

УДК 546.33

Артемьев С.Р., Шапорев В.П., Дворецкий Д.С.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ РАСПЫЛЕННОГО НАТРИЯ
В РЕАКТОРЕ (ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ)**

Применение технологий быстрого сгорания металлического натрия в промышленных масштабах связано с производством оксидных перекисных соединений натрия и уничтожения отходов производства металлического натрия. Эффективность процесса и качество получаемой продукции в значительной степени зависит от конструкции реакторных систем, способных работать в очень жестких условиях. Создание конструкций (моделей) подобных реакторов и систем в современных условиях является достаточно актуальной задачей.

Такие системы должны быть способны разогревать жидкий металл до нескольких тысяч градусов за секунды, после чего продукты в виде аэрозолей и тумана должны резко охлаждаться и выводиться из реактора. Вышеуказанные экстремальные условия требуют создания специальных реакторов. Реакторы пленочного типа, а также с псевдооживленным слоем для данного процесса не подходят. Считается, что наиболее эффективно процесс можно проводить при интенсивном распылении металла и факельном сжигании [1,2]. При этом для распыления металла используются турбулентно – вихревые форсунки, турбулентно – вихревые форсунки с возможностью вибрации сопла, системы, основанные на эффекте сталкивающихся струй, многоструйные камеры смешения и др. [3,5]. Основная цель применения этих устройств – получение в реакционной камере дисперсий металлов в виде капель размерами от 10 до 1500 мкм, которые легко взаимодействуют с кислородом. Для создания реакторной системы необходимо исследовать процесс горения распыленного металла в замкнутом объеме, то есть в реакторе.

Но, не смотря на то, что процессы горения распыленных металлов достаточно широко используются в промышленности, во многих работах, например, в [6], отмечается, что процесс горения металлов недостаточно изучен, отсутствуют модельные представления, которые адекватно описывают этот процесс. Поэтому экспериментальные исследования данного процесса являются достаточно актуальной задачей.

Описание экспериментальной установки и методов исследования процесса

Установка создана в Тамбовском Государственном Техническом Университете (ТГТУ) при поддержке научно-образовательного центра (НОЦ) «ТГТУ-Тамбов НИХИ» Исследования на установке проведены сотрудниками ТГТУ с участием аспиранта НТУ «ХПИ» на основании договоров о совместном сотрудничестве между ТГТУ, НОЦ «ТГТУ-Тамбов НИХИ» и НТУ «ХПИ» от 14.09.2006 г.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема экспериментальной установки.

Ниже приведены некоторые характеристики оборудования, в частности: 8 – вертикальный сосуд высокого давления, изготовлен из углеродистой стали диаметром 1 м, высотой – 2 м, объем – 1,5 м³, 13 – сопло, которое установлено в днище резервуара, инжектирует натрий в виде направленного вверх конуса под углом 60°.

Термопары установлены в различных местах резервуара. Термопары Cr –Al, диаметр проволоки 0,16 мм, изолированы магнезией и вставлены в трубки из нержавеющей

ющей стали. Термопары установлены над распылительным соплом на расстояниях 200, 400, 550, 780 мм и по сечению резервуара на расстоянии от его стенки – 0; 100; 200; 300; 400 мм.

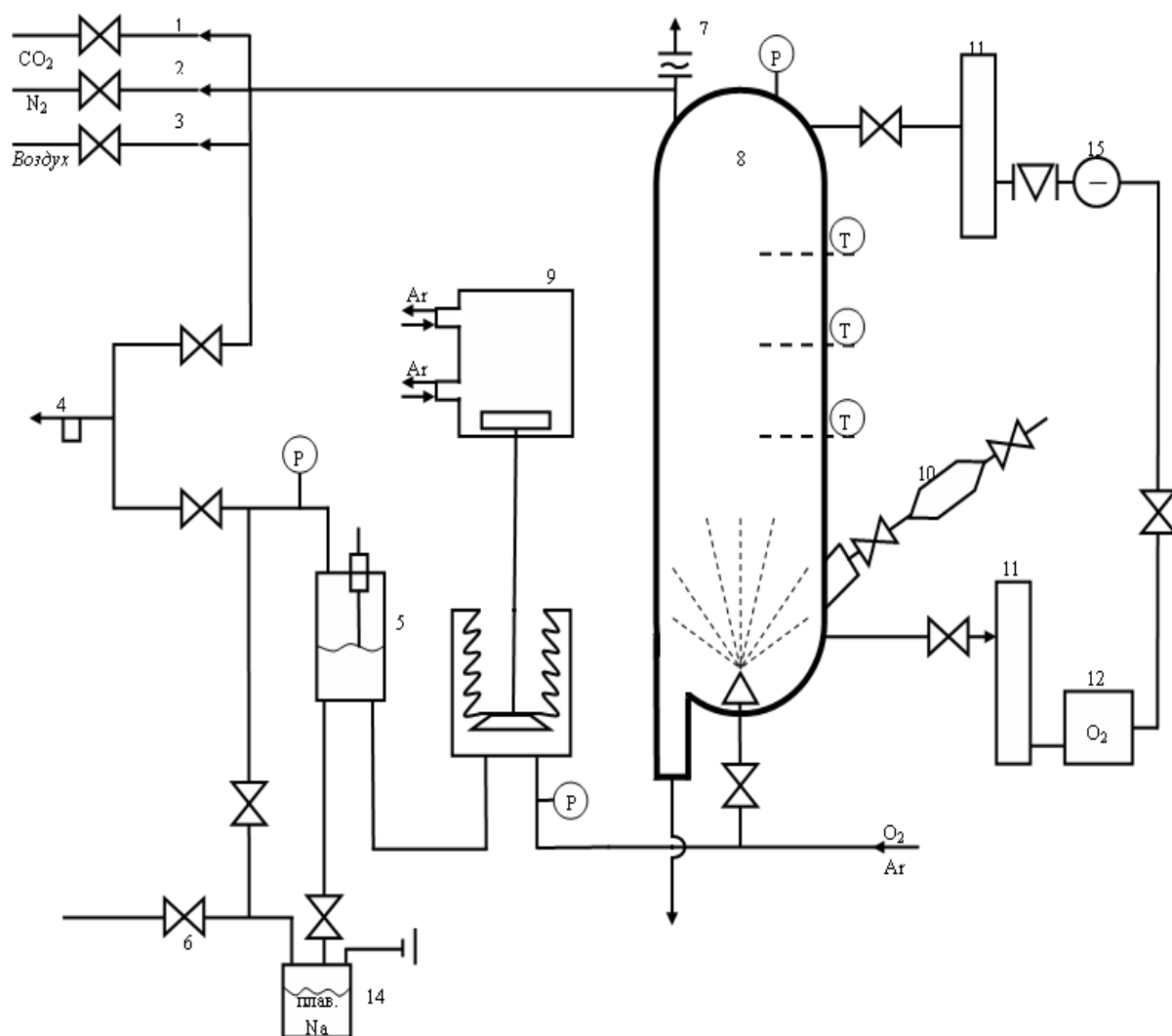


Рисунок 1 – Принципиальная схема экспериментальной установки
 1, 2, 3 – линии подачи газа, 4 – вакуум – насос, 5 – мерный бак,
 6 – вентиль для подачи жидкого натрия, 7 – взрывной клапан,
 8 – корпус реактора (резервуара), 9 – гидроприводной поршневой насос,
 10 – пробоотборники, 11 – фильтры, 12 – сигнализатор O₂, 13 – сопло,
 14 – бак жидкого натрия, 15 – насос для циркуляции O₂,

В качестве датчиков давления использованы тензодатчики, способные реагировать на быстрые изменения давления от 0 до 1 МПа. Воздух в реактор подавался с расходом 500 см³/мин, концентрация O₂ измерялась электрохимическим газоанализатором кислорода, влажность воздуха определялась влагомером по точке росы. Газ, содержащий аэрозоли Na₂O и Na₂O₂ отбирался вакууммированным пробоотборником 10 через 1, 10, 100 мин. после распыления Na. Пробы растворяли в чистой обессоленной воде и анализировали с помощью атомно-адсорбционного спектрометра.

Подготовка реактора к работе заключалась в следующем: резервуар 8 вакууммировали посредством 4 до давления 1 мм ртутного столба ($7,5024 \cdot 10^{-3}$ Па) и заполняли

сухим воздухом. В расходном баке 14 температура расплавленного натрия составляла 160–200 °С.

Для анализа полученных результатов экспериментов необходимо рассмотреть математическую модель процесса горения Na и образования продуктов реакции. Ниже представлены основные положения модели.

Математическая модель процесса горения Na и образования продуктов реакции

Согласно теоретическим представлениям [6,7], металлический натрий испаряется с поверхности капли и реакция между парами Na и O₂ воздуха протекает мгновенно, при этом капля (частица) радиусом R расходует за счет испарения и уменьшается.

На рисунке 2 представлены модель горения единичной капли (частицы), а модель горения распыленной струи в резервуаре представлена на рисунке 3.

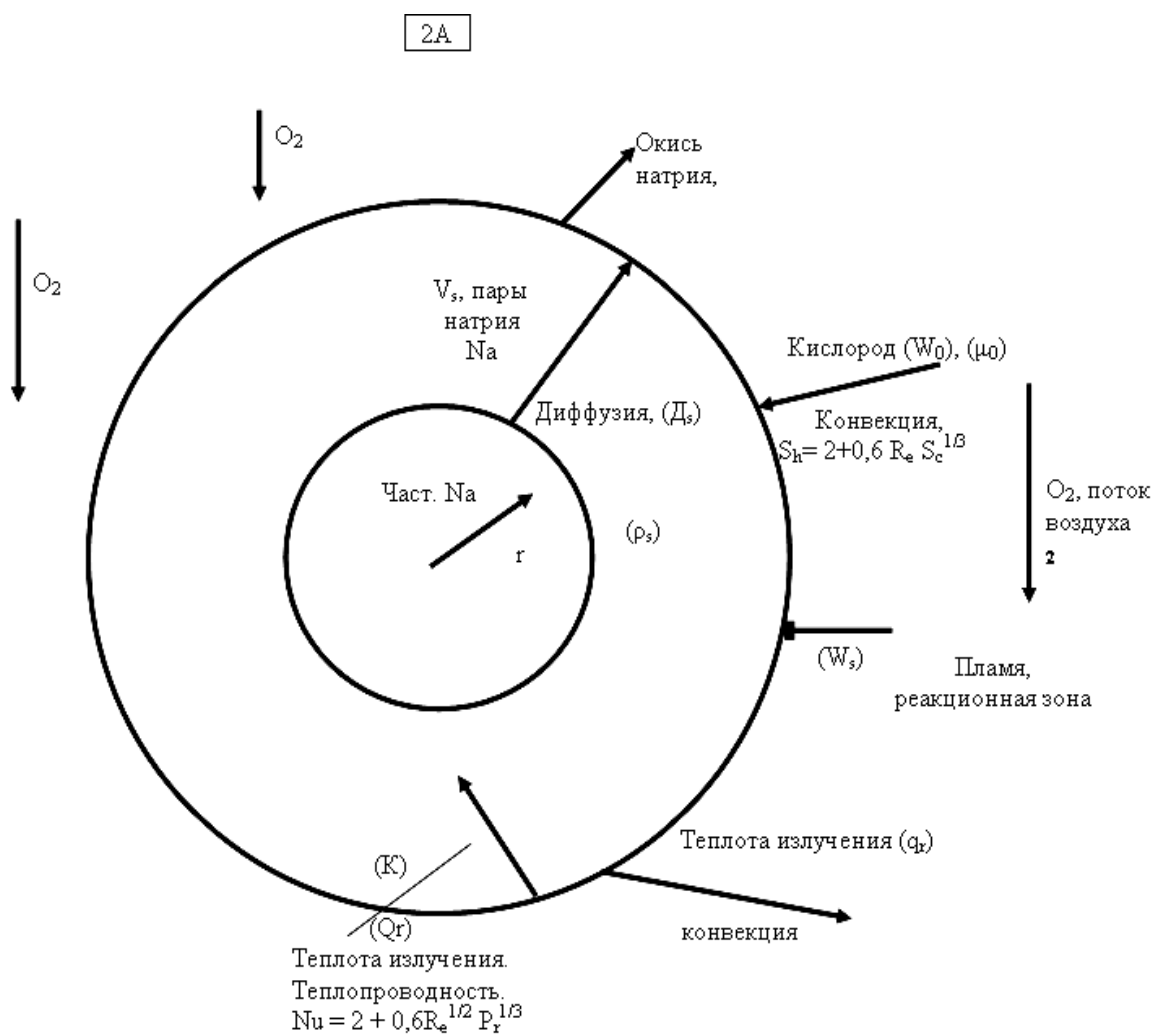


Рисунок 2 – Модель горения единичной частицы

Условные обозначения на рисунке 2 имеют следующие значения: индекс S относится к парам Na, ρ_s – плотность паров Na, V_s – массовый поток паров Na от частицы в пламя (реакционную зону), W_s – скорость горения, K – удельная теплопроводность,

qr – тепловой поток за счет излучения, Wo – поток кислорода, поступающий в пламя, Mo – молекулярный вес кислорода, Re – критерий Рейнольдса, Sc – критерий Шмидта, Sh – критерий Шервуда, Pr – критерий Прандтля.

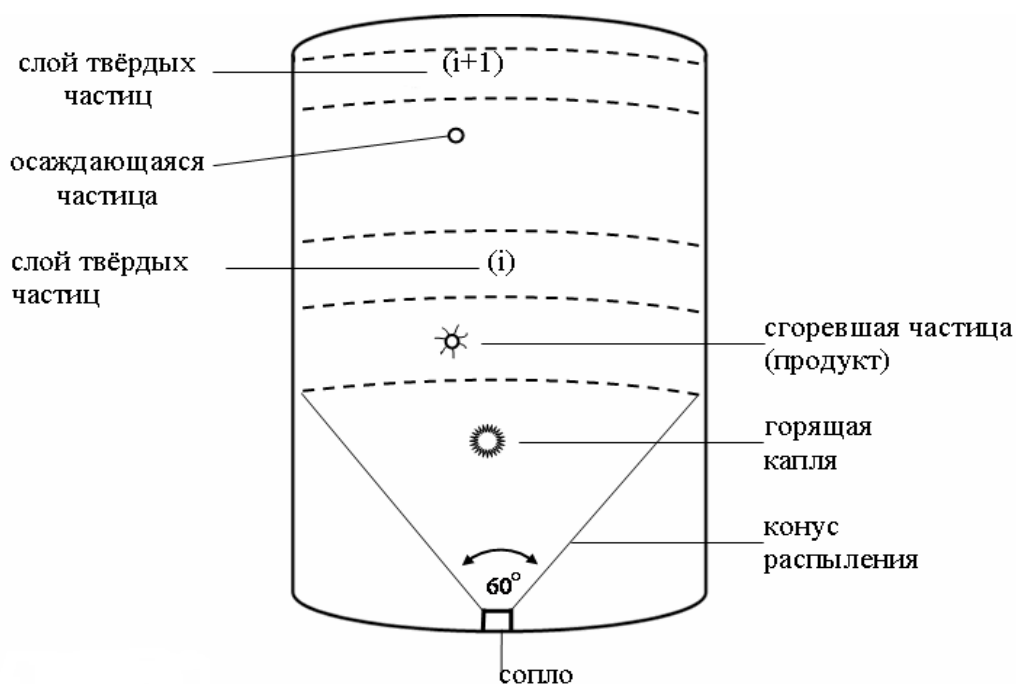


Рисунок 3 – Модель горения распыленной струи в резервуаре

Согласно рисунку 2 тепло – массоперенос внутри пламени описывается уравнением:

$$\frac{d}{dr} r^2 [\rho_s v_s] = \frac{d}{dr} r^2 \left[\rho_s v_s \gamma_s - \rho_s D_s \frac{d\gamma_s}{dr} \right] = 0. \quad (1)$$

Массовая скорость V_s связана со скоростью горения частицы W_s уравнением:

$$W_s = 4\pi r^2 \rho_s V_s. \quad (2)$$

Введем переменную величину:

$$\zeta = \frac{W_s}{4\pi r \rho_s D_s}. \quad (3)$$

Тогда правая часть уравнения (1) будет иметь вид:

$$\frac{d^2}{d\zeta^2} V_s + \frac{d}{d\zeta} V_s = 0. \quad (4)$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$V_s = A_1 + A_2 \exp(-\zeta), \text{ где } A_1 \text{ и } A_2 - \text{const.} \quad (5)$$

Теплопередача за счет теплопроводности от пламени к частице N_a может быть выражена в виде:

$$\frac{d}{dr} r^2 \rho_s V_s C_{\delta s} T - \frac{d}{dr} r^2 K \frac{dT}{dr} = 0. \quad (6)$$

Введя переменную $\eta = \frac{W_s C_{\delta s}}{4\pi r K}$ уравнение (6) принимает вид по типу (4) и имеет решение: $T = B_1 + B_2 \exp^{-\eta}$, где B_1 и B_2 – const.

Теплопередача за счет излучения представляется уравнением:

$$q_r = 4\pi r_e^2 \varepsilon_1 \sigma_s (T_f^4 - T_1^4), \quad (7)$$

где σ_s – постоянная Стефана – Больцмана, ε_1 – относительная излучательная способность, индексы l – жидкая фаза, f – пламя.

Теплопередача снаружи пламени за счет ускоренной конвекции вокруг сферы может быть описано уравнением Шервурда [8], как функция числа Рейнольдса и числа Шмидта:

$$Sh_h = 2 + 0,6 Re^{1/2} Sc^{1/3}. \quad (8)$$

Поток кислорода, поступающий в пламя из потока воздуха, рассчитывается из соотношения:

$$\frac{W_0}{M_0} = 2\pi r_f Sh D_0 N_0 V_0, \quad (9)$$

где N_0 и M_0 – соответственно, молярная концентрация и молярная масса кислорода, D_0 – коэффициент диффузии.

Часть тепла, выделяемая в пламени, передается в окружающий газ в соответствии с соотношением N_i являясь функцией Re и Pr . [8]:

$$N_i = 2 + 0,6 Re^{1/2} Pr^{1/3}. \quad (10)$$

Тогда тепловой поток за счет ускоренной конвекции становится равным:

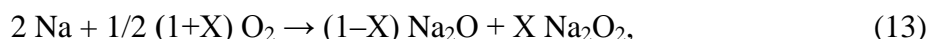
$$Q_c = 2\pi R_f^2 N_i K (T_f - T_g), \quad (11)$$

а поток за счет излучения в окружающий газ:

$$Q_r = 4 \pi R_f^2 \varepsilon_2 \sigma_s (T_f^4 - T_g^4), \quad (12)$$

где ε_2 – относительная излучательная способность, индекс q – окружающий газ.

Тепловой и массовый поток в пламени будет описываться на основе химического уравнения:



где X – доля перекиси.

Массовый поток запишется:

$$\frac{W_s}{M_s} = \frac{1}{4} (1+X) \frac{W_0}{M_0}. \quad (14)$$

Если допустить, что горение натрия происходит почти мгновенно, то это приводит к нулевым концентрациям паров Na и газообразного кислорода: $V_s = 0$; $V_0 = 0$.

Тогда теплота сгорания определяется из уравнения:

$$Q_c = 1/2 [(1-x)\Delta H_{\text{Na}_2\text{O}} + X_{\text{Na}_2\text{O}_2}] \frac{W_s}{M_s}. \quad (15)$$

Эта теплота частично расходуется на испарение Na и нагрев паров Na до температуры пламени T_f , а остальное передается в окружающий газ за счет конвекции и излучения в газообразный кислород, поступающий в пламя.

В результате уравнение теплового баланса можно записать в виде:

$$Q_L - W_s L - W_s C_{ps} (T_f - T_l) = Q_L + Q_r + W_0 C_{po} (T_f - T_q), \quad (16)$$

где L – удельная теплота парообразования.

Определение неизвестных параметров

Если известны r – радиус капли, V_p – скорость полета капли Na, V_0 – мольная доля O_2 , T_q – температура окружающего газа, то неизвестны: W_s – скорость горения, A_1 , A_2, B_1, B_2 , температура частицы Na – T_l , температура пламени – T_f . Эти величины вычисляются по уравнениям (1–16) при определенных граничных условиях:

– W_s определяется при подстановке предположительного значения r_f в уравнение:

$$\frac{r+x}{4} \frac{W_s}{M_s} = 2\pi r_f f \text{Sh} D_0 N_0 V_0$$

– постоянная A становится конкретным числом при:

$$W_s = W_s(V_s)_l - 4\pi r_l D_s \left[\frac{dV_s}{dr} \right]_l.$$

Тогда $1 + A_2 \exp(-\zeta_f) = 0$ и вычисляется A_2 :

– температура T_l получается из уравнения $1 + A_2 \exp(-\zeta_f) = \frac{P_s}{P_g}$, где P_s – функция

T_l, P_g – давление газа.

– температура T_f рассчитывается из уравнения:

$$Q_L - W_s [L + C_{ps}(T_f - T_L)] = [2\pi r_f N_u K + \frac{1+x}{4} M_o C_{po}] (T_f - T_q) + 4 \pi r_f^2 \varepsilon_2 \sigma_s (T_f^4 - T_q^4);$$

– постоянные B_1 и B_2 определяются из уравнений с применением краевых условий:

$$\begin{aligned} B_1 + B_2 \exp(-\eta_l) &= T_1; \\ B_1 + B_2 \exp(-\eta_f) &= T_f. \end{aligned}$$

Проверка предположительного значения r_f производится по уравнению:

$$W_{sr} = W_s C_{ps}^{-n1} + 4\pi r_f^2 \varepsilon_1 \sigma_s (T_f^4 - T_q^4),$$

которое выражает теплопередачу к частице Na , необходимую для испарения жидкой капли.

При расчете горения в резервуаре постулируется, что движение газа между слоями происходит за счет конвекции, а не благодаря расширению газа. Теплопередача от газа к стенке резервуара рассчитывается для каждого слоя. После окончания распыления Na понижение температуры и давления газа определяется при условии, что все пространство, занятое газом, представляет один слой. Предполагается, что движение частиц натрия, инжесктированных из распылительного устройства с начальной скоростью V_i , подчиняется закону свободного падения. Таким образом, когда высота слоя над устройством составляет величину от Z до ΔZ , то получится:

$$\Delta\tau = \frac{1}{g} \left[\sqrt{V_i^2 + 2gz} - \sqrt{V_i^2 + 2g(z + \Delta z)} \right]$$

для частицы Na , проходящей через слой.

Если при горении скорость уменьшения квадрата радиуса капли считать постоянной, то уменьшение размеров частицы Δr_1 за время $\Delta\tau$ приблизительно можно определить по уравнению [9]:

$$\Delta r_e = r_e - \sqrt{r_1^2 - \left(\frac{dr_1^2}{d\tau} \right) \Delta\tau}. \quad (17)$$

Таким образом, частицы меньшего размера выгорают в процессе полета, частицы большего размера не выгорают до столкновения со стенкой резервуара и осаждаются на ней в зоне конуса. Осажденный Na будет гореть со скоростью, пропорциональной концентрации кислорода в окружающем газе.

В этом случае скорость горения определяется как [9]:

$$W_\alpha = \alpha V_0 W_w, \quad (18)$$

где α – const, W_w – скорость осаждения капли Na .

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рисунке 4 представлены результаты по определению гранулометрии распыленных частиц натрия. Эти результаты получены при изменении концентрации кислорода от 5 до 21 %, при температуре окружающего газа 1000 °С и скорости частиц 2 м/с.

Как видно из рисунка средний размер частиц изменяется в диапазоне от 10 до 600 мкм.

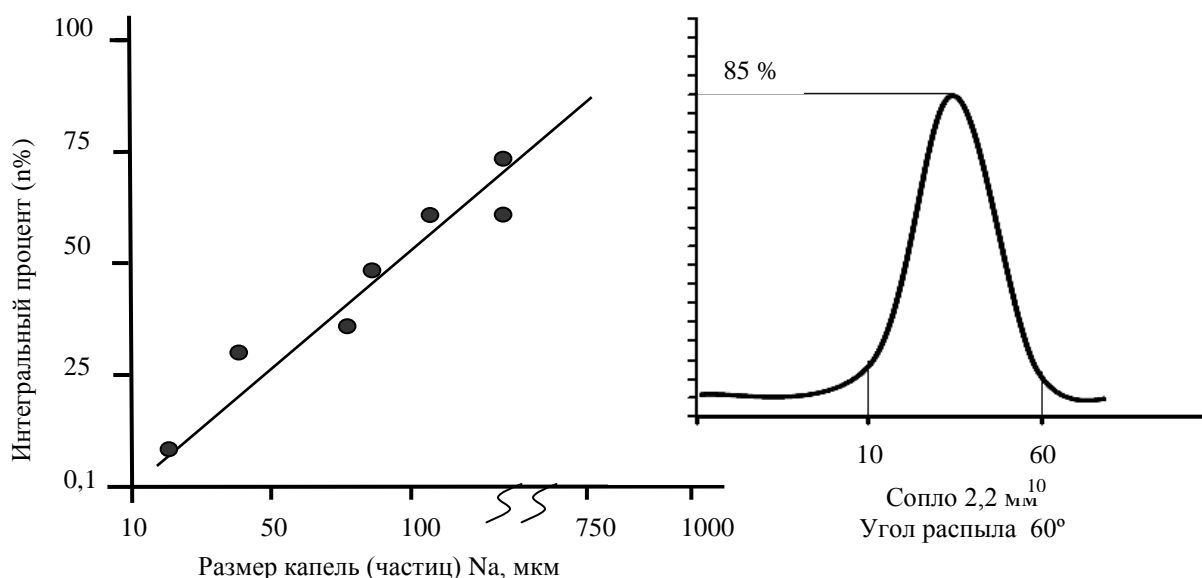


Рисунок 4 – Гранулометрическое распределение распыленного натрия

На рисунке 5 приведены данные по скорости уменьшения квадрата радиуса частицы.

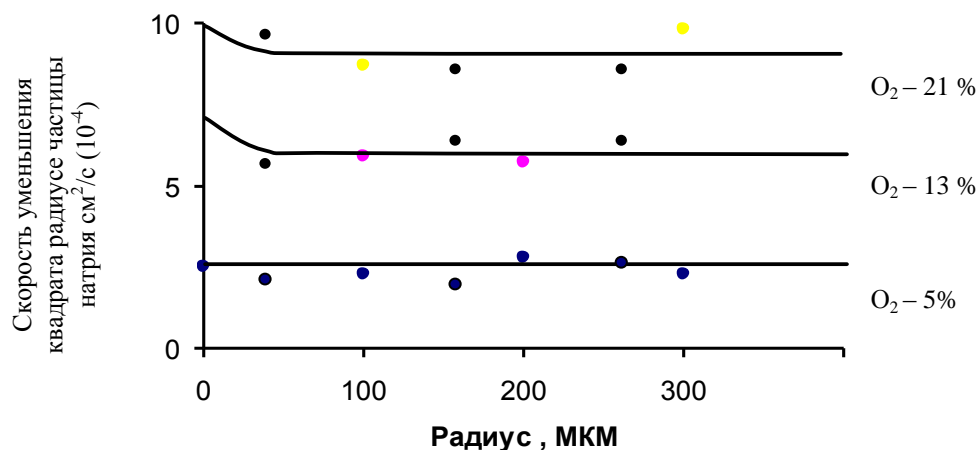


Рисунок 5 – Влияние концентрации кислорода на скорость уменьшения квадрата радиуса частицы

Анализ данных, приведенных на рисунках 4,5, показывает, что производная квадрата радиуса частицы Na во времени не зависит от размеров частицы. Эту связь можно выразить соотношением:

$$\frac{d}{d\tau} r_1^2 \approx k. \quad (19)$$

Величина k для частиц Na равна примерно $10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$. Следует отметить, что аналогичные взаимосвязи наблюдаются при сжигании распыленной топливной нефти [10], для которой k равно $10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$.

Различия в величинах k связано с тем, что Na имеет большую удельную поверхность и теплоту парообразования, чем у нефти, но меньшее давление паров. Учитывая (19), получим, что скорость горения частицы равна:

$$W_s = \frac{d}{d\tau} (4/3\pi r_1^3 \rho_1) = 2\pi r_1 \rho_1 k. \quad (20)$$

Таким образом, скорость горения на единицу площади равна:

$$\frac{W_s}{4\pi r_1^2} = \frac{\rho_1}{r_1} k, \quad (21)$$

а скорость на единицу массы:

$$\frac{W_s}{4/3\pi r_1^3 \rho_1} = 3/2 \frac{k}{r_1^2}. \quad (22)$$

Уравнения (21,22) показывают, что скорость горения пропорциональна размеру частиц, на рисунке 4 наблюдаем примерно линейное изменение скорости горения в зависимости от концентрации O_2 в воздухе и ее независимость от размера частицы.

Этот факт, как следует из рисунка 5, связан с изменением температуры факела и окружающего газа и, очевидно, скорости испарения Na . Благодаря скорости увеличения испарения Na , увеличения скорости конвекции, возрастает скорость потребления O_2 .

Приведенные на рисунке 6 результаты подтверждают вышеуказанный факт. Например, эксперименты показали, что при $T_g = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$, длина пламени 230 мм, коэффициент потребления достигает 80–85 % при $C_{\text{O}_2} = 20 \text{ } \%$, скорость потребления кислорода $V_{\text{пот. O}_2} = 0,625 \text{ г/с}$. При $T_g = 750 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$, длина пламени 190 мм при $C_{\text{O}_2} = 20 \text{ } \%$, скорость потребления кислорода $V_{\text{пот. O}_2} = 0,06 \text{ г/с}$ при коэффициенте потребления 50–55 %. В первом случае тепло передается к стенке реактора со скоростью конвекции $30,2 \text{ кДж/м}^2\text{ч }^\circ\text{C}$ при относительной излучательной способности $\sim 0,2$. Во втором случае тепло передается стенке резервуара со скоростью $\sim 12 \text{ кДж/м}^2\text{ч }^\circ\text{C}$.

Изменение температуры факела T_f в зависимости от соотношения Na/O_2 приведено на рисунке 7.

Кривые, приведенные на рисунке 6 коррелируются с кривыми для T_g . При этом расхождения между расчетным значением и экспериментальным значением T_f при мгновенном сгорании колеблется в пределах 10–12 %. Экспериментальные значения T_f выше расчетных на эту величину. Характер изменения давления в сосуде после распыления струи зависит от соотношения $R = \text{Na}/\text{O}_2$ и начальной концентрации C_{O_2} и согласно вышеприведенной модели влияет на температуру жидкого натрия в капле T_1 за

счет интенсификации процесса диффузии O_2 из окружающего газа к капле и, соответственно, увеличения D_{O_2} .

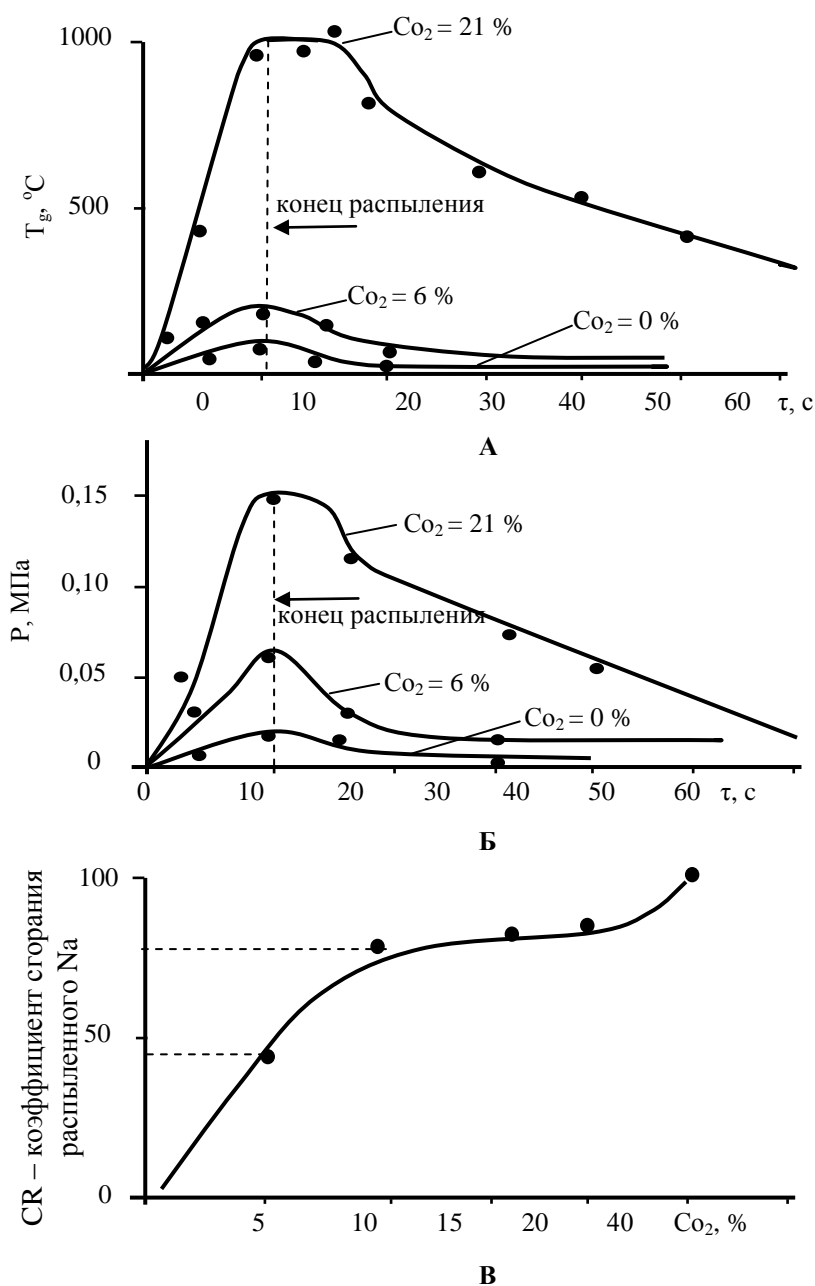
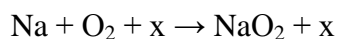


Рисунок 6 – Изменение температуры окружающего газа и коэффициента CR при сжигании Na при различных C_{O_2} :

А – зависимость T_g ; Б – зависимость давления на срезе сопла;

В – зависимость коэффициента сгорания Na (CR); CR – отношение фактического потребления кислорода к потреблению, ожидаемому при полном сгорании

От характера изменения давления в реакторе по его высоте согласно модели рисунка 2б зависят толщины (i) слоев и, соответственно, зоны образования продукта согласно химическим уравнениям:



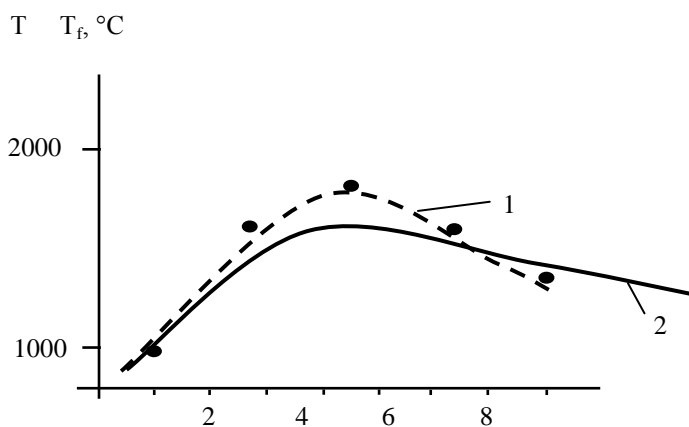
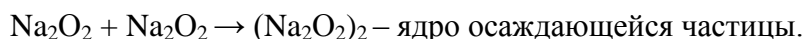


Рисунок 7 – Зависимость T_f от соотношения $\text{Na}/\text{O}_2 = R$
1 – экспериментальная кривая; 2 – расчетная кривая

На рисунке 8 приведены данные по характеру изменения давления после распыления в реакторе.

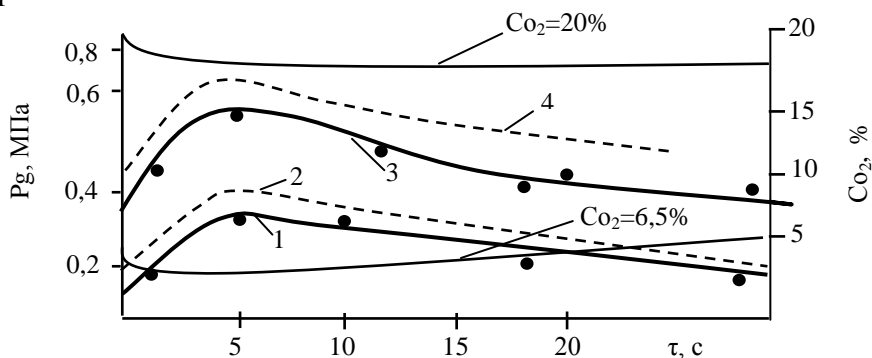


Рисунок 8 – Изменение давления газа (P_g) в реакционном сосуде при различных C_{O_2}
где 1, 2 $C_{\text{O}_2} = 6.5\%$; 1 – эксперимент; 2 – расчет по модели; 3, 4 $C_{\text{O}_2} = 20\%$;
3 – эксперимент; 4 – расчет по модели

Как видно из приведенных данных на рисунке 8 максимальное расчетное давление на 10–20 % выше экспериментально установленного. Поскольку величины T_g , T_f , P_g являются определяющими в модели горения натрия, то при отклонении на 10–20 % экспериментально определяемых величин от расчетных дает основание считать об адекватности модельных представлений о процессе горения натрия (уравнения 1–23).

Выводы

1. Разработана математическая модель процесса горения жидкого металлического натрия диспергируемого в виде капель размером 10–600 мкм в реакционном сосуде. Математическая модель базируется на уравнениях теплового и материального балансов, которые представлены для отдельной частицы, факела и реакционного сосуда. Определены граничные условия модели, даны методы расчета неизвестных параметров модели.

2. Проведено исследование процесса горения распыленного жидкого натрия на демонстрационной установке, определены экспериментальные зависимости изменения основных параметров тепловой модели T_g , T_f , P_g , показано, что расхождение между экс-

периментальними значеннями величин і розрахунковими даними не перевищує 10-20 %. Це свідчить про адекватність математичної моделі і можливість її використання для розрахунку реактора.

Литература

1. Обладнання хімічних виробництв. Част. 2. Обладнання для поділу неорганічних систем і реактори хімічних виробництв. За редакцією Г.А. Ткача. Розд. 8. Реактори хімічної промисловості. Автор – Шапорев В.П., Київ, інститут системних досліджень освіти України, 1993 – с. 197–276.
2. Spособ výroby kyslienjka zinoenateho u zariadenie najeho prevadzanie. Rybieka Jozef, Fahini Milan, Tomek Svorad, Rapant Ivan, Mlynar Milan. A.C. 193107 Затв. 13.09.1973 №6337 – 73, опубл. 30.12.1981 р. МКИ, с. 0109/02.
3. В.А. Бородуля, А.К. Гребеньков, В.И. Рубежанский, И.В. Ходак. Исследование гидродинамики и дисперсной структуры факела распыления форсунки методами лазерной диагностики // Инженерно – физический журнал – 1984, т. XXVII, №6, с. 936–940.
4. Berd D.A., Briens C.L, Berdondnon M.A. Reactor development for the ultrapyrolysis process // Can. J. Chem. Eng. – 1989 – 67, №2 – с. 96–101.
5. А.Л. Моссэ Плазменные смесители // Химия и жизнь – 1992, №10, с. 31–33.; Luzzatto K., Temira A., Elperian I. A new two – impinging – streams heterogeneous reactor. // AIChE Journal, 1984, №4, p.600–608.
6. Sagava. N. Energy release from sodium spray combustion IAEA – IWGFR Specialists Meeting On Sodium Fires and Prevention, Cadarache France, November, 1978, 42 pp.
7. I. Charpenel. Sodium Spray fires. – Special – Lists meeting on Sodium fires, Cadarache France, 1978, 24 pp.
8. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена, изд. «Наука». Сиб. отд., Новосибирск, 1970 – 659 с.
9. F.A. Williams. Combustion Theory. The Fundamental Theory of Chemical Reacting Flow System, Addition – Wispy Publishing Company Ins. 1965 – 100 pp.
10. Билсборо Р., Кэн Л.Д., Ньюман Р.Н. An Overview of Sodium – fires Related studies in the UK IAFA Specialists. Meeting on Sodium Fires and Prevention, November, 20–24, 1978, Cadarache, France, 44 pp.

УДК 546.33

Артем'єв С.Р., Шапорев В.П., Дворецкий Д.С.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ РОЗПИЛЕНОГО НАТРІЮ В РЕАКТОРІ (ЗАМКНЕНОМУ ОБ'ЄМІ)

В статті узагальнені результати теоретичних та експериментальних досліджень процесу горіння рідинного металевого натрію, диспергованого у вигляді краплин розмірами 10–600 мкм до реакційного посуду. Розроблений математичний опис процесу, проведені експериментальні дослідження на демонстраційній установці, до складу якої входить реакційний посуд обсягом в 1,5 м³. Проведений аналіз теоретичних та експериментальних досліджень, висновки якого дозволяють стверджувати про адекватність математичного опису проведення процесу.