

сто и в потоке окислителя, куда проталкивается из донной области зона рециркуляции. На рис. 4, 5 приведены численные результаты анализа плоского течения при подаче дополнительного топлива посредством вдува звуковой струи водорода через дополнительный инжектор, располагавшийся по центру канала. В этом случае имеет место регулярное отражение «сорванного» скачка уплотнения от верхней стенки канала, а наличие развитой дозвуковой области течения (см. рис. 5) не приводит к тепловой блокаде всего течения. При этом достигается и самая высокая степень завершения процесса горения.

Поступила в редакцию 29/VII 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Компанец, А. А. Овсянников, Л. С. Полак. Химические реакции в турбулентных потоках газа и плазмы. М.: Наука, 1979.
2. У. Ривард, Т. Батлер, О. Фармер. Численное решение задачи гидродинамики. М.: Мир, 1977.
3. В. И. Головичев. ФГВ, 1983, 19, 1.
4. В. М. Ковеня, Н. Н. Яненко. Метод расщепления в задачах газовой динамики. Новосибирск: Наука, 1981.
5. V. K. Baev, V. I. Golovichev a. o. Numerical Modelling of a Chemically Driven $H_2 - HCl$ Transfer Laser. Paper presented at the VIII-th ICOGER. Heat and Mass Transfer Institute, Minsk, USSR, 24—28 August 1981.

О ТЕПЛОМ РЕЖИМЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА В ПОЛЕ ИНТЕНСИВНОЙ ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

А. И. Розловский
(Москва)

В [1] описан эффект интенсивного воздействия излучения пламени смесей $CH_4 + Cl_2$ по механизму хемилюминесценции на тугоплавкую пористую кварцевую матрицу, стабилизирующую горение; при этом матрица легко оплавляется. Имеющиеся сведения об интенсивности такого излучения [2] позволяют сделать некоторые количественные, хотя и приближенные, оценки теплового режима твердого тела в поле излучения пламени. На их основе возможны определенные выводы об использовании различного оборудования в среде, реакция в которой сопровождается интенсивной радиацией.

Рассмотрим тепловой режим процесса для следующей упрощенной модели. У бесконечной плоской массивной стенки, нагреваемой излучением, зафиксировано стационарное пламя. Пренебрежем существованием каналов и зерен у пористой матрицы, а также кондуктивным и конвективным теплообменом с газовым потоком. При этом тепловой баланс определяется влиянием трех факторов: потока излучения хемилюминесценцией от плоского пламени к нагреваемой им стенке, потока вторичного теплового излучения от поверхности матрицы в окружающее пространство и кондуктивной теплопередачей в массивной стенке.

Опишем сначала режим, при котором действуют только два первых фактора, не учитывая распространение зоны нагревания в стенке. При этом тепловые потоки излучения (в единицу времени) от пламени q_b и от стенки q_s уравниваются после достижения поверхностью матрицы стационарной температуры T_s . Очевидно, что $q_b = Q_r u_i p / 2RT_0$, где Q_r — тепловой эффект излучения путем хемилюминесценции при сгорании одного моля горючей смеси, известный из независимых измерений; u_i — линейная скорость потока горючей смеси в исходном состоянии (p, T_0), т. е. объемная скорость потока, отнесенная к единице поверхности матрицы, множитель 2 в знаменателе обусловлен тем, что на матрицу попадает половина излучения плоского пламени. Радиационный поток от единицы

поверхности, нагретой до T_s стенки, $q = \varepsilon \sigma T_s^4$, где ε — степень черноты материала стенки, $\sigma = 5,71 \cdot 10^{-12}$ Вт/(см² · К⁴) — постоянная Стефана — Больцмана. Судя по данным [3], для сильно разогретого кварца $\varepsilon = 0,9 \div 0,4$, меньшее значение представляется более вероятным. Стационарная температура нагревания облучаемой поверхности $T_s = \sqrt[4]{Q_r u_j \rho / 2 \varepsilon \sigma R T_0}$.

Описываемые явления зафиксированы уже для стабилизированного пламени смеси 13% CH₄ + 87% Cl, у которого $Q_r = 4,6$ кДж/моль, температура адиабатического сгорания этой смеси $T_b = 1350$ К. Опыт показывает, что при $u_j = 16$ см/с пламя проскакивает навстречу потоку через каналы разогревающейся до красного каления матрицы после 2-3-минутной экспозиции. Из изложенного следует, что в рассматриваемом случае, когда охлаждение пластины происходит только путем ее вторичного теплового излучения, температура плоской поверхности равна 740—905 К.

Найденная T_s гораздо ниже температуры размягчения материала матрицы (1500—1700 К), т. е. расчет дает заниженное значение T_s . В то же время можно ожидать обратного соотношения в силу неадиабатического характера процесса, обусловленного в первую очередь кондуктивным теплоотводом в глубь твердой стенки. Такое расхождение позволяет заключить, что облучаемая матрица охлаждается путем вторичного теплового излучения гораздо меньше, чем это возможно для рассматриваемой модели. Эта ситуация объясняется особенностями структуры матрицы, материал которой не сплошной, а образован множеством хаотически расположенных спеченных мелких гранул неправильной формы.

В подобной среде оказывается возможным вторичное поглощение теплового излучения отдельными гранулами, оставшимися до того холодными. Вторичное излучение малых хаотически расположенных гранул может не только уходить в бесконечное пространство, но и попадать на грани соседних зерен, т. е. происходит их предварительный подогрев. Если после этого подогретые гранулы облучаются первичным хемилюминесцентным потоком, становится возможным их разогрев до температуры размягчения материала матрицы. Нагревание в такой системе оказывается локальным, распределение температуры между гранулами и участками поверхности пористого материала неравномерно. Распределение зон перегрева носит случайный характер. Оплавление является поверхностным, а максимальный диаметр каналов при небольших экспозициях (созмеримых с минимальной для проскока пламени) возрастает незначительно — не более двукратного даже в случае проскока пламени.

Следующие соображения позволяют оценить влияние кондуктивного теплоотвода в глубь массивной стенки на нестационарность теплового режима. Нагревание стенки физически подобно диффузии в среде, в которой коэффициент диффузии численно равен температуропроводности стенки κ . За время τ диффундирующий продукт (здесь — тепловая волна) распространится на расстояние $\delta \approx \sqrt{\kappa \tau}$. По мере увеличения δ распространение тепловой волны замедляется, т. е. влияние кондуктивного охлаждения ослабевает.

Для очень приближенной оценки можно принять, что ширина прогретого слоя δ перестает возрастать и тепловой режим становится стационарным, когда запас физического тепла в прогретом слое $(T_s - T_0) c \rho \delta$ уравнивается с количеством тепла, доставленным к поверхности радиацией $q_b \tau$ (здесь c — теплоемкость, ρ — плотность материала стенки). Таким образом, время достижения стационарного режима $\tau_s = c \rho \lambda [(T_s - T_0) / q_b]^2$, где λ — теплопроводность материала стенки. Используя данные [4], принимаем для кварцевого стекла: $\lambda = 1,3 \cdot 10^{-3}$ Вт/(см · К), $\rho = 2,2$ г/см³, $c = 0,892$ Дж/(г · К). Это приводит к заключению о том, что описанный радиационный поток обуславливает стационарный радиационный разогрев кварцевой пластины через $\tau_s > 740 \div 400$ с после образования прогретого слоя толщиной 0,8—0,5 см.

Эти цифры подтверждают, что не только температура радиационного нагревания, но и наблюдаемое гораздо более быстрое, чем вычисленное, достижение стационарности теплового режима невозможны, если облучаемый материал сплошной. Только гранулированные дисперсные материалы могут быть разогреты до температуры размягчения путем интенсивной хемилюминесценции. Практика использования насадок из дисперсных материалов в различных химико-технологических аппаратах, хотя и недостаточно обобщенная и зафиксированная документально, подтверждает возможность такого воздействия. Она свидетельствует о том, что разрушающее воздействие интенсивной хемилюминесценции на оборудование не является исключительным, редко встречающимся эффектом.

Радиационным нагреванием массивных стенок каналов в пористых и гранулированных средах можно объяснить оставшееся непонятным существенное изменение критических условий гашения пламени при переходе от нестационарного к стационарному режиму горения [5, 6]. Этот эффект, казалось бы, противоречил вытекающей из теории пределов гашения [7] слабости зависимости критических параметров гашения от исходной температуры огнепреградителя. Поэтому изменение пределов гашения с режимом горения пытались связывать с возможностью поджигания горючей среды за огнепреградителем неполностью охлажденными продуктами сгорания (литературу см. в [5]) либо со значительным изменением состава продуктов реакции, а с ним и нормальной скорости пламени при сгорании в узких каналах.

Теперь очевидно, что при стационарном сгорании газовой среды в контакте с огнепреграждающей насадкой ее разогрев, обусловленный излучением всего факела (а не теплопередачей от пограничного слоя, как это имеет место при кондуктивном и конвективном механизмах), приводит к значительному изменению температуры стенок пламегасящих каналов. Это вызывает соответствующее сокращение кондуктивного охлаждения в пристеночном слое и делает возможным устойчивое горение в пламегасящих каналах таких систем, которые затухали бы при исходном режиме кондуктивного охлаждения, т. е. происходит проскок пламени через огнепреградитель. В предельном (и вполне реальном) случае разогрева стенок каналов до температуры горения возможно распространение пламени через сколь угодно узкие каналы.

Поступила в редакцию 23/XII 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Мальцева и др. Докл. АН СССР, 1981, 258, 406.
2. А. И. Розловский, А. В. Стеблов, Ю. Е. Фролов. Докл. АН СССР, 1978, 241, 631.
3. Х. Хотгель.— В кн.: Теплопередача. М., 1964.
4. О. К. Ботвинкин, А. И. Запорожский. Кварцевое стекло. М.: Госстройиздат, 1965.
5. А. И. Розловский. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. М.: Химия, 1980.
6. А. И. Розловский, А. В. Стеблов, Ю. Е. Фролов. Докл. АН СССР, 1979, 248, 150.
7. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1941, 11, 159.

К ВОПРОСУ О ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ СТАЦИОНАРНОГО СМЕШЕНИЯ НЕРАСЧЕТНЫХ СТРУЙ С УЧЕТОМ НЕРАВНОВЕСНЫХ ПРОЦЕССОВ

*А. В. Лавров, Т. А. Спас, С. С. Харченко
(Ленинград)*

1. В последние годы опубликовано значительное число работ, посвященных численному моделированию непрерывных химических лазеров (НХЛ) диффузионного типа [1—14]. Расчетные исследования проводятся