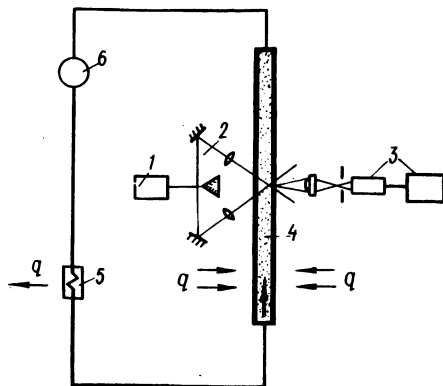


Окончательное решение (2) запишется

$$\tilde{u}_x = \tilde{u}_m + (\tilde{u}_{ох} + \tilde{u}_m) \exp(-\tau/\tau_p), \quad (5)$$

где  $\tilde{u}_m$  - максимальная поперечная скорость частицы в результате действия сил десорбции;  $\tilde{u}_{ох}$  - начальная скорость частицы, м/с;  $\tau_p$  - время релаксации, с;  $\rho_T$  - плотность твердого компонента, кг/м<sup>3</sup>.

Рис. 2. Схема измерения скорости частицы: 1 - источник когерентного света; 2 - оптическая приставка установки; 3 - измерительная приставка; 4 - экспериментальный участок; 5 - холодильник; 6 - вентилятор.



Для измерения скорости частиц использована методика, основанная на эффекте Доплера (рис. 2). Максимальная скорость частиц определяется путем зондирования потока пучком когерентного света.

### Л и т е р а т у р а

1. Горбис З.Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков, М., 1970.

Г.И. Жихар, Б.М. Руденков, Д.И. Гурин

### СЕПАРАЦИЯ И ГОРЕНИЕ ЕДИНИЧНОЙ КАПЛИ ЖИДКОГО ТОПЛИВА В ЦИКЛОННОЙ КАМЕРЕ

В данной работе сделана некоторая количественная оценка влияния отдельных факторов как конструктивных, так и режимных (в том числе и горения) на сепарационную способность потока в циклонной камере. Для этого составим уравнение

движения капли в потоке циклонной камеры. На каплю в потоке циклонной камеры действуют в основном две силы: центробежная и сила сопротивления среды движению капли.

Величина центробежной силы, действующей на каплю, определяется по формуле

$$P_{цб} = \frac{m W^2}{r}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса капли, кг;  $W$  – тангенциальная скорость в камере, м/с;  $r$  – радиус вращения потока, м.

Под действием центробежной силы инерции капли приобретают относительную скорость в радиальном направлении (скорость сепарации), встречая при этом гидродинамическое воздействие потока или сопротивление газовой среды

$$S = \Psi F \frac{W_{от}^2}{2g} \gamma_r, \quad (2)$$

где  $F$  – площадь миделева сечения капли, м<sup>2</sup>;  $W_{от}$  – относительная скорость движения капли в радиальном направлении, м/с;  $\gamma_r$  – объемный вес газа, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести, равное 9,8 м/с<sup>2</sup>.

Коэффициент  $\Psi$  гидравлического сопротивления капли для приближенных расчетов в пределах чисел  $Re$  от 2,5 до 200 рекомендуется определять по формуле, аналогичной зависимости Стокса для очень малых чисел  $Re$  с другим коэффициентом [1]

$$\Psi = \frac{8,4}{Re} \quad (3)$$

вместо  $\Psi = \frac{24}{Re}$  по Стоксу.

Тогда сопротивление может считаться пропорциональным первой степени скорости капли. При этом расчет движения капли сильно упрощается тем, что можно независимо решать уравнения движения для каждой координаты.

Коэффициент сопротивления еще зависит от процесса горения капли – с возникновением процесса горения капли он возрастает в несколько раз.

С течением времени для горячей капли  $Re$  уменьшается [2], и коэффициент сопротивления горячей капли будет возрастать в среднем в 3 – 4 раза [3].

Для учета влияния горения на коэффициент сопротивления введем в зависимость  $\Psi = f(Re)$  коэффициент  $K_r$ , учитывающий изменение  $\Psi$  при наличии горения капли.

Принимаем  $K_r = 4$ .

При установившемся равновесии и сопротивлении среды уравнение движения капли имеет вид

$$\frac{mW^2}{r} - \Psi F \frac{W_{от}^2}{2g} \gamma_r = m \frac{dW_{от}^2}{d\tau} \quad (4)$$

Пренебрегая начальным периодом движения, т. е., полагая

$$m \frac{dW_{от}^2}{d\tau} = 0, \text{ имеем}$$

$$\frac{mW^2}{r} - \Psi F \frac{W_{от}^2}{2g} \gamma_r = 0. \quad (5)$$

Принимаем движение газа в периферийной области по закону

$$Wr = \text{const} = a.$$

Здесь

$$a = \varepsilon \cdot W_{вх} \cdot R_{вх},$$

где  $R_{вх}$  - средний радиус входа воздуха, м;  $\varepsilon$  - коэффициент сохранения скорости, учитывающий снижение тангенциальной скорости на  $R = R_{вх}$  в камере по сравнению с входной скоростью воздуха.

$$\text{Коэффициент } \varepsilon = \frac{W_r}{W_{вх}},$$

где  $W_r$  - тангенциальная скорость на  $R = R_{вх}$  в камере.

Коэффициент сохранения скорости  $\varepsilon$  зависит от относительной площади входа  $\frac{f_{вх}}{F_{ц}}$ . При горении жидкого топлива

в футерованной циклонной камере  $\varepsilon = 0,2 - 0,4$  при  $\frac{f_{вх}}{F_{ц}} = 2 - 5\%$  [3].

С учетом

$$m = \frac{\pi d^3 \gamma_k}{6g} \quad \text{и} \quad F = \frac{\pi d^2}{4}$$

уравнение (5) можно представить в виде

$$\frac{\pi d^3 \cdot a^2}{6r^3} \cdot \frac{\gamma_k}{g} - \psi \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{W_{от}^2}{2g} \gamma_r = 0. \quad (6)$$

В уравнение (6) подставим значение коэффициента сопротивления с учетом процесса горения капли  $\psi = \frac{8,4 \cdot K_r}{Re}$ ,

и полагая  $W_{от} = \frac{dr}{d\tau}$ , получим

$$\frac{d^2 a^2 \rho_k}{r^3} - 6,3 \mu_r \frac{dr}{d\tau} K_r = 0. \quad (7)$$

Здесь  $\mu = \frac{\gamma_r}{g} \nu_r = \rho_r \nu_r$  - коэффициент динамической вязкости, кг·с/м<sup>2</sup>.

Разделяем переменные и интегрируем выражение

$$d^2 a^2 \rho_k \int_0^{\tau_c} d\tau = \int_{R_1}^{R_{ц}} 6,3 \mu_r K_r r^3 dr \quad (8)$$

в указанный пределах, полагая при этом  $\frac{R_1}{R_{ц}} = b$ , будем иметь

$$d^2 a^2 \rho_k \tau_c = 1,6 \mu_r \frac{R_{ц}^4}{r} (1-b^4) K_r \quad (9)$$

Из выражения (9) находим время сепарации капли

$$\tau_c = \frac{1,6 \mu_r K_r R_{ц}^4 (1-b^4)}{d^2 a^2 \rho_k}, \quad (10)$$

где  $R_1$  - радиус входа капле, м;  $R_{ц}$  - радиус циклонной камеры, м.

Подставляя в выражение (10) значение  $a = \epsilon \frac{W_{вх} R_{вх}}{W_{вх}}$ ,

и, полагая  $\frac{R_{вх}}{R_{ц}} = n$ , получим

$$\tau_c = \frac{1,6 \mu_r K_r R_{ц}^4 (1-b^4)}{d^2 \epsilon^2 \rho_k n^2 W_{вх}^2}. \quad (11)$$

Данная зависимость получена только на основе сопоставления центробежной силы и силы сопротивления среды. Она не учитывает влияния силы тяжести, взаимодействия капель друг с другом и действительной геометрической формы капли.

Однако все перечисленные факторы являются второстепенными в сравнении с теми, которые учтены формулой, и поэтому в качестве первого приближения данная зависимость позволяет все же качественно оценить влияние тех или иных параметров на сепарационную способность потока в циклонной камере.

Время выгорания капли рассчитывается по диффузионной схеме [1]

$$\tau_v = \frac{d_o^2}{\sigma}, \quad (12)$$

где  $\sigma$  - константа скорости горения.

Величина  $\sigma$  определяется из выражения [1]

$$\sigma = \frac{4 \text{Nu} \lambda (T_\Gamma - T_{\text{кип}})}{\delta_{\text{ж}} [q_{\text{исп}} + c_{\text{п}} (T_\Gamma - T_{\text{кип}})]}. \quad (13)$$

Ранц и Маршал [1] для  $\text{Re} < 200$  предлагают считать

$$\text{Nu} = 2,0 + 0,6 \text{Re}^{0,5} \text{Pr}^{0,33}. \quad (14)$$

Величина  $q_{\text{исп}}$  определяется по формуле [4]

$$q_{\text{исп}} \approx \varphi_{\text{ж}} + c_{\text{ж}} (t_{\text{кип}} - t_o), \quad (15)$$

где  $\varphi_{\text{ж}}$  - скрытая теплота испарения жидкого топлива, ккал/кг;  $c_{\text{ж}}$  - средняя теплоемкость топлива при температуре кипения, ккал/кг $^{\circ}\text{C}$ ;  $\delta_{\text{ж}}$  - удельный вес жидкости, кг/м $^3$ ;  $t_{\text{кип}}$  - температура кипения жидкого топлива, поступающего в циклонную камеру,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $c_{\text{п}}$  - теплоемкость паров, ккал/кг $^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности газовой среды, ккал/м $\cdot$ ч $\cdot$  $^{\circ}\text{C}$ .

Степень выгорания капли в объеме циклонной камеры за время сепарации определяется из выражения

$$\xi = 1 - \left( \frac{d_k}{d_o} \right)^3, \quad (16)$$

где  $d_k$  - конечный диаметр капли;  $d_o$  - начальный диаметр капли.

Конечный диаметр капли за время сепарации определяется по формуле

$$d_k^2 = d_o^2 - \sigma \tau_c. \quad (17)$$

Нами проведены вычисления времени сепарации, времени выгорания и степени выгорания капли в объеме циклонной камеры за время сепарации для капель с начальным диаметром от 50 до 500 мкн в циклоне диаметром 0,65 м и 1,85 м при различной скорости входа воздуха при условии, что капля вдувается в циклонную камеру вместе с тангенциальным потоком воздуха. Температура в циклоне принята равной 1700°С.

Полученные из расчета значения времени сепарации  $\tau_c$  и времени выгорания  $\tau_B$  капли, а также степени выгорания капли в объеме циклонной камеры представлены на рис. 1 и 2.

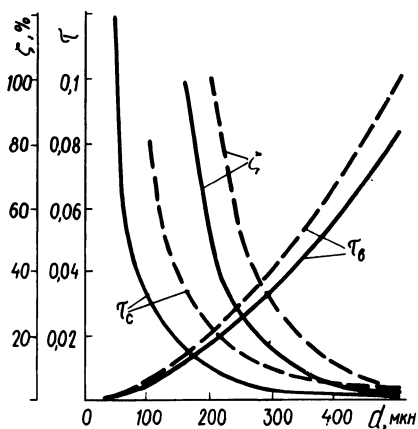


Рис. 1. Зависимость времени сепарации, времени выгорания и степени выгорания капли в объеме циклонной камеры от начального размера капли при различной скорости входа воздуха ( $d_{II} = 0,65$  м): сплошная линия -  $W_{вх} = 100$  м/с; пунктирная -  $60$  м/с.

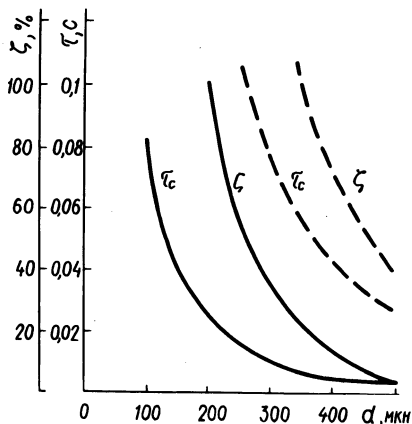


Рис. 2. Зависимость времени сепарации и степени выгорания капли в объеме циклонной камеры от начального размера капли при различном диаметре камеры ( $W_{вх} = 60$  м/с): сплошная линия -  $d_{II} = 0,65$  м; пунктирная - 1,85 м.

Из рис. 1 видно, что с увеличением скорости входа воздуха в циклонную камеру с 60 до 100 м/с время сепарации капли резко уменьшается и более мелкие капли начинают сепарировать на стенку циклона. При скорости воздуха  $W_{вх} = 60$  м/с минимальный диаметр капли, отсепарированной на стенку циклонной камеры, составляет 200 мкн, тогда как при  $W_{вх} = 100$  м/с он равен 150 мкн.

С увеличением скорости входа воздуха резко снижается степень выгорания капли в объеме циклона за время сепарации. Для капли диаметром 250 мкн при  $W_{\text{вх}} = 60$  м/с степень выгорания капли в объеме камеры за время сепарации составляет 55%, а при  $W_{\text{вх}} = 100$  м/с степень выгорания капли составляет только 25%. С увеличением скорости входа воздуха также уменьшается время выгорания капли.

Из рис. 2 видно, что с увеличением диаметра циклонной камеры время сепарации увеличивается и степень выгорания капли в объеме камеры за время сепарации также увеличивается. Время сепарации капли диаметром 300 мкн для камеры диаметром 0,65 м составляет 0,009 с, а степень выгорания капли — 30%; для камеры диаметром 1,85 м время сепарации равно 0,05 с и степень выгорания капли в объеме камеры за время сепарации составляет 100%. При увеличении диаметра камеры от 0,65 до 1,85 м увеличивается минимальный диаметр капли, отсепарированной на стенку циклона.

При диаметре циклонной камеры  $d_{\text{ц}} = 0,65$  м минимальный диаметр капли, отсепарированной на стенку циклона, составляет 200 мкн, а при  $d_{\text{ц}} = 1,85$  м — 400 мкн.

Таким образом, при тангенциальном вводе топлива с увеличением диаметра циклона ухудшается сепарационная способность его и уменьшается количество топлива, попадающего в пристенную область циклона. Поэтому уменьшается возможность образования коксовых отложений на стенке циклонной камеры.

Ввиду того что при попадании значительного количества топлива на стенку циклона возможно образование коксовых отложений, для циклона небольшого диаметра следует применять форсунки, дающие более тонкий распыл.

#### Л и т е р а т у р а

1. Кнорре Г.Ф. и др. Теория топочных процессов. М. — Л., 1966.
2. Кулагин Л.В., Охотников С.С. Сжигание тяжелых жидких топлив. М., 1967.
3. Исаев С.И. Сепарационная способность циклонной топочной камеры. — В сб.: Исследование котельно-топочных процессов, 1958, № 94.
4. Калишевский Л.Л. Структура потока и аэродинамические характеристики циклонной камеры при горении. — В сб.: Исследование котельно-топочных процессов, 1958, № 94.
5. Лавров Н.В., Шурьгин А.П. Введение в теорию горения и газификации топлива. М., 1962.