

ДИФФУЗИОННАЯ ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ
КАПЛИ ЖИДКОГО ВОДОРОДА

Г. А. Варшавский, Е. М. Гермейер
(Москва)

ВВЕДЕНИЕ

Высокая теплотворная способность водорода и значительный его хладоресурс являются показателями, определяющими перспективы применения этого горючего в современных двигателях.

В известных разработках такого рода [1, 2] большое внимание уделяется камерам сгорания, в которые водород подается в газообразном виде. Однако представляет интерес и случай, когда более или менее существенная часть этого горючего подается в камеру в виде тонко распыленной жидкости.

Настоящее исследование и посвящено анализу процесса горения капли жидкого водорода в неподвижном воздухе. В заключение даются рекомендации для расчета горения капли в потоке.

Анализ проведен с помощью положений, которые были высказаны в диффузионной теории капли жидкого топлива [3] и затем неоднократно в той или иной форме повторялись и дополнялись [4—6].

Низкая температура кипения (T_k) водорода несколько изменяет известную физическую картину тепломассообменных процессов, происходящих вокруг капли. Поскольку T_k заметно ниже температуры плавления (T_{Ns}) и тем более кипения азота T_N , то представляется, что внутренняя область между зоной горения и каплей состоит из двух шаровых слоев.

Первый, ближайший к поверхности капли, заполнен газообразным водородом; его внешней границей является изотермическая поверхность с температурой T_N . В области небольшой толщины, примыкающей к этой условной поверхности раздела, находятся в состоянии динамического равновесия конденсированные частицы азота, не препятствующие переносу тепла и материи.

Второй шаровой слой, распространяющийся от изотермической поверхности T_N до зоны горения, заполнен газовой смесью переменного состава — от чистого водорода на сфере T_N до чистого азота на фронте горения с температурой T_r^1 .

¹ При сжигании водорода в иной атмосфере могут существовать еще и другие шаровые слои, заполненные соответствующими компонентами. Метод решения задачи остается неизменным.

Задача заключается в нахождении относительных размеров $\left(\frac{r_r}{r_k}, \frac{r_N}{r_k}\right)$ обеих поверхностей раздела и определении скорости испарения горячей капли.

Следует указать на то, что исследованию испарения капли водорода в конечном объеме воздуха посвящен ряд работ [7—9]. Эта задача решалась с учетом изменения температуры и состава (из-за охлаждения воздуха и последующей частичной конденсации азота и кислорода). При решении, основанном на применении уравнений фазового равновесия, делалось естественное предположение об однородных температурном и концентрационном полях в объеме, окружающем каплю. Это предположение, однако, находится в некотором противоречии с постулированием возможности использования в уравнении энергии выражений для определения теплового и диффузионного потоков, полученных в предположении нормальных для квазистатических условий распределений температуры и концентрации.

ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

Для первой зоны основное уравнение тепломассопереноса запишется как

$$G_H \Delta I = 4\pi r^2 \lambda_{H_2} \frac{dT}{dr}, \quad (1)$$

где

$$\Delta I = \rho + \int_{T_k}^{T_r} c_{pH} dT,$$

ρ — теплота испарения водорода;
 c_{pH} — теплоемкость газообразного водорода.
 Из (1) получаем

$$\frac{G_H}{4\pi} \left(\frac{1}{r_k} - \frac{1}{r_N} \right) = \int_{T_k}^{T_N} \frac{\lambda_{H_2} dT}{\Delta I}. \quad (2)$$

Для второй зоны соответственно

$$G_H \Delta I = 4\pi r^2 \lambda_{см} \frac{dT}{dr}, \quad (1')$$

где $\lambda_{см}$ — текущий коэффициент теплопроводности смеси, зависящий как от температуры, так и от состава.

В первом приближении примем, что $\lambda_{см} = \lambda_{N_2}$, а впоследствии внесем некоторые уточнения.

Из (1') имеем:

$$G_H \left(\frac{1}{r_N} - \frac{1}{r_r} \right) = \int_{T_N}^{T_r} \frac{\lambda_{см} dT}{\Delta I}. \quad (2')$$

Температура зоны горения (T_r) находится с помощью соотношения

$$c_p (T_r - T_\infty) = q_B Le, \quad (3)$$

получающегося при совместном рассмотрении уравнений

$$Q = -4\pi r^2 \lambda \frac{dT}{dr} \quad (4)$$

и

$$G_O = 4\pi r^2 \frac{D}{RT} \frac{dp}{dr} \quad (5)$$

и при соблюдении условия

$$\psi\left(\frac{T}{T_0}\right) = \varphi\left(\frac{T}{T_0}\right) \frac{T}{T_0}.$$

Выражение (4) определяет тепло, отводимое от зоны горения во внешнюю среду, (5) — количество кислорода, транспортируемое из окружающего пространства к капле. Число Le в (3) рассчитано по $\lambda_{O_{N_2}}$, D_{O_2} , γ_{O_2} кислорода и значению c_p , находящемуся в левой части равенства.

Температура зоны горения, найденная с помощью (3), позволяет рассчитать интеграл, находящийся в правой части (2'), и дает возможность определить с точностью до множителя поток кислорода G_O , направляющийся к зоне горения

$$\frac{G_O}{4\pi r_r} = \frac{\lambda_0 T_0}{q_O} \int_{x_\infty}^{x_r} \varphi(x) dx. \quad (6)$$

Обозначив интегралы, находящиеся в правых частях равенств (2) и (2'), соответственно через I_1 и I_2 и через I_3 выражение

$$I_3 = \frac{\lambda_0 T_0}{q_O} \int_{x_\infty}^{x_r} \varphi(x) dx, \text{ свяжем количества испаренного водорода } (G_H)$$

и подведенного к зоне горения кислорода (G_O) стехиометрическим коэффициентом β

$$G_O = \beta G_H. \quad (7)$$

Легко показать, что в этих обозначениях $\frac{r_r}{r_k}$, $\frac{r_N}{r_k}$ и константа времени горения k , связывающая в квазистационарной постановке время полного сгорания капли с ее первоначальным размером ($d\tau = -k dD_k^2$) могут быть рассчитаны с помощью выражений

$$\frac{r_r}{r_k} = 1 + \beta \frac{I_1 + I_2}{I_3}, \quad (8)$$

$$\frac{r_N}{r_k} = 1 + \beta \frac{I_1}{\beta I_2 + I_3}, \quad (9)$$

$$k = \frac{\gamma_{\text{H}} \left(1 - \frac{r_{\text{K}}}{r_{\text{r}}}\right)}{8(I_1 + I_2)}. \quad (10)$$

При расчете интеграла I_2 следует иметь в виду, что для получения более точных значений величин $\frac{r_{\text{r}}}{r_{\text{K}}}$, $\frac{r_{\text{N}}}{r_{\text{K}}}$ и k следует учитывать зависимость коэффициента теплопроводности не только от температуры, но и от состава. Для этой цели можно использовать метод, предложенный в [10].

При расчете коэффициента теплопроводности смеси по принципу аддитивности

$$\lambda_{\text{см}} = \lambda_{\text{H}_2} \frac{p_{\text{H}}}{P} + \lambda_{\text{N}_2} \frac{p_{\text{N}}}{P} \quad (11)$$

совместное рассмотрение уравнений диффузии и теплопроводности для второй внутренней зоны при $\psi(x) = \varphi(x) \cdot x$ приводит к простой связи между текущими значениями парциального давления водорода и температуры:

$$\ln \frac{\lambda_{0\text{H}_2}}{\lambda_{0\text{N}_2}} \left[\frac{1}{1 - \frac{p_{\text{H}}}{P}} \left(1 - \frac{\lambda_{0\text{N}_2}}{\lambda_{0\text{H}_2}}\right) \right] = \frac{\lambda_{0\text{H}_2} T_0}{D_0 \gamma_0} \int_{x_{\text{N}}}^x \frac{dx}{\Delta I}. \quad (12)$$

Эта связь позволяет рассчитать интеграл I_2 и определить все параметры, характеризующие рассматриваемую задачу.

При использовании (12) следует иметь в виду, что коэффициент теплопроводности, рассчитанный по (11), имеет несколько завышенные значения как по сравнению с определениями по более точным зависимостям [10, 11], так и по данным известных экспериментов [11].

В связи с этим представляют интерес результаты расчетов, проведенных с помощью выражения

$$\lambda_{\text{см}} = \lambda_{0\text{H}_2} \left(\frac{p_{\text{H}}}{P}\right)^m + \lambda_{0\text{N}_2} \left(1 - \frac{p_{\text{H}}}{P}\right), \quad (13)$$

полученного при обработке опытов [11] и их экстраполяции на случай высоких температур.

Вместо (12) получаем при этом для связи парциального давления водорода с текущей температурой выражение

$$\int_{y_{\text{N}}}^y \frac{dy}{(1-y) [\lambda_{0\text{H}_2} y^m + \lambda_{0\text{N}_2} (1-y)]} = - \frac{T_0}{D_0 \gamma_0} \int_{x_{\text{N}}}^x \frac{dx}{\Delta I}, \quad (14)$$

где

$$y = \frac{p_{\text{H}}}{P}.$$

При горении капли водорода в потоке следует воспользоваться представлениями о приведенной пленке [6, 12, 13]. Полагая в первом приближении, что толщина приведенной пленки не зависит от процесса горения и на ее внешней границе заканчиваются процессы тепло- и

Таблица результатов расчета

Характеристика горящей капли	Расчетные предположения									
	вторая внутренняя зона заполнена азотом		коэффициент теплопроводности второй внутренней зоны полагается принципу аддитивности (11)		коэффициент теплопроводности рассчитан по выражению (13) при $m = 1,35$		область между поверхностью поверхностью капли и зоной горения заполнена азотом		область между поверхностью капли и зоной горения заполнена водородом	
	$T_{\infty} = 300^{\circ}\text{K}$	$T_{\infty} = 1273^{\circ}\text{K}$	$T_{\infty} = 300^{\circ}\text{K}$	$T_{\infty} = 1273^{\circ}\text{K}$	$T_{\infty} = 300^{\circ}\text{K}$	$T_{\infty} = 1273^{\circ}\text{K}$	$T_{\infty} = 300^{\circ}\text{K}$	$T_{\infty} = 1273^{\circ}\text{K}$	$T_{\infty} = 300^{\circ}\text{K}$	$T_{\infty} = 1273^{\circ}\text{K}$
$\frac{r_{\Gamma}}{r_{\text{K}}}$	7,0	6,03	20,7	17,8	16,4	14,2	6,04	5,32	36,9	31,8
$\frac{r_{\text{N}}}{r_{\text{K}}}$	1,19	1,16	1,06	1,046	1,07	1,06	1,0	1,0	1,0	1,0
$\kappa, \text{сек/м.м}^2$	0,409	0,35	0,138	0,118	0,175	0,150	0,475	0,397	0,078	0,066

Примечание. Основные теплофизические характеристики рабочих тел рассчитывались по материалам справочников [14, 15]; расчет проведен для давления среды $p = 1 \text{ кг/см}^2$.

массообмена (концентрация кислорода равна концентрации на бесконечности), для скорости горения капли получают выражение

$$G_{\text{H}} = \frac{4\pi r_{\text{K}}(r_{\text{K}} + \delta)}{\delta} \times \left(I_1 + I_2 + \frac{I_3}{\beta} \right).$$

Для нахождения полного времени сгорания следует учесть динамику полета горячей капли, поскольку она существенным образом влияет на толщину пленки δ .

АНАЛИЗ ПРОВЕДЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Результаты выполненных расчетных определений основных параметров горячей капли водорода представлены в таблице.

Сопоставление этих данных свидетельствует о существенной зависимости характерных параметров горячей капли от способа расчета коэффициента теплопроводности. Значительное изменение температуры окружающей среды оказывает сравнительно слабое влияние на скорость горения капли.

Для проверки предположения о существовании двух внутренних зон следует провести специальные эксперименты.

Однако и до постановки соответствующих экспериментов можно сделать некоторые предварительные суждения о достоверности полученных здесь количественных характеристик процесса го-

