

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ГОРЕНИЕ НАТРИЯ

В. А. Кушук, И. В. Бабайцев, Г. Т. Земский
(Балашиха)

Исследованию горения металлического натрия посвящены работы [1—3]. Вместе с тем влиянию нестационарных процессов, протекающих при горении металла в слое, уделено недостаточное внимание. Особенно большой интерес представляет горение металла на больших площадях. Такие крупномасштабные эксперименты сопряжены с рядом практических трудностей. Выполнить их не всегда представляется возможным, тогда прибегают к моделированию условий горения, и в частности численному.

В настоящей работе численными методами исследовано горение металла в замкнутом и открытом объемах с учетом тепловых потерь излучением, теплопроводностью, конвекцией, потерь на испарение и других факторов. Ранее определены зависимости скорости горения натрия от температуры металла и газовой среды, площади горения, содержания кислорода и скорости набегающего потока воздуха, а также зависимость положения фронта пламени от температуры. Экспериментальные результаты обработаны и заложены в основу расчетной модели. Относительно тонкий слой металла приводит к постановке одномерной задачи. Объем, в котором происходит горение, согласно расчетной схеме (рис. 1), разделен на шесть зон (I — изоляция, II — сталь, III — натрий, IV — азот + пары натрия, V — воздух, VI — изоляция), а каждая зона разбита на 10 слоев.

Рассмотрена сопряженная нелинейная задача со следующими допущениями:

1) теплофизические характеристики материалов зависят от температуры;

2) скорость горения натрия лимитируется диффузией окислителя в зону горения и определяется зависимостью

$$w = 2,875 \frac{Nu_D}{d} D \rho (X_{O_2}^\infty - X_{O_2}^{нов}),$$

где Nu_D — диффузионный критерий Нуссельта; d — характерный размер; D — коэффициент диффузии; ρ — плотность; X_{O_2} — молярная доля кислорода ($X_{O_2}^\infty = 21\%$);

3) фронт пламени и поверхность натрия являются подвижными границами, положение фронта пламени определялось по стехиометрии окислителя и горючего;

4) давление в замкнутом объеме рассчитывалось по уравнению состояния;

5) поле температур одномерное;

6) тепловой поток в стороны равен тепловому потоку вверх с учетом соотношения площадей и разности температур по слоям;

7) на границе зон IV—V идет реакция $2Na + 1/2O_2 \rightarrow Na_2O + \Delta H$, тепловыделение которой зависит от температуры.

Уравнение теплопроводности с источниками и стоками тепла:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \gamma_h(T, \tau) \frac{\partial T}{\partial x} = \varphi_h(T, \tau) \frac{\partial T}{\partial \tau} + \psi_h(T, \tau), \quad (4)$$

где $\gamma_h = \frac{W_k C_{pk}}{\lambda_k}$; $\varphi_h = \frac{C_{pk} \rho_k}{\lambda_k}$; $\psi_h = \frac{q_k}{\lambda_k}$; W — удельный поток; C_p — теплоемкость; λ — теплопроводность; ρ — плотность; q — тепловыделение; k — индекс зоны.

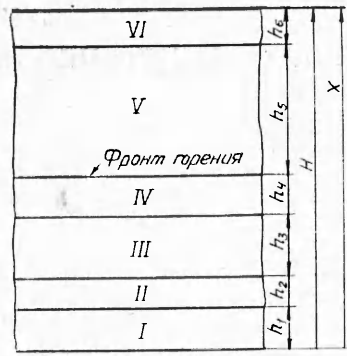


Рис. 1. Расчетная схема $\left(\sum_{i=1}^{i=6} h_i = H \right)$.

Условия на границах зон (температуру среды для упрощения принимаем за нулевую):

$$x = 0, \quad -T\alpha_1 = -\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2)$$

$$x = h_1, \quad -\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (3)$$

$$x = h_1 + h_2, \quad -\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda_3 \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (4)$$

$$x = \sum_{i=1}^{i=3} h_i, \quad -\lambda_3 \frac{\partial T}{\partial x} + q_3 = -\lambda_4 \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (5)$$

$$q_3 = \sigma \varepsilon_1 (T_f^4 - T_s^4) - LW,$$

$$x = \sum_{i=2}^{i=4} h_i, \quad -\lambda_4 \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda_5 \frac{\partial T}{\partial x} = q_4, \quad (6)$$

$$q_4 = Wq(T) - \sigma \varepsilon_1 (T_f^4 - T_s^4) - \sigma \varepsilon_j (T_f^4 - T_{ст}^4),$$

$$x = \sum_{i=1}^{i=5} h_i, \quad \lambda_5 \frac{\partial T}{\partial x} + q_5 = \lambda_4 \frac{\partial T}{\partial x}, \quad q_5 = \sigma \varepsilon_j \frac{F_1}{F_2} (T_f^4 - T_{ст}^4), \quad (7)$$

$$x = H = \sum_{i=1}^{i=6}, \quad \lambda_6 \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_2 T, \quad T|_{h=0} = T|_{h=H}, \quad (8)$$

где x — координата; T — температура; α — коэффициент теплоотдачи; σ — постоянная Стефана — Больцмана; ε — степень черноты; L — теплота испарения; F_1/F_2 — соотношение площадей фронта горения и стен; $q(T)$ — тепловыделение во фронте горения; индексы $f, s, ст$ обозначают фронт горения, поверхность натрия и стенку соответственно.

Задачу решали численным методом на ЭВМ ЕС-1033. Для устранения трудностей, связанных с обеспечением устойчивости в широком диапазоне теплофизических характеристик материалов, для решения принят метод прогонки [4—6].

Теплофизические характеристики материалов приняты по [7, 8]. Программа позволяет рассчитывать давление газа в объеме, массу газа и натрия, температуры по слоям и ряд других параметров. В качестве примера приведем результаты расчета последствий пролива и горения различных количеств натрия в замкнутом и открытом объемах. Результаты расчета выгорания натрия в герметичном объеме на площади 25 м² представлены на рис. 2. Видно, что процесс протекает как нестационарный в течение более 1 ч. Сопоставление с экспериментом [1], проведен-

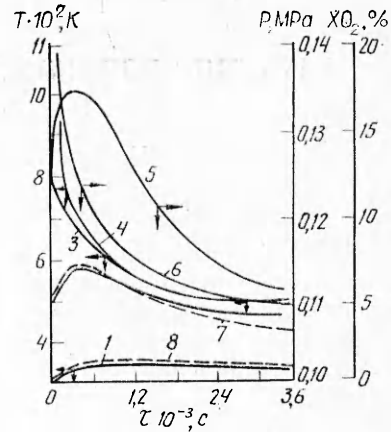


Рис. 2. Горение 850 кг натрия (слой 0,04 м) в герметичном объеме 100 м³. 1, 2 — температуры газа на высоте 3,2 и 0,7 м от пола; 3, 4 — температуры поверхности натрия и фронта горения; 5 — давление; 6 — молярная доля кислорода; 7, 8 — температуры газа на высоте 0,7 и 3,7 м от пола.

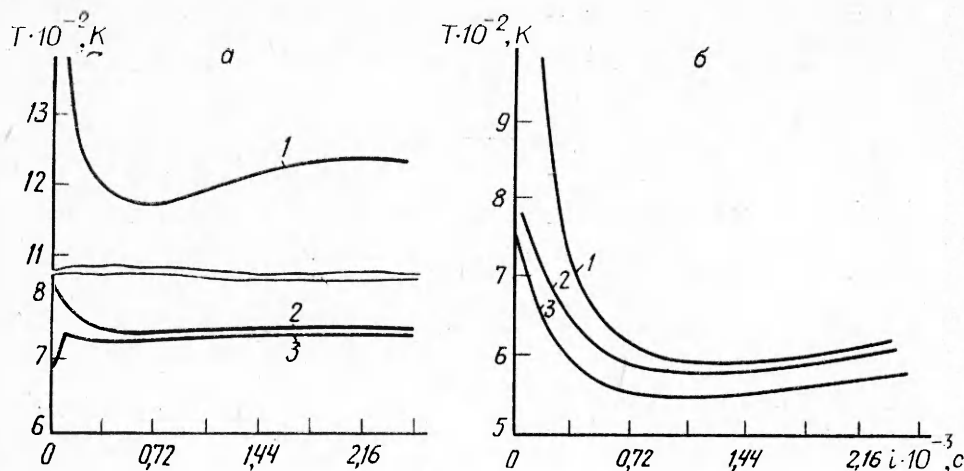


Рис. 3. Горение 2130 кг натрия на открытой площади 25 м²; бетон 0,3 м, сталь 0,003 (а) и 0,5 (б).

1, 2, 3 — температуры фронта горения поверхности натрия и поддона соответственно.

ным в указанных условиях, дает удовлетворительное согласие. Измеренные температуры расходятся с расчетом не более чем на 8%. Из расчета следует, что уже через 30 мин молярная доля кислорода снижается с 21 до 6% — горение прекращается. Сопоставление с экспериментом, описанным в [3], также дает удовлетворительное совпадение. Расхождение не превышает 8%.

Расчетные исследования позволили оценить влияние теплофизических характеристик и граничных условий на режим горения. Так, при проливе 2130 кг натрия (слой 0,01 м; $T_0 = 800$ К) в открытый объем температура во фронте горения снижается за 10 мин до 1200 К, если пролив осуществлен на материал толщиной 0,003 м с теплофизическими свойствами, эквивалентными стали, и до 600 К, если толщина материала 0,5 м (рис. 3). Из рис. 3 видно, что только через 30 мин в рассматриваемых условиях температура во фронте горения стабилизируется на уровне 1250 К. Полученные результаты удовлетворительно коррелируют с лабораторными данными, моделирующими указанные процессы.

Можно сделать вывод, что теплофизические характеристики материалов, контактирующих с горящим натрием, условия на их границах и, как следствие, нестационарность протекающих процессов играют важную роль в протекании режима горения и особенно должны учитываться при проведении опытов по изучению механизма горения и тушения натрия.

Представленная модель позволяет оценить критические условия, при которых возможно затухание процесса горения натрия, а также рассчитывать различные параметры при горении в объеме. Она может быть использована для расчета условий, обеспечивающих наименьшую пожарную опасность технологических процессов с использованием натрия.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Г. Михедов. International atomic energy agency, Specialists' Meeting on Sodium fires and prevention. Summary report, Cadarache, France, Nov. 1978, 86.
2. R. Bilsborough, P. D. Capp, R. N. Newman. International atomic energy agency, Specialists' Meeting on Sodium fires and prevention. Summary report, Cadarache, France, Nov. 1978, 12.
3. G. de Cuy Duverger. International atomic energy agency, Specialists' Meeting on Sodium fires and prevention. Summary report, Cadarache, France, Nov. 1978, 76.
4. Н. С. Бахвалов. Численные методы. М.: Наука, 1973.
5. П. Шнейдер. Инженерные проблемы теплопроводности. М.: ИЛ, 1961.
6. А. А. Самарский, Ю. П. Попов. Разностные методы решения задач газовой динамики. М.: Наука, 1980.

7. Э. Э. Шпильрайн и др. Теплофизические свойства щелочных металлов. М.: Изд-во стандартов, 1970.
8. Таблицы физических величин. Справочник/Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1978.

УДК 536.463 : 662.612

СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В АЭРОВЗВЕСЯХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

А. Г. Алексеев, И. В. Судакова

(Киев)

Скорость распространения пламени — одна из важных характеристик горения газовзвесей порошков. Этот параметр используется как в теории горения, так и при решении прикладных задач, в частности, в технике безопасности — в ряде расчетных методов определения характеристик воспламеняемости и взрываемости порошков, а также на практике, при решении вопросов локализации взрыва и взрывоподавления.

Большинство опубликованных работ теоретически обосновывают определяющее влияние либо одного из механизмов теплопередачи (кондуктивный [1—4] или радиационный [5—7]), либо совместное их действие [8—10]. Более надежные данные для конкретных условий могут быть получены экспериментальным путем. Однако ввиду различия в методиках экспериментов полученные значения скорости изменяются в пределах от нескольких сантиметров до 1000 м/с и более. Накопление и обобщение экспериментальных данных позволит, помимо получения результатов для конкретных условий, обосновать физические модели процесса распространения пламени. В этом плане интересен комплекс работ [11—14]. Опыты и расчеты выполнены преимущественно с порошками магния при концентрациях до 300 г/м³.

Следует учитывать и влияние газодинамических факторов (турбулентности, ударных волн), особенно при распространении аэровзвесей в трубах большой протяженности и шероховатости. В этих условиях быстро достигаются высокие скорости распространения пламени (до 1600 м/с), о чем свидетельствуют эксперименты в лабораторных и промышленных условиях [15—17].

Для исследования скорости распространения пламени по аэровзвеси порошков в настоящей работе принята методика, суть которой заключается в фотографировании пламени при помощи кинокамеры и вычислении скорости по перемещению фронта горения в нестесненных условиях. Распыление и воспламенение осуществлялось во взрывной камере постоянного давления емкостью 1 м³, исключающей внешнее возмущение среды. Навески порошков распыляли с помощью распылителя ИПМ диаметром 100 мм. Объем камеры на два порядка превышал объем образующегося пылевого облака, что практически исключало влияние ограждающих стенок. Избыточное давление сбрасывалось через откидную шторку. Схема установки представлена на рис. 1.

Давление в ресивере при распылении составляло 4 кгс/см², длительность распыления — 0,4 с. В качестве источника зажигания применяли электроспираль или пиротехнический воспламенитель. Регистрацию процесса распространения пламени осуществляли кинокамерой «Киев-16У». Контроль концентрации создаваемого пылевого облака осуществляли двумя методами: расчетом объема пылевого облака по кинограмме процесса распыления с последующим делением распыленной навески на этот объем и отбором проб аэровзвеси в различных местах пробоотборником мгновенного действия.

По данной методике исследовали скорость распространения пламени в аэровзвесах порошков алюминия, алюминиево-магниевого сплава (ПАМ), магния (МПФ), порошка титана кальциетермического и цирко-