

6. В. И. Трусов, Л. Л. Иванов.— В сб.: Топливная аппаратура дизелей. Вып. 3. Ярославль, Ярославский политехнический институт, 1975.
7. В. И. Трусов, Л. Л. Иванов.— В сб.: Двигатели внутреннего сгорания. Ярославль, Ярославский политехнический институт, 1975.
8. М. А. Лаврентьев. Усп. мат. наук, 1957, 12, 4, 41.
9. Я. З. Клейман. ПММ, 1958, 22, 2, 197.
10. Г. М. Ляхов. Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, 1959, 1, 46.
11. С. Г. Мухаметжанов, Б. И. Семенов. Ж. науч. и приклад. фотогр. и кинематогр., 1965, 5, 365.
12. Б. И. Семенов, М. Я. Завлин. Ж. науч. и приклад. фотогр. и кинематогр., 1975, 2, 85.
13. Э. В. Мороз, Н. С. Ханин. Изв. вузов. Машиностроение, 1976, 7, 95.
14. А. А. Бузуков. ПМТФ, 1971, 2, 153.
15. А. А. Бузуков.— В сб.: Динамика сплошной среды. Вып. 3. Новосибирск, ИГ СО АН СССР, 1969.
16. G. I. Taylor. Proc. Roy. Soc., 1950, A, 201, 192.
17. С. И. Анисимов, Я. Б. Зельдович. Письма в ЖТФ, 1977, 3, 20, 1081.
18. Б. Е. Гельфанд, С. А. Губин, С. М. Когарко. ИФЖ, 1974, 27, 1, 119.
19. В. П. Бородин, Б. В. Войцеховский. ПМТФ, 1965, 3, 100.

ВЛИЯНИЕ ОБТЕКАЮЩЕГО ПОТОКА НА ГОРЕНИЕ КАПЛИ МЕТАЛЛА

В. М. Гремячкин, А. Г. Истратов, О. И. Лейпунский

(Москва)

В работах [1—3] предложена теория горения капли металла в неподвижном газе-окислителе. В реальных условиях, однако, горение капель металла практически всегда происходит при наличии обтекающего горящую каплю газового потока, причиной возникновения которого может быть движение горящих частиц, либо возникновение свободной конвекции, если горящая капля покоится. Поэтому возникает необходимость оценить влияние обтекающего потока на основные характеристики горения капель металла.

Обтекающий газовый поток может оказывать влияние как на структуру зоны горения вокруг капли металла, так и на количественные характеристики процесса сгорания: время сгорания, массу окисла, накапливающегося на поверхности капли металла в процессе сгорания¹. Определение влияния обтекающего потока на структуру зоны горения вокруг капли металла требует совместного рассмотрения уравнений тепло- и массообмена между поверхностью капли и окружающей средой и уравнений газодинамики обтекания капли. Такая задача представляет собой определенную трудность, связанную с учетом конденсации продуктов испарения капли металла в газе.

Оценка влияния газового потока на время сгорания капли металла и массу окисла, накапливающегося на поверхности капли, может быть сделана без рассмотрения газодинамической картины обтекания капли в приближении «приведенной пленки» [5]. Это приближение заключается в выборе некоторого слоя вокруг горящей капли, в котором происходит изменение температуры и концентраций. Предполагается, что вне этого слоя температура и концентрации соответствуют условиям в окружающей среде. Толщина «приведенной пленки» выбирается таким образом, чтобы чисто молекулярный перенос в ней обеспечивал истин-

¹ Влияние обтекающего потока на тепло- и массообмен испаряющейся капли было проанализировано в [4]. В нашем случае возникают обстоятельства не рассмотренные в [4].

ную интенсивность тепло- и массообмена горячей капли со средой

$$r_{\pi} = r_0 \cdot \text{Nu} / (\text{Nu} - \text{Nu}_0), \quad (1)$$

где r_{π} — радиус «приведенной пленки»; r_0 — радиус капли металла; $\text{Nu} = 2kr_0/\lambda$ — критерий Нуссельта; Nu_0 — критерий Нуссельта при горении капли металла в покоящейся среде.

Значение критерия Нуссельта в покоящейся среде при наличии вдува с поверхности капли может существенно отличаться от $\text{Nu} = 2$. Зависимость Nu в покоящейся среде от критерия Пекле ($\beta_0 = u_0 r_0 / D$), построенного по скорости вдува с поверхности горячей капли, имеет вид

$$\text{Nu}_0 = 2 \frac{\beta_0 e^{-\beta_0}}{1 - e^{-\beta_0}}. \quad (2)$$

В [1—2] показано, что зона конденсации в газе вокруг горячей капли металла представляет собой протяженную область, простирающуюся на большие расстояния от поверхности капли металла. Зона конденсации не влияет в тепловом отношении на процессы, происходящие на поверхности капли. Предполагается, что наличие обтекающего потока может существенно изменить структуру зоны конденсации вокруг капли металла, приблизить эту зону к поверхности капли, так что тепловыделение в ней уже будет оказывать влияние на процессы поверхностного окисления и испарения металла капли. Иначе наличие газового потока может изменить механизм горения капли металла. Поэтому применение приближения «приведенной пленки» в этом случае требует дополнительного обоснования.

В [3] показано, что при горении очень мелких капель металла (порядка 20÷30 мкм в диаметре и меньше) зона химической конденсации в газе не успевает сформироваться за время сгорания капли. Поэтому при горении таких мелких капель металла процесс конденсации в газе и тепловыделение за счет конденсации в окрестности капли отсутствуют. Продукты испарения капли металла уходят в объем в газообразном состоянии. Процесс горения капли в этом случае определяется только диффузией окислителя к поверхности капли и, следовательно, приближение «приведенной пленки» может быть применено для оценки влияния газового потока на количественные характеристики процесса сгорания капли металла, так как наличие обтекающего потока не должно оказывать существенного влияния на механизм горения капли металла.

При отсутствии влияния процесса конденсации в газе на процессы, происходящие на поверхности капли металла, скорость горения определяется диффузией окислителя к поверхности капли, на которой окислитель вступает во взаимодействие с металлом, в результате чего на поверхности капли образуются конденсированный окисел и газообразные продукты испарения (пары металла и субокись в случае горения капли алюминия). Скорость окисления на поверхности капли металла предполагается очень большой, так что концентрация окислителя у поверхности капли близка к нулю.

В предположении о равенстве бинарных коэффициентов диффузии для всех газообразных компонентов и равенстве критерия Льюиса ($L = \kappa/D$) единице выражения для потоков продуктов испарения капли металла I_f , окислителя I_{ox} и тепла I_h от поверхности капли металла могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned} I_f &= 4\pi r_0 \rho D a_f^0 \beta e^{-\beta/\xi_{\pi}} / (e^{-\beta/\xi_{\pi}} - e^{-\beta}), \\ I_{ox} &= 4\pi r_0 \rho D a_{ox}^0 \beta e^{-\beta} / (e^{-\beta/\xi_{\pi}} - e^{-\beta}), \\ I_h &= 4\pi r_0 \rho D \beta (T_s e^{-\beta/\xi_{\pi}} - T_v e^{-\beta}) / (e^{-\beta/\xi_{\pi}} - e^{-\beta}). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $\xi_n = r_n/r_0$ — безразмерный радиус «приведенной пленки»; $a_f^0 =$ относительная массовая концентрация продуктов испарения капли у поверхности; a_{0x}^0 — концентрация окислителя в среде; ρ — плотность газа; D — коэффициент диффузии; c_p — теплоемкость газа; T_0 — температура среды; $\beta = ur_0/D$ — критерий Пекле, построенный по скорости вдува с поверхности капли.

Величины β , T_s (температура поверхности капли металла) и, следовательно, a_f^0 , скорость испарения металла капли I_{mc} и скорость накопления конденсированного окисла на поверхности капли I_c могут быть определены из условий теплового баланса, сохранения атомов кислорода и металла, а также равенства единице суммы относительных концентраций всех газообразных веществ. В результате, проведя вычисления, аналогичные [2], найдем

$$a_f^0 = \frac{c_p(T_0 - T_s) + a_{0x}^0[Q_{0x} + (1 - n_p \mu_p / \mu_{0x}) e_p T_s]}{c_p T_0 + Q_f + a_{0x}^0[Q_{0x} (1 - n_p \mu_p / \mu_{0x}) Q_f]}, \quad (4)$$

$$e^{-\beta(1 - \frac{1}{\xi_n})} = \frac{c_p T_s + Q_f}{c_p T_0 + Q_f + a_{0x}^0[Q_{0x} - (1 - n_p \mu_p / \mu_{0x}) Q_f]}.$$

Здесь Q_{0x} — тепловой эффект реакции окисления металла до конденсированного окисла; Q_f — теплота испарения капли (в виде паров металла и субокислов); μ_{0x} и μ_p — молекулярные веса окислителя и продуктов разложения окислителя, например водорода, если окислителем являются пары воды; n_p — число молекул продуктов разложения окислителя, образующихся из молекулы окислителя.

Правые части выражений (4) есть функции только давления, концентрации окислителя в среде и температуры среды не зависят от скорости обтекающего потока, следовательно, и левые части этих выражений не должны зависеть от скорости обтекающего потока. Отсюда с учетом (1) может быть найдена зависимость β от Nu , определяющего интенсивность тепло- и массообмена горящей капли со средой:

$$\beta(1 - 1/\xi_n) = \beta_0, \quad \beta/\beta_0 = Nu/Nu_0, \quad (5)$$

где β_0 — критерий Пекле при горении капли металла в покоящейся среде.

В случае горения капли алюминия выражение для скорости испарения конденсированного металла с поверхности капли имеет вид

$$I_{mc} = 4\pi\rho D r_0 \frac{\beta \mu_m}{\left(1 - e^{-\beta(1 - \frac{1}{\xi_n})}\right)} \left[a_m^0 + \left(n_{mf} - n_{of} \frac{n_{mc}}{n_{oc}} \right) a_f^0 / \mu_f - \right. \\ \left. - \frac{n_{of} n_{mc}}{n_{oc} \mu_c} a_{0x}^0 e^{-\beta(1 - \frac{1}{\xi_n})} \right], \quad (6)$$

где a_m^0 и a_f^0 — относительные массовые концентрации паров алюминия и субокисла алюминия Al_2O у поверхности капли.

Учитывая, что $\beta(1 - 1/\xi_n)$ от скорости обтекающего потока не зависит и что $4\pi r_0^2 \rho_m dr_0/dt = -I_{mc}$, получим выражение для зависимости константы скорости сгорания капли металла $\alpha = dr_0^2/dt$ от критерия Нуссельта

$$\alpha = \alpha_0 \beta / \beta_0 = \alpha_0 Nu / Nu_0, \quad (7)$$

где α_0 — константа скорости горения капли алюминия в покоящейся среде.

Скорость накопления окисла на поверхности капли алюминия определяется выражением

$$I_c = 4\pi r D r_0 \frac{\beta e^{-\beta/\xi_{\Pi}}}{(e^{-\beta/\xi_{\Pi}} - e^{-\beta})} \left[\frac{n_{0i} \alpha_c}{n_{0c} \mu_{0x}} \alpha_{0xc}^{-\beta(1-\frac{1}{\xi_{\Pi}})} - \frac{n_{0f} \mu_c}{n_{0c} \mu_f} \alpha_f^0 \right]. \quad (8)$$

Отсюда, интегрируя (8) по времени сгорания капли металла и поделив полученное выражение на полную массу окисла, образующегося при сгорании, найдем долю окисла, образующегося при сгорании капли алюминия на ее поверхности:

$$\sigma = \sigma_0 \beta \alpha_0 / \beta_0 \alpha = \sigma_0, \quad (9)$$

где σ_0 — доля окисла, образующегося на поверхности капли алюминия при горении в покоящейся среде. Поскольку величина β и константа скорости горения капли α прямо пропорциональны критерию Nu, то, как можно видеть из (9), доля окисла, накапливающегося на поверхности капли металла в процессе сгорания, σ оказывается не зависящей от скорости обтекающего газового потока.

Таким образом, количественные характеристики процесса сгорания капли алюминия (величина стефановского потока у поверхности капли, скорость горения) оказались выраженными через критерий Нуссельта. Следовательно, задача о влиянии обтекающего потока на горение капли металла свелась к определению зависимости Nu от скорости обтекающего потока.

Зависимость критерия Нуссельта от критерия Пекле ($Pe = 2vr_0/D$), построенного по скорости обтекающего потока, для различных соотношений между скоростью вдува и скоростью обтекающего потока определена в [6] и представлена на рис. 1. При использовании данной зависимости необходимо учитывать то обстоятельство, что обтекающий газовый поток при горении капли металла оказывает влияние не только на величину Nu, но и на скорость вдува газа с поверхности капли β . Поэтому при оценке влияния газового потока на критерий Нуссельта в случае горения капли металла необходимо, наряду с зависимостью рис. 1, учитывать зависимость (5), которую можно записать в виде

$$Nu = Nu_0 / 2\beta_0 \cdot 2\beta / Pe \cdot Pe. \quad (10)$$

Зависимость критерия Нуссельта от критерия Пекле обтекающего потока, полученная на рис. 1 и соотношения (10), представлена на рис. 2. Зависимость параметра β_0 от концентрации окислителя для случая горения капли алюминия при $p = 1$ атм и температуры окружающей среды 2500 К представлена на рис. 3 (по результатам работы [2]). Можно

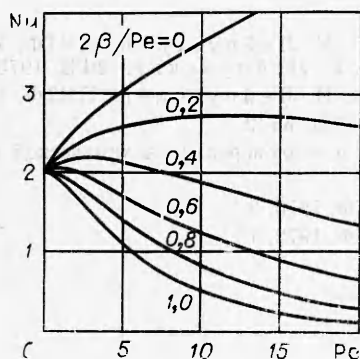


Рис. 1.

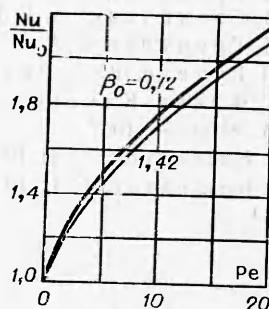


Рис. 2.

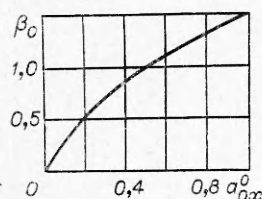


Рис. 3.

видеть, что с ростом Re при горении капли алюминия Nu растет, что означает увеличение интенсивности тепло- и массообмена горячей капли с окружающей средой.

Таким образом, с ростом скорости обтекающего потока скорость стефановского потока у поверхности капли и скорость горения капли возрастают, согласно соотношениям (5), (7), а доля окисла, накапливающаяся на поверхности капли алюминия в процессе сгорания, остается постоянной. Время сгорания капли металла может быть получено путем интегрирования уравнения (7). При этом следует учитывать, что критерий Re меняется с изменением размера капли в процессе сгорания. При условии постоянства скорости обтекающего потока уравнение (7) может быть записано в виде

$$dRe^2/dt = 4\alpha_0 v^2/D^2 \cdot Nu/Nu_0. \quad (11)$$

В [7] для малых значений Re вдува и обтекания получена зависимость $Nu/Nu_0 = 1 + 0,25Re$. Интегрирование уравнения (11) с учетом этой зависимости дает

$$Re^2 - 1/3 \cdot Re^3 = 4v^2/D^2 \cdot \alpha_0 \tau.$$

Отсюда видно, что при наличии обтекающего потока зависимость времени сгорания капли металла от ее размера слабее квадратичной. Для средних значений критериев Пекле вдува и обтекания зависимость времени сгорания капли металла от ее размера может быть получена численным интегрированием уравнения (11) с использованием зависимости рис. 2. Экстраполяция полученных результатов степенной функцией дает зависимость времени сгорания от размера капли металла в виде $\tau \sim Re^{1,8}$.

В заключение следует отметить, что в настоящее время в литературе нет систематических экспериментальных данных о влиянии обтекающего потока на характеристики горения капель металлов. Сравнение полученных здесь результатов с опытными данными является желательным, так как приближение «приведенной пленки» в настоящее время в достаточной степени не обосновано, хотя широко применяется и оказывается весьма плодотворным.

Поступила в редакцию
16/XI 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Гремячкин, А. Г. Истратов, О. И. Лейпунский. ПМТФ, 1974, 4.
2. В. М. Гремячкин, А. Г. Истратов, О. И. Лейпунский. ФГВ, 1975, 11, 3.
3. В. М. Гремячкин, А. Г. Истратов, О. И. Лейпунский. ПМТФ, 1976, 2.
4. Ю. П. Гупало, Ю. С. Рязанцев. ПММ, 1971, 35, 2.
5. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., «Наука», 1967.
6. М. Б. Башкатов, С. И. Шабанов. ПМТФ, 1975, 3.
7. М. Б. Башкатов, С. И. Шабанов. ПМТФ, 1972, 4.