГИРОВАННОГО ТОПЛИВА ШИРОКОГО ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА

$$S_{mj}^* = \frac{\sum_1^n V_{mij}}{V_{Kj}}, \quad (66)$$

$$S_{mij} = \frac{V_{mij}}{V_{Kj}}, \quad (67)$$

$$S_{Bj} = \frac{V_{Bj}}{V_{Kj}}, \quad (68)$$

$$S_{nj} = \frac{V_{nj}}{V_{Kj}}. \quad (69)$$

Плотность капли ВТЭ

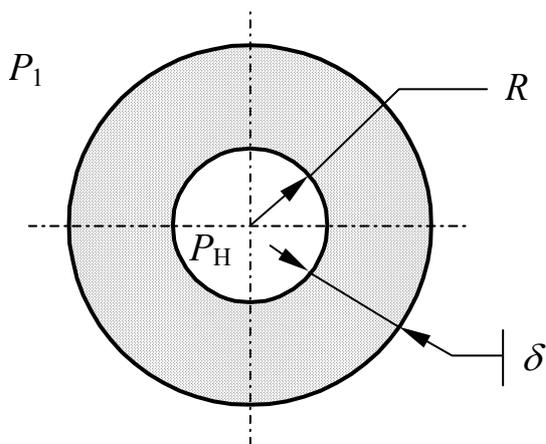
$$\rho_{Э} = S_{mj}^* \sum_1^n (\rho_{ni} \cdot S_{mij}) + \rho_B \cdot S_{Bj} + \rho_n \cdot S_{nj}. \quad (70)$$

Таким образом, определяющая система уравнений замкнута, так как состоит из 22+13i уравнений и включает в себя 22+13i неизвестных:

$V_j, \omega_j, H, T_{mj}, M_{Bj}^*, M_{Bj}, M_{mj}, M_{nj}, V_{Bj}, V_{mj}, V_{nj}, V_{Kj}, d_{Kj}, S_{mj}^*, S_{mij}, S_{Bj}, S_{nj}, \rho_{Э}, Ni_{cm}^*, Ni_{cm}, F_1, F_2, D_{ni}^*, C_{0i}, \delta_{ni}^*, \delta_{ni}, \Delta i, C_{nmj}, \rho_{cmj}, C_{pmj}, C_{nmj}, \lambda_{40}, \lambda_{1j}, \mu_{1j}, \rho_1.$

Начальными условиями будут служить параметры, полученные после предшествующего (j-1) «микровзрыва». Расчёт ведётся до момента достижения каплей критического диаметра $d_{кр}$, при котором она взрывается. Параметры k_1, k_2 и k_3 примем по данным работы [9].

Рассмотрим условия возникновения второго и последующих микровзрывов капель ВТЭ.



Топливная сферическая оболочка радиуса R и толщины δ находится под действием внутреннего давления насыщенного водяного

пара P_H (см. рис.) и внешнего давления среды P_1 . Под давлением паров воды, в топливной оболочке возникают напряжения растяжения. По теории Мора, нормальные напряжения растяжения в оболочке.

$$\sigma_{ЭKB} = \frac{P_1 \cdot R}{2\delta}. \quad (71)$$

От разрыва топливную оболочку удерживают силы поверхностного натяжения топлива f_m , создающие на поверхности капли напряжения сжатия σ_α . По определению [12]:

$$\sigma_\alpha = \frac{f_m}{S_{нсФ}} = \frac{f_m}{\frac{\pi}{4}(d_K^2 - d_{II}^2)}, \quad (72)$$

где $S_{нсФ}$ - площадь поперечного сечения оболочки;

$$d_{II} = \sqrt[3]{\frac{6V_{II}}{\pi}} - \text{диаметр парового пузыря внутри капли.}$$

Согласно закону Лапласа [13]

$$f_m = \frac{2\alpha_m}{R + \delta} \text{ или } f_m = \frac{4\alpha_m}{d_K},$$

где α_m - коэффициент поверхностного натяжения топлива, Н/м.

Тогда

$$\sigma_\alpha = \frac{16\alpha_m}{(d_K^2 - d_{II}^2)\pi d_K}. \quad (73)$$

Известно [14], что коэффициент, а равно и сила поверхностного натяжения зависят от температуры. По данным таблицы 1 аппроксимируем коэффициент поверхностного натяжения, например для дизельного топлива:

$$\alpha_m = \alpha_{m0} \left(0,727 \frac{T_{mk}}{T_m} - 0,727 \right), \quad (74)$$

где α_{m0} - коэффициент поверхностного натяжения топлива при нормальных условиях, Н/м.

По мере прогрева капли ВТЭ давление водяных паров будет расти, увеличивая растягивающие напряжения в топливной оболочке. Капля будет увеличиваться в размерах, а силы поверхностного натяжения и, создаваемые

ею напряжения сжатия будут уменьшаться. Очевидно, что разрыв оболочки произойдет, когда $\sigma_{ЭКВ}$ превысят σ_{α} . При этом диаметр капли ВТЭ d_K станет равен критическому диаметру капли $d_{Ккр}$. Следовательно, условие возникновения второго и последующих микровзрывов может быть сформулировано так:

$$\sigma_{ЭКВ} \geq \sigma_{\alpha}.$$

Подставив соответствующие выражения в правую и левую часть этого неравенства, решим его относительно $d_{Ккр}$:

$$d_{Ккр}^2 \left(d_{Ккр}^3 - 1,91 \cdot V_m \right)^{\frac{1}{3}} + d_{Ккр}^3 \left(d_{Ккр}^3 - 1,91 \cdot V_m \right)^2 - \frac{32\alpha_m}{\pi \cdot \left[2781 \cdot 10^7 \cdot \exp\left(\frac{4661}{T_m}\right) - P_1 \right]} \geq 0. \quad (75)$$

Решая уравнение методом подстановки, можно определить величину критического диаметра капли ВТЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Линевич О.И., Мироненко И.Г. Математическое описание процесса тепломассообмена капель водотопливной эмульсии // Дизельные энергетические установки речных судов / Сб. науч. НГАВТ. - Новосибирск. - 2000. - С. 11 - 23;
2. Казанков А.Г. Численное исследование процессов тепломассообмена капель широко фракционного топлива, взвешенных в газовом по-

токе // Сибирский научный вестник. - вып. 4. - РАЕН. - Новосибирск. - 2000. - С. 25 - 28;

3. Казанков А.Г., Лебедев О.Н. Математическая модель процесса тепломассообмена капель топлива широкого фракционного состава // Сибирский научный вестник. - вып. 4. - РАЕН. - Новосибирск. - 2000. - С. 28-33;

4. Раушенбах Б.В. и др. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей / С.А. Белый, И.В. Беспалов. - М.: Машиностроение, 1964. - 536 с.

5. Дубовкин Н.Ф. Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. - 288 с.

6. Вукалович М.П. Термодинамические свойства воды и водяного пара: таблицы и диаграммы. - М.: Машгиз, - 1955. - 90 с.

7. Линевич О.И. Комплексное исследование водотопливных эмульсий с методами возмущения воздушного заряда в судовых дизелях: Дисс. ... канд. техн. наук. - Новосибирск, 2001. - 124 с.

8. Мироненко И.Г. К вопросу об определении температуры перегрева воды в каплях ВТЭ / Дизельные энергетические установки речных судов: Сб. науч. тр./ Новосибир. акад. вод. трансп. - 2001. - Ч. 2. - С. 53 - 58;

9. Исаков А.Я. Утилизация нефтесодержащих вод в судовых условиях: Автореф. ... докт. техн. наук. - Владивосток, 2002. - 47 с.

10. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. Издание третье. - М.: Физматгиз, 1963. - 539 с.

11. Гегузин Я.Е. Капля. - М.: Наука, 1977. - 176 с.

12. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. - 4-е изд. - М.: Наука, 1966. - 248 с.