

УДК 532.529

## ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ГОРЕНИЯ В ВИХРЕВЫХ КАМЕРАХ С ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ ЧАСТИЦ

Н. А. Дворников

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, lab2-1@itp.nsc.ru

Рассмотрены методы оценки режимов горения газообразного топлива в вихревых камерах различных конструкций при наличии в камере слоя инертных частиц, вращающихся с потоком газа. Предложен простой геометрический критерий, позволяющий определить возможность сжигания топлива в слое частиц без образования факела над слоем.

Ключевые слова: вихревая камера, закрученный поток, псевдоожигенный слой, горение.

DOI 10.15372/FGV20150602

### ВВЕДЕНИЕ

Создание псевдоожигенного слоя может осуществляться боковыми завихрителями в цилиндрической камере [1, 2], нижними торцевыми завихрителями [3, 4], закруткой псевдоожигенного на распределительной решетке слоя с помощью вторичного закрученного потока в надслоевом пространстве [5–7], коническими завихрителями в конических вихревых камерах [8, 9]. Для анализа режимов течения с наличием псевдоожигенного слоя частиц используются различные безразмерные параметры, в частности соотношение центробежного ускорения слоя частиц и ускорения свободного падения в поле силы тяжести  $I = v_{p\varphi}^2 / (rg)$  [10], число Дамкелёра  $Da$ , представляющее собой отношение времени нахождения реагентов в реакционной зоне к времени протекания химической реакции, и др. [11]. Критерий  $I$  определяет ориентацию свободной границы слоя от вертикальной (при большом значении параметра) до горизонтальной (при очень малом параметре). Он важен в первую очередь для вихревых камер с боковыми завихрителями, поскольку при уменьшении этого параметра верхняя часть завихрителя оголяется и газ начинает поступать в камеру в основном сразу в свободное пространство над слоем, слой снижает скорость вращения и ложится на нижнюю торцевую поверхность. Псевдоожигение слоя на боковом цилиндрическом или коническом завихрителе подчиняется тем же закономерностям, что и псевдоожигение в поле силы тяжести, если в

зависимостях ускорение свободного падения заменить суммарным ускорением — центробежным и гравитационным в направлении стенки бокового завихрителя, на котором формируется слой [12]. Для создания и удержания слоя частиц на боковом завихрителе при увеличении размеров аппарата используют либо вращающиеся диски в нижней части камеры, которые дополнительно раскручивают частицы и отбрасывают их на боковой завихритель [13], либо конические боковые завихрители, соответствующие углу между осью камеры и свободной границей вращающегося слоя [14], с целью уменьшить отношение высоты камеры к диаметру и не допустить оголения верхней части завихрителя при формировании на нем слоя частиц. Практика показывает, что диаметр вихревой камеры с боковым завихрителем, при котором удается создать слой на боковом завихрителе, не превышает 1 м при скорости вращения слоя  $3 \div 5$  м/с. Это соответствует значениям критерия  $I = 2 \div 5$  при диаметре камеры 1 м. Уменьшение этого критерия для камер с торцевым завихрителем и камер конической конструкции [8, 9] не приводит к катастрофическим последствиям в плане организации псевдоожигенного слоя в камерах большого размера и проведения в них химических реакций, в частности сжигания топлив, поскольку камеры работоспособны и в режиме псевдоожигения в поле силы тяжести, когда центробежные силы малы. При этом в указанных камерах сохраняется фактор обтекания частиц высокоскоростным закрученным потоком, который влияет на интенсификацию тепло- и массообмена между газом и частицами. Детальный анализ режи-

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.607.21.0106).

© Дворников Н. А., 2015.

мов горения в неподвижном слое частиц выполнен в работах по фильтрационному горению газовых смесей (см., например, [15, 16]), а также в исследованиях по горению смесей в псевдооживленном слое в поле силы тяжести [17]. Характерные особенности горения в псевдооживленном слое в закрученном потоке газа [9] сходны с наблюдаемыми при горении в псевдооживленном слое в поле силы тяжести [17] и при фильтрационном горении [15, 16], например, это касается превышения температурой газа адиабатического значения за счет прогрева еще не реагирующего газа слоем частиц. Однако имеются количественные и качественные отличия за счет того, что суммарное ускорение вращающегося слоя выше гравитационного ускорения, при этом скорость газа больше, а псевдооживленный слой обычно заметно тоньше псевдооживленного слоя в поле силы тяжести. Поэтому в таких слоях более существенным становится отношение толщины зоны горения газа, где его температура выше температуры слоя и идет разогрев слоя, к толщине зоны прогрева газа до температуры воспламенения, где происходит охлаждение слоя частиц. Кроме того, малая толщина слоя требует оценки числа Дамкёлера, которое характеризует полноту сгорания топлива в слое.

В настоящей работе на основе данных численного расчета проведена оценка режима горения в вихревых камерах различных конструкций с помощью числа Дамкёлера. Выполнен качественный анализ роли теплообмена газа со слоем в процессе горения в вихревой камере с использованием упрощенной физической модели горения и разогрева слоя в момент запуска процесса горения.

### РАСЧЕТ ЗАКРУЧЕННОГО ПСЕВДООЖИВЛЕННОГО СЛОЯ И ЕГО ДИНАМИКИ ПРИ ГОРЕНИИ ПРОПАНА В ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ

Так же как и в работе [9], расчеты динамики слоя частиц в вихревой камере при горении пропана выполнены с помощью программы Fluent, установленной в Вычислительном центре коллективного пользования СО РАН. Использовалась математическая модель течения и массопереноса в реагирующем многофазном потоке [9], включающая в себя: уравнение неразрывности для каждой из фаз

$$\frac{\partial \alpha_q \rho_q}{\partial t} + \nabla(\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) = \sum_{p=1}^n \dot{m}_{pq}, \quad (1)$$

уравнение переноса для отдельных веществ

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_q \rho_q C_i^q}{\partial t} + \nabla(\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q C_i^q) = & -\nabla(\alpha_q \mathbf{J}_i^q) + \alpha_q R_i^q + \\ & + \alpha_q S_i^q + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{p^i q^j} - \dot{m}_{p^j q^i}) + R, \end{aligned} \quad (2)$$

уравнение количества движения

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q}{\partial t} + \nabla(\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q \mathbf{v}_q) = & -\alpha_q \nabla p + \nabla \bar{\tau}_q + \\ & + \alpha_q \rho_q \mathbf{g} + \sum_{p=1}^n (\mathbf{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \mathbf{v}_{pq}) + \alpha_q \rho_q \mathbf{F}_q, \end{aligned} \quad (3)$$

уравнение энергии

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_q \rho_q h_q}{\partial t} + \nabla(\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q h_q) = & \alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \bar{\tau}_q : \nabla \mathbf{v}_q - \\ & - \nabla \mathbf{q}_q + S_q + \sum_{p=1}^n (Q_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{pq}), \end{aligned} \quad (4)$$

$k$ - $\varepsilon$ -модель турбулентности для каждой фазы

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_q \rho_q k_q}{\partial t} + \nabla(\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q k_q) = & \nabla \left( \alpha_q \frac{\mu_{tq}}{\sigma_k} \nabla k_q \right) + \\ & + (\alpha_q G_{kq} - \alpha_q \rho_q \varepsilon_q) + \sum_{l=1}^N K_{lq} (C_{lq} k_l - C_{ql} k_q) - \\ & - \sum_{l=1}^N K_{lq} (\mathbf{v}_l - \mathbf{v}_q) \frac{\mu_{tl}}{\alpha_l \sigma_l} \nabla \alpha_l + \\ & + \sum_{l=1}^N K_{lq} (\mathbf{v}_l - \mathbf{v}_q) \frac{\mu_{tq}}{\alpha_q \sigma_q} \nabla \alpha_q, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_q \rho_q \varepsilon_q}{\partial t} + \nabla(\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q \varepsilon_q) = & \nabla \left( \alpha_q \frac{\mu_{tq}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon_q \right) + \\ & + \frac{\varepsilon_q}{k_q} [C_{1\varepsilon} \alpha_q G_{kq} - C_{2\varepsilon} \alpha_q \rho_q \varepsilon_q] + \\ & + C_{3\varepsilon} \frac{\varepsilon_q}{k_q} \left[ \sum_{l=1}^N K_{lq} (C_{lq} k_l - C_{ql} k_q) - \right. \end{aligned}$$

$$- \sum_{l=1}^N K_{lq}(\mathbf{v}_l - \mathbf{v}_q) \frac{\mu_{tl}}{\alpha_l \sigma_l} \nabla \alpha_l + \left. + \sum_{l=1}^N K_{lq}(\mathbf{v}_l - \mathbf{v}_q) \frac{\mu_{tq}}{\alpha_q \sigma_q} \nabla \alpha_q \right]. \quad (6)$$

Здесь для обозначения взаимопроникающих жидкостей используются индексы  $p, q, l$ ;  $\mathbf{v}_q$ ,  $\mathbf{v}_l$  — вектор скорости жидкости;  $\mathbf{v}_{pq}$  — вектор скорости межфазного взаимодействия;  $\alpha_q$ ,  $\alpha_l$  — объемная доля жидкости в потоке;  $\rho_q$ ,  $\rho_l$  — плотность вещества жидкости;  $C_i^q$  — концентрация вещества  $i$  в фазе  $q$ ;  $\mathbf{F}_q$  — массовая сила;  $\mathbf{g}$  — ускорение свободного падения;  $p$  — давление;  $h_q$  — удельная энтальпия жидкости  $q$ ;  $\mathbf{J}_i^q$  — диффузионный поток вещества  $i$ , содержащегося в жидкости  $q$ ;  $k_q, k_l$  — турбулентная энергия жидкости;  $K_{lq} = \alpha_q \alpha_l \rho_l f / \tau_l$  — коэффициент обмена импульсом между фазами  $l$  и  $q$ , где  $f = \frac{C_d \text{Re}_l}{24}$  — коэффициент сопротивления,  $C_d = \frac{24}{\text{Re}_l} (1 + 0.15 \text{Re}_l^{0.687})$  при  $\text{Re}_l < 1000$  и  $C_d = 0.44$  при  $\text{Re}_l \geq 1000$ ,  $\text{Re}_l$  — число Рейнольдса, построенное по скорости обтекания и диаметру частиц;  $\tau_l = \rho_l d_l^2 / \mu_q$  — время релаксации частицы;  $\dot{m}_{pq}$  — источник массы перехода вещества из жидкости  $p$  в жидкость  $q$ ;  $\dot{m}_{p^i q^j}$  — источник вещества  $j$  в жидкости  $q$ , которое перешло из вещества  $i$  жидкости  $p$ ;  $\mathbf{q}_q$  — тепловой поток в жидкости  $q$ ;  $Q_{pq}$  — источник обмена теплом между жидкостями  $p$  и  $q$ ;  $R_i^q$  — скорость образования вещества  $i$  за счет реакций в жидкости  $q$ ;  $R$  — скорость гетерогенной реакции;  $\mathbf{R}_{pq}$  — вектор силы воздействия жидкости  $p$  на жидкость  $q$ ;  $S_i^q$  — источниковый член образования вещества  $i$  в жидкости  $q$ ;  $S_q$  — источниковый член тепла, связанного с химическими реакциями, излучением;  $\varepsilon_q$  — скорость диссипации турбулентной энергии жидкости  $q$ ;  $\bar{\tau}_q$  — тензор напряжений жидкости  $q$ ;  $\mu_{tq}, \mu_{tl}$  — турбулентная вязкость жидкости;  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $C_{3\varepsilon} = 0$ ,  $C_{ql} = C_{lq} = 2$ ,  $\sigma_k = 1$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ,  $\sigma_p = \sigma_q = \sigma_l = 1$ .

Модель учитывает химические реакции внутри  $q$ -й фазы (характеризуемые скоростью  $R_i^q$ ) и на поверхности частиц (характеризуемые скоростью  $R$ ), скорость обмена веществом

между отдельными взаимопроникающими фазами  $\dot{m}_{pq}$  и внешнюю массовую силу  $\mathbf{F}_q$ . Источниковый член  $S_i^q$  задается дополнительно, например, для учета источника вещества от дискретных частиц, не включенных в модель взаимопроникающих жидкостей. Вектор скорости межфазного взаимодействия  $\mathbf{v}_{pq}$  определяется следующим образом: если  $\dot{m}_{p^i q^j} > 0$ , что означает переход фазы  $p$  в фазу  $q$ , то  $\mathbf{v}_{pq} = \mathbf{v}_p$ , и, наоборот, если  $\dot{m}_{p^i q^j} < 0$ , то  $\mathbf{v}_{pq} = \mathbf{v}_q$ .

Аррениусовская модель горения в ряде случаев дает хорошее соответствие по составу продуктов реакции и используется в расчетах и для турбулентного горения. Для описания горения пропана применялась система из трех глобальных реакций из работы [9]:

скорость реакции окисления пропана  
 $\text{C}_3\text{H}_8 + 3.5\text{O}_2 = 3\text{CO} + 4\text{H}_2\text{O}$

$$R_1^1 = k_1(T) C_{\text{C}_3\text{H}_8}^{0.1} C_{\text{O}_2}^{1.65},$$

где  $k_1 = A_1 \exp(-E_1/(RT))$  — константа скорости реакции,  $A_1 = 5.56 \cdot 10^9$  — предэкспоненциальный множитель,  $E_1 = 1.256 \times 10^8$  Дж/кмоль — энергия активации;

скорость реакции окисления оксида углерода  
 $\text{CO} + 0.5\text{O}_2 = \text{CO}_2$

$$R_2^1 = k_2(T) C_{\text{CO}} C_{\text{O}_2}^{0.25},$$

где  $k_2 = A_2 \exp(-E_2/(RT))$ ,  $A_2 = 2.239 \cdot 10^{12}$ ,  $E_2 = 1.7 \cdot 10^8$  Дж/кмоль;

скорость реакции разложения диоксида углерода  
 $\text{CO}_2 = \text{CO} + 0.5\text{O}_2$

$$R_3^1 = k_3(T) C_{\text{CO}_2},$$

где  $k_3 = A_3 \exp(-E_3/(RT))$ ,  $A_3 = 5 \cdot 10^8$ ,  $E_3 = 1.7 \cdot 10^8$  Дж/кмоль.

Начальные и граничные условия горения пропановоздушной смеси в вихревой камере также взяты из работы [9].

На входе в вихревую камеру задавались компоненты скорости газового потока, состав и температура газовой смеси, соответствующие ее заданному расходу и геометрии завихрителя; интенсивность турбулентности (1 %) и ее масштаб, соответствующий ширине щелей завихрителя. На стенках камеры задавались условия прилипания для газа и дисперсной фазы. Для расчета горения в конической камере тепловой поток в ней определялся по излучению ее стенок во внешнюю среду на основе закона Стефана — Больцмана. Для цилиндрических камер стенки камеры полагались

теплоизолированными. Считалось, что стенки непроницаемы для газа и частиц дисперсного вещества. Коэффициент восстановления скорости этих частиц при их отскоке от стенки камеры по нормальному и касательному направлениям принят равным 0.5. В выходном сечении камеры задавалось атмосферное давление, возвратное течение считалось ламинарным с температурой 293 К и отсутствием вращения.

Предполагалось, что температура газа в камере равна температуре газа на ее входе, газ и слой частиц дисперсного материала в нижней части камеры неподвижны, интенсивность турбулентности в камере равна нулю в момент инициирования течения в камере. В начальный момент времени задавались масса дисперсного материала и его температура. Для расчетов использовалась неявная первого порядка схема по времени и второго порядка схема QUIK по пространству [18].

Число расчетных ячеек в сетке для конической камеры равно 8485. Увеличение числа ячеек в четыре раза при одинаковом времени горения давало результаты расчета, совпадающие с точностью 0.001 относительной погрешности. Аналогичная проверка измельчения сеток проводилась для камер с боковым завихрителем с числом расчетных ячеек 9095 и для камер с нижним торцевым завихрителем с числом ячеек 6048.

Исследуемые варианты перечислены ниже.

**Вариант 1. Коническая камера [9].** Камера состоит из конических боковых завихрителей (двадцать щелей шириной по 2 мм, направленных под углом  $72^\circ$  к радиусу) и корпуса. Угол между осью камеры и образующей завихрителя  $45^\circ$ , максимальный радиус камеры 174 мм, диаметр выходного патрубка 60 мм, расстояние между коническими боковыми стенками 60 мм. Дисперсный материал засыпается или подается в зазор между коническими стенками корпуса и коническим завихрителем. Закрученный поток газообразного реагента проходит сквозь псевдооживленный слой каталитического или инертного материала вдоль конической поверхности, сужающейся кверху, а слой дисперсного материала удерживается результирующими центробежными и гравитационными силами, а также взаимодействием с коническими поверхностями, сужающимися к выходному отверстию вверх. Рассматривалось горение пропана в смеси с воздухом с массовой долей

пропана 0.0385 и расходом смеси 0.787 кг/с. Смесь предварительно подогревали до 500 К за счет теплообмена в зазоре между камерой и кожухом. Слой песка массой 3.86 кг с размером частиц 1 мм и плотностью 2600 кг/м<sup>3</sup> был предварительно разогрет до температуры 1000 К. В настоящей работе для камер всех конструкций расчет выполнялся для одного и того же времени от начала горения — 10 с. Выбор этого значения обусловлен стремлением исследовать начальный период горения, когда прогрев слоя или его охлаждение до стационарного состояния еще не завершены. Это позволяет за небольшой период развития горения определить, будет ли слой разогреваться, или он будет охлаждаться, причем в первом случае процесс сопровождается уменьшением времени сгорания топлива и переходом в режим горения, а во втором — отрывом пламени от слоя частиц. Оценки показывают, что во всех рассмотренных случаях при разогреве слоя до температуры сгорания газовой смеси число Дамкёлера значительно больше единицы и горение реализуется только в слое. Поэтому если слой разогревается с начала процесса, горение будет без пламени вне слоя, если охлаждается — произойдет отрыв пламени от слоя.

На рис. 1,а показана объемная концентрация частиц в конической вихревой камере, на рис. 1,б — температура смеси, на рис. 1,в — массовая концентрация углекислого газа. Видно, что в слое температура газовой смеси достигает своих максимальных значений, концентрация углекислого газа становится максимальной сразу за границей слоя уже в первые десять секунд после начала горения. Низкая температура газа на выходе из камеры по сравнению с температурой равновесного сгорания (1733 К в адиабатических условиях без подогрева газа (285 К) и 1893 К при подогреве исходной смеси до 500 К) указывает на интенсивный разогрев слоя частиц отходящими газами.

Экспериментальные данные [9] подтверждают факт сгорания смеси в слое частиц при рассмотренных условиях сжигания в конической камере.

**Вариант 2. Цилиндрическая камера с нижним торцевым завихрителем [9].** Диаметр камеры 100 мм, высота 160 мм. Над верхней частью камеры устанавливался патрубок диаметром 70 мм и высотой 50 мм. Закрученный поток создавался с помощью торцевого завих-

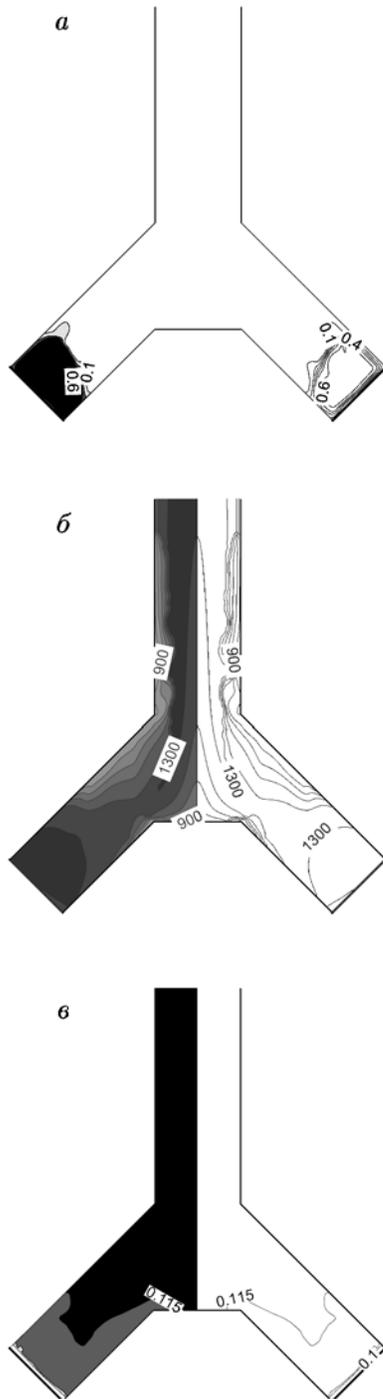


Рис. 1. Объемная доля частиц слоя ( $[m^3 \text{ частиц}]/[m^3 \text{ смеси}]$ , а), температура газа (К, б), массовая концентрация углекислого газа (в) в конической вихревой камере через 10 с после начала горения пропановоздушной смеси



Рис. 2. Объемная доля частиц слоя ( $[m^3 \text{ частиц}]/[m^3 \text{ смеси}]$ , а), температура газа (К, б), массовая концентрация углекислого газа (в) в цилиндрической вихревой камере с нижним торцевым завихрителем через 10 с после начала горения пропановоздушной смеси

рителя, расположенного на нижнем торце камеры. Торцевой завихритель имел 12 щелей шириной 1.5 мм с углом наклона к горизонтальной поверхности  $7^\circ$ . Ширина торцевого завихрителя по радиусу — 7 мм. Площадь проходного сечения щелей завихрителя —  $126 \text{ мм}^2$ .

Расчет горения пропана в этой камере выполнен при следующих условиях: в камеру подается пропановоздушная смесь с массовой долей пропана 0.0385; смесь разогрета до 500 К; слой песка с диаметром частиц 1 мм и массой 146.5 г предварительно разогрет до 1000 К; газ подается через нижний торцевой завихритель с расходом 0.0015 кг/с; тангенциальная скорость газа на выходе из щелей 73.4 м/с.

Результаты расчета объемной концентрации частиц (рис. 2,а), температуры газа (рис. 2,б) и концентрации углекислого газа (рис. 2,в) через 10 с после начала горения показывают, что смесь частично сгорает в слое, частично — в надслоевом пространстве, факел на выходе из камеры не образуется. Большая часть слоя частиц прогревается до температуры выше 1000 К, что должно приводить к более быстрому сгоранию топлива в слое после его разогрева. Экспериментальные данные [9] подтверждают этот вывод.

**Вариант 3. Цилиндрическая камера с боковым завихрителем при начальной температуре слоя частиц 1000 К.** В работе [9] горение в такой камере исследовалось только экспериментально в указанных ниже условиях, расчеты были выполнены для изотермического течения газа в слое без горения. В экспериментах [9] установлен факельный режим горения пропана в этой камере. Расчеты горения для тех же условий, что в опытах [9], выполнены в настоящей работе. Использовалась вихревая камера высотой 80 мм и диаметром 200 мм с боковым щелевым завихрителем в нижней ее части. Над верхней частью камеры устанавливался патрубок диаметром 60 мм и высотой 35 мм. Щелевой боковой завихритель представлял собой цилиндр с внешним диаметром 216 мм и высотой 50 мм. Закручивающая решетка состояла из набора щелей шириной 2 мм, фрезерованных под углом  $72^\circ$  к образующей. Относительная площадь проходного сечения составляла 5 % от боковой поверхности, занимаемой завихрителем. Расход смеси с массовой долей пропана 0.0385 при температуре 500 К равнялся 0.0588 кг/с. В качестве материала рассматривался песок с диаметром частиц 1 мм и

их плотностью 2600 кг/с. Масса песка в камере 0.342 кг. Первоначально песок был нагрет до температуры 1000 К. Тангенциальная скорость газа на выходе из щелей 39.4 м/с.

Результаты расчета объемной концентрации частиц представлены на рис. 3,а, температуры газа — на рис. 3,б, массовой концентра-

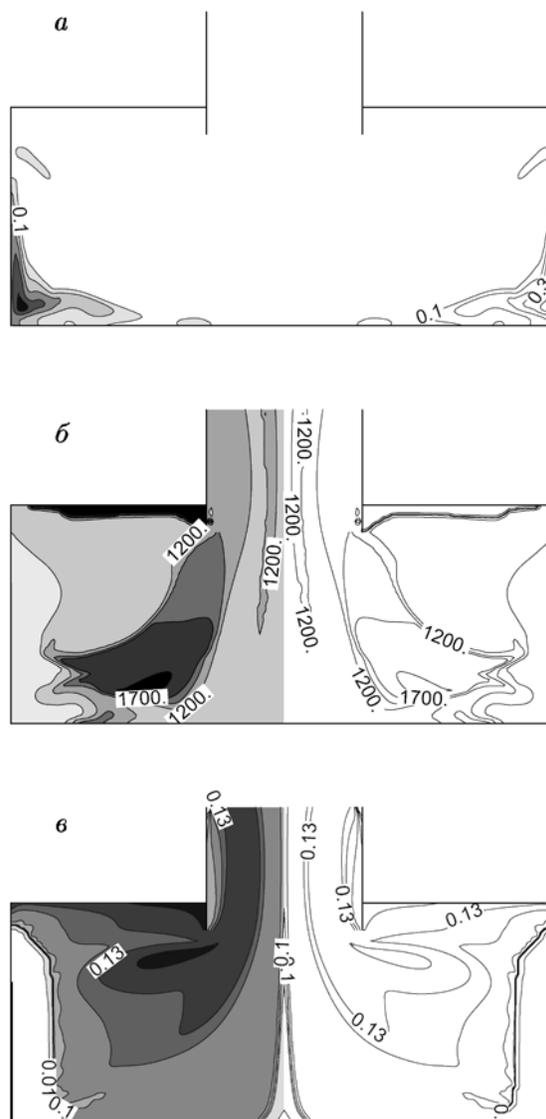


Рис. 3. Объемная доля частиц слоя ( $[\text{м}^3 \text{ частиц}]/[\text{м}^3 \text{ смеси}]$ , а), температура газа (К, б), массовая концентрация углекислого газа (в) в цилиндрической вихревой камере с боковым завихрителем при начальной температуре слоя частиц 1000 К через 10 с после начала горения пропановоздушной смеси

ции углекислого газа в смеси — на рис. 3,б. Видно, что слой практически полностью находится в области температуры газа ниже 1000 К, что указывает на охлаждение слоя частиц, а содержание углекислого газа в зоне расположения слоя очень низкое. Соответственно в зоне выхода газа из камеры имеются области с пониженным содержанием углекислого газа в отходящем потоке, что свидетельствует о незавершенности процесса в этой зоне и о факельном режиме горения газа. Данные результаты согласуются с экспериментами [9].

**Вариант 4. Цилиндрическая камера с боковым завихрителем при начальной температуре слоя частиц 1200 К.** Единственное отличие от варианта 3 — в увеличении начальной температуры слоя частиц с 1000 до 1200 К. Сделано это с целью ускорить процесс горения в слое, чтобы получить горение без факела над слоем. Этот вариант горения, как и предыдущий, рассчитан нами в настоящей работе.

Качественно распределение объемной концентрации частиц (рис. 4,а) близко к распределению в предыдущем случае, а горение газовой смеси начинается раньше, частично располагаясь во внешней части слоя, о чем свидетельствуют распределения температуры газа (рис. 4,б) и концентрации углекислого газа (рис. 4,в). Однако большая часть слоя находится в зоне охлаждения, где температура газа меньше температуры слоя 1200 К. Соответственно, как и в предыдущем случае, распределение концентрации углекислого газа в окрестности выхода из камеры имеет зону неполного сгорания и на выходе должен наблюдаться факел.

#### ОЦЕНКА РЕЖИМА ГОРЕНИЯ В ВИХРЕВЫХ КАМЕРАХ

Для оценки режима горения в слое частиц в вихревых камерах примем следующие допущения. Смесь воздуха с горючим газом, проходя сквозь слой частиц, нагревается от первоначальной температуры до температуры воспламенения. Температуру воспламенения пропана примем равной 777.15 К. Число Дамкёлера, характеризующее отношение времени прохождения слоя после начала горения ко времени сгорания топлива, оцениваем по начальной скорости прохождения газа сквозь слой и по температуре слоя. Толщину, на которой газ прогреется до температуры воспламенения, определяем по модели, описанной в работах [14, 19].

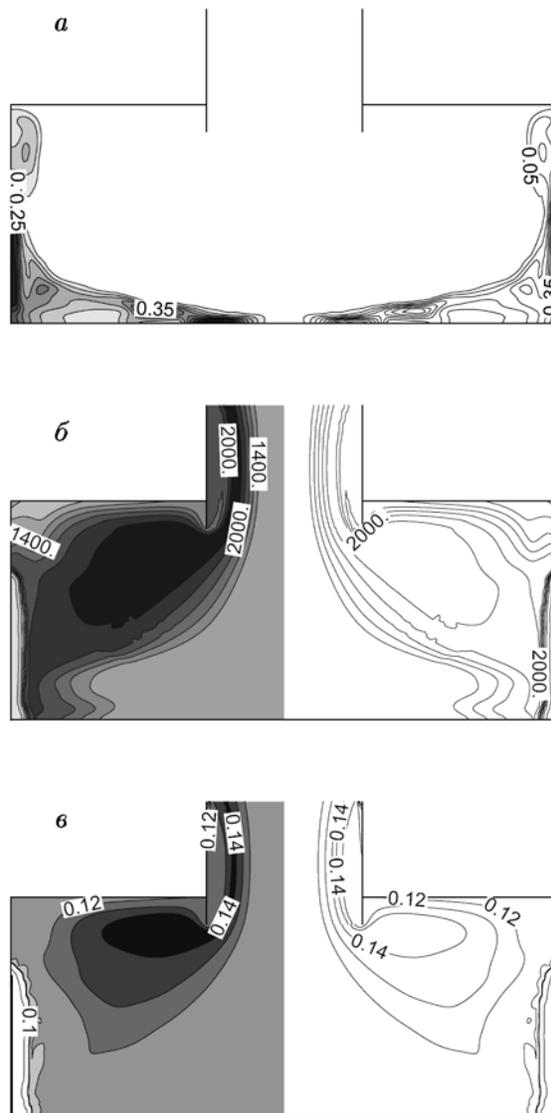


Рис. 4. Объемная доля частиц слоя ( $[\text{м}^3 \text{ частиц}]/[\text{м}^3 \text{ смеси}]$ , а), температура газа (К, б), массовая концентрация углекислого газа (в) в цилиндрической вихревой камере с боковым завихрителем при начальной температуре слоя частиц 1200 К через 10 с после начала горения пропановоздушной смеси

Согласно этой модели, основанной на балансе тепла газа и слоя частиц, безразмерная температура газа на глубине  $b_0$  при прохождении сквозь слой частиц определяется по формуле

$$k_2 = \frac{T_{a2} - T_{ps}}{T_{a0} - T_{ps}} = \exp\left(-\frac{6\alpha_p \text{Nu} \lambda_a}{d_p^2 \rho_a c_{pa} v_{a0}} b_0\right), \quad (7)$$

где  $T_{a2}$  — температура газа на глубине  $b_0$ ,  $T_{a0}$  — начальная температура газа,  $T_{ps}$  — температура слоя частиц,  $\alpha_p$  — объемная концентрация частиц в слое,  $\rho_a$  — плотность газа на входе в слой,  $c_{pa}$ ,  $\lambda_a$  — теплоемкость и теплопроводность газа на входе в слой,  $v_{a0}$  — скорость протока газа на входе в слой,  $d_p$  — диаметр частиц в слое,  $\text{Nu} = 2 + 0.51\text{Re}_p^{0.52}\text{Pr}^{0.33}$  — число Нуссельта,  $\text{Re}_p = \rho_a v_{a0} d_p / \mu$  — число Рейнольдса,  $\mu$  — вязкость потока на входе в слой.

Приняв температуру на текущей глубине равной температуре воспламенения, можно определить координату по толщине слоя, на которой произойдет воспламенение смеси:

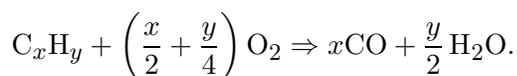
$$b_0 = \frac{d_p^2 \rho_a c_{pa} v_{a0} \ln k_2}{6\alpha_p \text{Nu} \lambda_a}. \quad (8)$$

Принимая, что в рассматриваемых условиях до точки воспламенения топлива идет охлаждение слоя частиц за счет передачи тепла от них к газу, а после воспламенения газа протекает обратный процесс передачи тепла от горящего газа к частицам, можно ввести геометрический параметр слоя, характеризующий его разогрев или охлаждение на начальном этапе зажигания горючей смеси:

$$\text{He} = \frac{b - b_0}{b_0}. \quad (9)$$

При  $\text{He} > 1$  зона разогрева слоя толще зоны охлаждения и можно допустить, что идет разогрев слоя, соответственно в нем будет происходить горение смеси при выходе на стационарный режим. При  $\text{He} < 1$  слой будет охлаждаться и пламя будет отрываться от слоя частиц. Конечно, этот параметр не учитывает ряд существенных факторов, определяющих нагрев или охлаждение слоя: перепад температур между газом и слоем, коэффициент теплообмена между газом и частицами, объемное содержание частиц в слое и др. Но в первом приближении его можно использовать для оценки режима горения. Другим важным фактором является число Дамкёлера. При  $\text{Da} > 1$  топливо успевает сгореть до выхода из слоя, при  $\text{Da} < 1$  в слое сгорит только часть топлива.

Число Дамкёлера будем оценивать с учетом одной глобальной реакции



Уравнение кинетики сгорания топлива

$$\frac{dC_f}{d\tau} = k C_f^{0.25} C_{\text{O}_2}^{1.5}, \quad (10)$$

размерность  $C$  — кмоль/м<sup>3</sup>.

Воспользуемся константой скорости, предложенной в работе [20]:

$$k = 10^{9.55} \exp\left(-\frac{15106}{T}\right),$$

размерность  $k$  — [м<sup>3</sup>/кмоль]<sup>0.75</sup>/с. Проинтегрировав уравнение (10), получим

$$\frac{C_{f0}^{0.75} - C_f^{0.75}}{0.75} = k C_{\text{O}_2}^{1.5} \tau.$$

Отсюда находим время уменьшения концентрации топлива до значения  $C_f$ :

$$\tau = \frac{C_{f0}^{0.75} - C_f^{0.75}}{0.75 k C_{\text{O}_2}^{1.5}}.$$

Время прохождения газа слоя от точки воспламенения до выхода из слоя

$$\tau_h = \frac{b_c - b_0}{v}.$$

Число Дамкёлера находим как отношение времени, которое газ находится в слое с момента воспламенения, ко времени химической реакции газа до момента уменьшения концентрации топлива до значения  $C_f = 0.01 C_{f0}$ :

$$\text{Da} = \tau_h / \tau.$$

В рассмотренных ранее вариантах концентрация пропана в подаваемой смеси на входе в слой составляла  $6.01 \cdot 10^{-4}$  кмоль/м<sup>3</sup>, концентрация кислорода —  $4.53 \cdot 10^{-3}$  кмоль/м<sup>3</sup>.

На рис. 5 приведены значения числа Дамкёлера и геометрического фактора разогрева слоя частиц  $\text{He}$  для четырех рассмотренных вариантов сжигания пропановоздушной смеси в вихревых камерах с псевдооживленным слоем частиц. Видно, что в конической камере в начальный период горения смеси происходит разогрев слоя, а число Дамкёлера больше единицы, т. е. топливо сгорает полностью с начала запуска горения. В вихревой камере с нижним торцевым завихрителем слой также разогревается, однако на начальном этапе топливо в слое не сгорает полностью. С разогревом слоя сгорание топлива ускоряется, и, как показывает

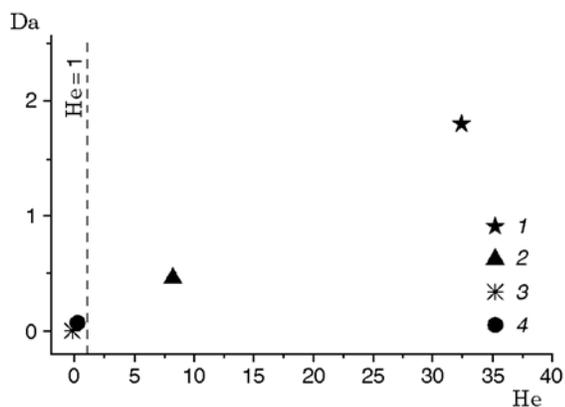


Рис. 5. Значение чисел Da и He в рассмотренных вариантах горения смеси:

1 — коническая вихревая камера, температура слоя  $T_{\text{сл}} = 1000$  К, 2 — цилиндрическая вихревая камера с нижним торцевым завихрителем,  $T_{\text{сл}} = 1000$  К, 3, 4 — цилиндрическая вихревая камера с боковым завихрителем при  $T_{\text{сл}} = 1000$  и  $1200$  К соответственно

эксперимент [9] в конической камере и в камере с торцевым завихрителем, в стационарном режиме топливо полностью сгорает в слое. В камере с боковым завихрителем  $He < 1$  при предварительном разогреве слоя как до  $1000$  К, так и до  $1200$  К, что свидетельствует об охлаждении слоя и дальнейшем уменьшении числа Дамкёлера ниже единицы в процессе горения. Это указывает на отрыв пламени от слоя и факельный режим горения. Эксперименты [9] подтверждают указанный вывод.

На рис. 6 показана зависимость разогре-

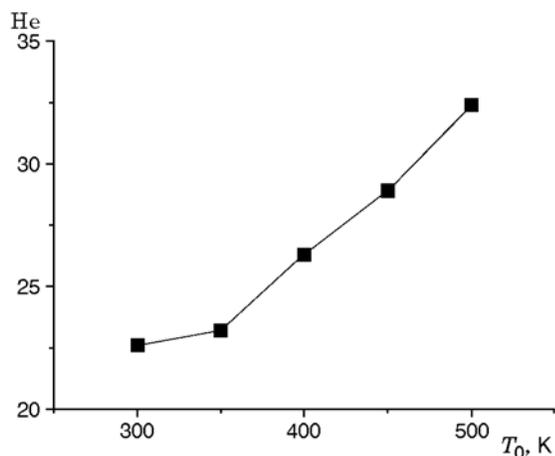


Рис. 6. Параметр разогрева слоя в конической камере в зависимости от температуры входящей газовой смеси

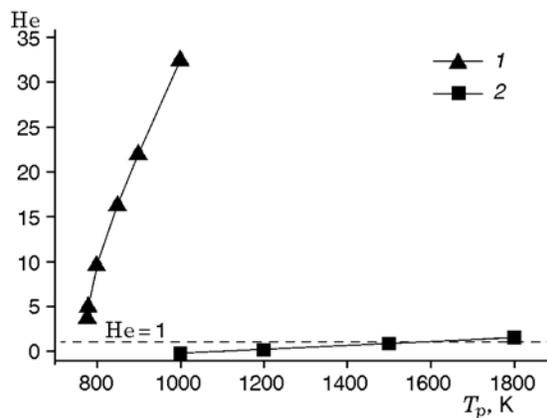


Рис. 7. Параметр разогрева слоя в конической камере (1) и цилиндрической камере с боковым завихрителем (2) в зависимости от температуры слоя частиц в начальный момент горения

ва слоя частиц в конической камере от входной температуры смеси (начальная температура слоя  $1000$  К). Видно, что даже без предварительного подогрева подаваемой смеси горение в слое устойчивое, а слой частиц должен разогреваться.

Зависимость параметра разогрева слоя в конической камере и камере с боковым завихрителем от начальной температуры слоя при температуре подаваемой горючей смеси  $500$  К показана на рис. 7. Видно, что в конической камере  $He > 1$  при температуре слоя вплоть до температуры воспламенения, тогда как в цилиндрической камере с боковым завихрителем  $He > 1$  только при температуре слоя более  $1500$  К, что указывает на невозможность организовать горение в слое в камере с боковым завихрителем при начальной температуре слоя частиц ниже  $1500$  К.

## ВЫВОДЫ

1. Предложенный геометрический параметр разогрева слоя в первом приближении позволяет оценить возможность сжигания топлива в слое частиц в вихревой камере.

2. В конической вихревой камере возможна организация горения в слое в широком диапазоне параметров камеры и режимов течения.

3. В камере с боковым завихрителем в широком диапазоне параметров горение будет происходить с отрывом пламени от слоя.

4. В камерах с нижним торцевым завихрителем можно организовать горение в слое, од-

нако по параметру разогрева слоя она находится в промежуточном положении между конической камерой и камерой с боковым завихрителем.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Dutta A., Ekatpure R. P., Heynderickx G. J., Broqueville A., Marin G. B.** Rotating fluidized bed with a static geometry: Guidelines for design and operating conditions // *Chem. Eng. Sci.* — 2010. — V. 65, N 5. — P. 1678–1693.
2. **Kumar S. H., Murthy D. V. R.** Minimum superficial fluid velocity in a gas-solid swirled fluidized bed // *Chem. Eng. Proces.: Process Intensification.* — 2010. — V. 49, N 10. — P. 1095–1100.
3. **Shu J., Lakshmanana V. I., Dodson C. E.** Hydrodynamic study of a toroidal fluidized bed reactor // *Chem. Eng. Proces.: Process Intensification.* — 2000. — V. 39, N 6. — P. 499–506.
4. **Kaewklum R., Kuprianov V. I.** Experimental studies on a novel swirling fluidized-bed combustor using an annular spiral air distributor // *Fuel.* — 2010. — V. 89, N 1. — P. 43–52.
5. **Sathitruangsak P., Madhiyanon T., Sophonrarit S.** Rice husk co-firing with coal in a short-combustion-chamber fluidized-bed combustor (SFBC) // *Fuel.* — 2009. — V. 88, N 8. — P. 1394–1402.
6. **Nieh S., Yang G., Zhu A. Q., Zhao C. S.** Measurements of gas—particle flows and elutriation of an 18 inch i.d. cold vortexing fluidized-bed combustion model // *Powder Technol.* — 1992. — V. 69, N 2. — P. 139–146.
7. **Lin C. H., Teng J. T., Chyang C. S.** Evaluation of the combustion efficiency and emission of pollutants by coal particles in a vortexing fluidized bed // *Combust. Flame.* — 1997. — V. 110, N 1-2. — P. 163–172.
8. **Volchkov E. P., Dvornikov N. A., Lukashov V. V., Abdrakhmanov R. Kh.** The mass transfer and flow field in the vortex chamber with centrifugal fluidized bed // *Proc. Intern. Conf. on Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2008), Novosibirsk, Russia, 2008.* — <http://www.itam.nsc.ru/tmp/Test/5/Volchkov.pdf>.
9. **Волчков Э. П., Дворников Н. А., Лукашов В. В., Бородуля В. А., Теплицкий Ю. С., Пицуха Е. А.** Исследование закрученных газодисперсных течений в вихревых камерах различных конструкций при наличии и отсутствии горения // *Инж.-физ. журн.* — 2012. — Т. 85, № 4. — С. 786–796.
10. **Zhang W.** A review of techniques for the process intensification of fluidized bed reactors // *Chin. J. Chem. Eng.* — 2009. — V. 17, N 4. — P. 688–702.
11. **Leckner B., Szentannai P., Winter F.** Scale-up of fluidized-bed combustion — A review // *Fuel.* — 2011. — V. 90, N 10. — P. 2951–2964.
12. **Дворников Н. А., Зинкин П. В., Ядыкин А. Н.** Исследование псевдооживления в вихревых камерах для удержания инертного материала // *Тр. Третьей Рос. нац. конф. по теплообмену: в 8 т. Т. 5: Двухфазные течения. Дисперсные потоки и пористые среды.* — М.: Изд-во МЭИ, 2002. — С. 199–202. — [http://www.itp.nsc.ru/Laboratory/LAB\\_2.1/papers/3.pdf](http://www.itp.nsc.ru/Laboratory/LAB_2.1/papers/3.pdf).
13. **Стороженко Г. И., Угай Е. Б., Дворников Н. А., Магарамова Н. С., Пивоваров Л. И., Шерстобитова О. Ф.** Принципы конструирования технологического оборудования для измельчения, сушки и классификации минерального сырья // *Строительные материалы.* — 2006. — № 8. — С. 20–22.
14. **Волчков Э. П., Дворников Н. А., Ядыкин А. Н.** Моделирование сушки и удержания зерна в вихревых камерах с протоком воздуха через слой зерна // *Промышленная теплотехника.* — 1999. — Т. 21, № 2-3. — С. 72–78.
15. **Доброго К. В., Жданок С. А.** Физика фильтрационного горения газов. — Минск, 2002.
16. **Лаевский Ю. М., Бабкин В. С.** Стабилизированная волна горения газов в инертной пористой среде // *Физика горения и взрыва.* — 2008. — Т. 44, № 5. — С. 8–15.
17. **Мухленов И. П., Сажин Б. С., Фролов В. Ф.** Расчеты аппаратов кипящего слоя: справочник. — Л.: Химия, 1986.
18. **Leonard V. P.** Order of accuracy of QUICK and related convection-diffusion schemes // *NASA. N E-8236, ICOMP-93-47, NAS 1.15:106402, NASA-TM-106402.* — Cleveland (Ohio), 1993. — <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19940017115.pdf>.
19. **Волчков Э. П., Дворников Н. А., Ядыкин А. Н.** Особенности тепло и массообмена в псевдооживленном слое частиц в вихревой камере // *IV Минский междунар. форум. Тепломассообмен.* — Минск, 2000. — Т. 6. — С. 115–124.
20. **Westbrook C. K., Dryer F. L.** Chemical kinetic modeling of hydrocarbon combustion // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 1984. — V. 10. — P. 1–57.

*Поступила в редакцию 11/VII 2014 г.,  
в окончательном варианте — 4/III 2015 г.*