

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- и МАССООБМЕНА им. А. В. ЛЫКОВА
Журнал основан в январе 1958 г.

ИФЖ

И
**НЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

JOURNAL
OF ENGINEERING PHYSICS
AND THERMOPHYSICS

**Отдельный оттиск
Offprint**

**Том 85, № 4
Vol. 85, No. 4**

ИЮЛЬ–АВГУСТ
JULY–AUGUST

2012

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ПРОЦЕССАХ ГОРЕНИЯ

УДК 532.529

Э. П. Волчков¹, Н. А. Дворников¹, В. В. Лукашов¹,
В. А. Бородуля², Ю. С. Теплицкий², Е. А. Пицуха³

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННЫХ ГАЗОДИСПЕРСНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ВИХРЕВЫХ КАМЕРАХ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ НАЛИЧИИ И ОТСУТСТВИИ ГОРЕНИЯ

Проведено исследование закрученных газодисперсных течений в цилиндрической камере сгорания с боковым завихрителем, конической камере сгорания с непроточным слоем дисперсного материала и цилиндрической камере сгорания с нижним торцевым вводом газа через щелевой завихритель.

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

Введение. Вихревые камеры цилиндрического и конического типов, предназначенные для организации закрученного потока дисперсного материала с целью образования разреженного или псевдооживленного слоя этого материала в камере, широко используются для нагрева и сушки материалов и интенсификации тепло- и массообменных процессов между газом и частицами топлива в процессе его горения. Газодинамика и процессы тепло- и массообмена в таких камерах исследовались в ряде работ [1–15]. Указанные камеры различаются по конструкции и назначению: камеры конического [6, 7, 9, 11] и цилиндрического [1, 2, 5, 8, 9, 14, 15] типов, проточные по дисперсному материалу камеры и камеры, содержащие стационарный слой дисперсного материала, продуваемого закрученным газовым потоком.

Для разработки вихревых камер сгорания со слоем инертного материала представляет интерес численный расчет процессов, происходящих в таких камерах. В связи с этим целью настоящей работы является сравнение характеристик цилиндрической камеры сгорания с боковым завихрителем и конической камеры сгорания с непроточным слоем дисперсного материала, предназначенного для стабилизации горения топлива в камере, с учетом особенностей формирования этого слоя, а также исследование процессов горения в этих камерах и цилиндрической камере с нижним торцевым вводом газа через щелевой завихритель.

Расчет изотермического закрученного псевдооживленного слоя и его динамики при горении пропана в вихревой камере. С использованием программы Fluent выполнены расчеты вихревого псевдооживленного слоя частиц дисперсного материала в изотермических условиях и динамики этого слоя в условиях горения пропана в вихревой камере сгорания. В расчетах использовалась математическая модель, включающая уравнения:

неразрывности для каждой из фаз:

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

переноса для отдельных веществ:

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

количества движения:

$$\frac{\partial \alpha_q \rho_q \mathbf{V}_q}{\partial t} + \nabla (\alpha_q \rho_q \mathbf{V}_q \mathbf{V}_q) = - \alpha_q \nabla P + \nabla \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \mathbf{g} + \sum_{p=1}^n (\mathbf{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \mathbf{V}_{pq}) + \alpha_q \rho_q \mathbf{F}_q; \quad (3)$$

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. 630090, г. Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 1; э-почта: volchkov@itp.nsc.ru; ²Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15; ³ОАО "Белоозерский энергомеханический завод". Республика Беларусь. 225215, г. Белоозерск, ул. Заводская, 1. Поступила 14.11.2011.

энергии:

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

и k - ϵ -модель турбулентности для каждой фазы:

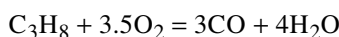
$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_q \rho_q k_q}{\partial t} + \nabla (\alpha_q \rho_q \mathbf{V}_q k_q) = & \nabla \left(\alpha_q \frac{\mu_{qt}}{\sigma_k} \nabla k_q \right) + (\alpha_q G_{qk} - \alpha_q \rho_q \epsilon_q) + \sum_{l=1}^N K_{lq} (C_{lq} k_l - C_{ql} k_q) - \\ & - \sum_{l=1}^N K_{lq}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

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_q \rho_q \epsilon_q}{\partial t} + \nabla (\alpha_q \rho_q \mathbf{V}_q \epsilon_q) = & \nabla \left(\alpha_q \frac{\mu_{qt}}{\sigma_\epsilon} \nabla \epsilon_q \right) + \frac{\epsilon_q}{k_q} \left[C_1 \alpha_q G_{qk} - C_{2\epsilon} \alpha_q \rho_q \epsilon_q \right] + \\ & + C_{3\epsilon} \frac{\epsilon_q}{k_q} \left(\sum_{l=1}^N K_{lq} (C_{lq} k_l - C_{ql} k_q) - \sum_{l=1}^N K_{lq} (\mathbf{V}_l - \mathbf{V}_q) \frac{\mu_{lt}}{\alpha_l \sigma_l} \nabla \alpha_l + \sum_{l=1}^N K_{lq} (\mathbf{V}_l - \mathbf{V}_q) \frac{\mu_{qt}}{\alpha_q \sigma_q} \nabla \alpha_q \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $f = \frac{C_d \text{Re}_l}{24}$, где $C_d = \frac{24}{\text{Re}_l} (1 + 0.15 \text{Re}_l^{0.687})$ для $\text{Re}_l < 1000$ и $C_d = 0.44$ для $\text{Re}_l \geq 1000$.

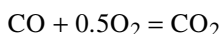
Приведенная модель учитывает химические реакции внутри q -й фазы (характеризуемые скоростью R_i^q), реакции на поверхности частиц (характеризуемые скоростью R), скорость обмена веществом между отдельными взаимопроникающими фазами $\dot{m}_{pq}$ и внешнюю массовую силу $\mathbf{F}_q$. В ней источниковый член S_i^q образования i -го вещества в q -й фазе задается дополнительно, например, для учета источника вещества от дискретных частиц, не включенных в модель взаимопроникающих жидкостей, и вектор скорости межфазного взаимодействия $\mathbf{V}_{pq}$ определяется следующим образом: если $\dot{m}_{p^i q^j} > 0$, что означает переход p -й фазы в фазу q , то $\mathbf{V}_{pq} = \mathbf{V}_p$, и, наоборот, если $\dot{m}_{p^i q^j} < 0$, то $\mathbf{V}_{pq} = \mathbf{V}_q$.

При горении пропана использовалась система из трех глобальных реакций, предложенная в пакете Fluent:



при

$$A_1 = 5.56 \cdot 10^9, \quad E_1 = 1.256 \cdot 10^8 \text{ Дж/кмоль}, \quad R_1^1 = k_1(T) C_{\text{C}_3\text{H}_8}^{0.1} C_{\text{O}_2}^{1.65}, \quad k_1 = A_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right);$$



при

$$A_2 = 2.239 \cdot 10^{12}, \quad E_2 = 1.7 \cdot 10^8 \text{ Дж/кмоль}, \quad R_2^1 = k_2(T) C_{\text{CO}} C_{\text{O}_2}^{0.25}, \quad k_2 = A_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right);$$



при

$$A_3 = 5 \cdot 10^8, \quad E_3 = 1.7 \cdot 10^8 \text{ Дж/кмоль}, \quad R_3^1 = k_3(T) C_{\text{CO}_2}, \quad k_3 = A_3 \exp\left(-\frac{E_3}{RT}\right),$$

где R_1^1, R_2^1, R_3^1 — скорости реакций, k_1, k_2, k_3 — константы скоростей реакций, A_1, A_2, A_3 — предэкспоненциальные множители, E_1, E_2, E_3 — энергии активации.

Граничные условия. Задавались компоненты скорости газового потока на входе в вихревую камеру; 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, тепловой поток в камере определялся по излучению ее стенок во внешнюю среду на основе закона Стефана–Больцмана. Предполагалось, что стенки являются непроницаемыми для газа и частиц дисперсного вещества. Коэффициент восстановления этих частиц при их отскоке от стенки камеры по нормальному и касательному направлениям задавался равным 0.5. В выходном сечении камеры задавалось атмосферное давление, возвратное течение считалось ламинарным с температурой 293 К и отсутствием вращения.

Начальные условия. В качестве начальных условий задавалась масса дисперсного материала и его температура (для всех случаев горения эта температура принималась равной 1000 К). Предполагалось, что темпера-

тура газа в камере равна температуре газа на ее входе, газ и слой частиц дисперсного материала в нижней части камеры неподвижны, интенсивность турбулентности равна нулю в момент инициирования течения в камере.

Цилиндрическая камера с боковым завихрителем. Расчеты выполнялись для вихревой камеры высотой 80 мм и диаметром 200 мм с боковым щелевым завихрителем, установленным в нижней ее части. В рассматриваемых случаях 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, профрезерованных под углом 72° к радиусу камеры. Относительная площадь проходного сечения составляла 5% от боковой поверхности, занимаемой завихрителем. Расход воздуха при температуре 20°C равнялся 0.0785 кг/с. В качестве материала рассматривался песок с плотностью частиц 2600 кг/с и диаметром песчинок 1 мм. Масса песка в камере составляла 0.342 кг.

На рис. 1 показано распределение песка в цилиндрической вихревой камере через 10 с после подачи газа. Видно, что слой песка формируется вдоль боковой поверхности камеры и часть песка движется вблизи нижней торцевой поверхности.

Тангенциальная скорость частиц песка в вихревой камере достигает 3.775 м/с (рис. 2), что на порядок ниже тангенциальной скорости газа (рис. 3). Такое превышение скорости газа над скоростью вращения слоя песка характерно для камер цилиндрического и конического типов [5, 11] с боковым завихрителем. Экспериментальная реализация горения в указанной камере показала, что при наличии слоя из инертного песка горение происходит в значительной мере вне слоя из-за того, что слой достаточно тонкий, а скорость прокачки газа сквозь слой высокая. При снижении расхода газа и уменьшении его скорости вращения верхняя часть бокового завих-

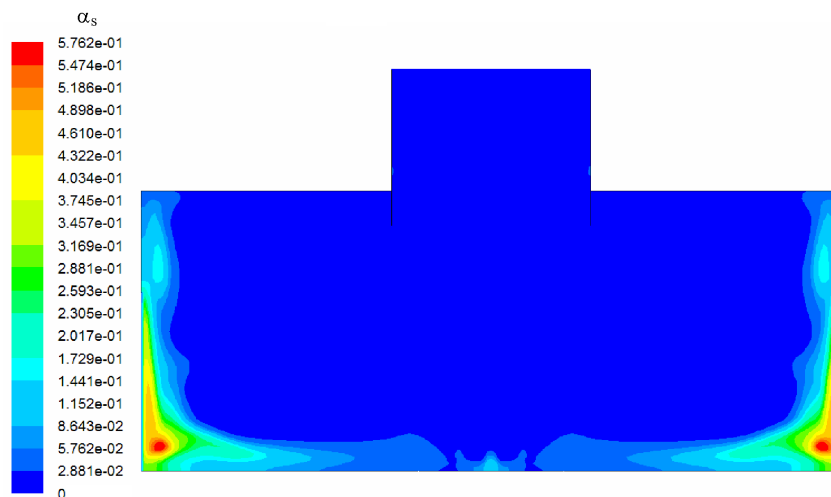


Рис. 1. Распределение объемной доли частиц песка в потоке смеси в цилиндрической вихревой камере через 10 с после подачи газа

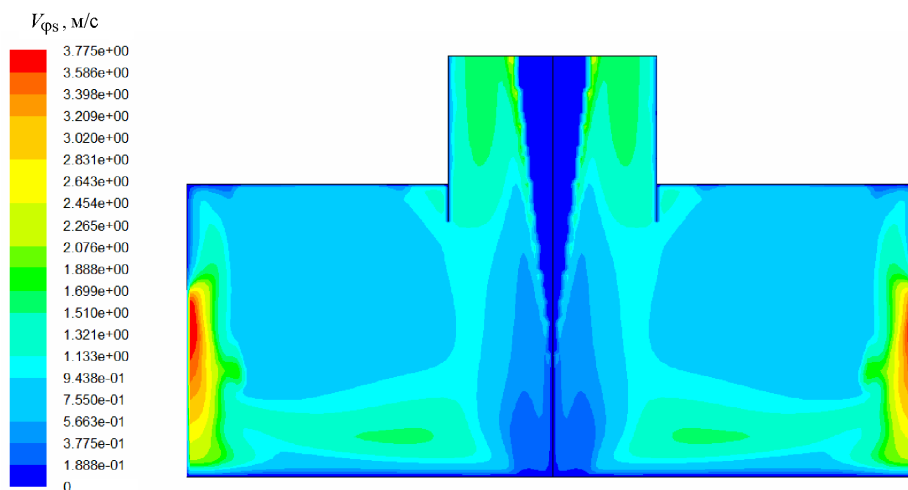


Рис. 2. Распределение тангенциальной скорости частиц песка в цилиндрической вихревой камере через 10 с после подачи газа

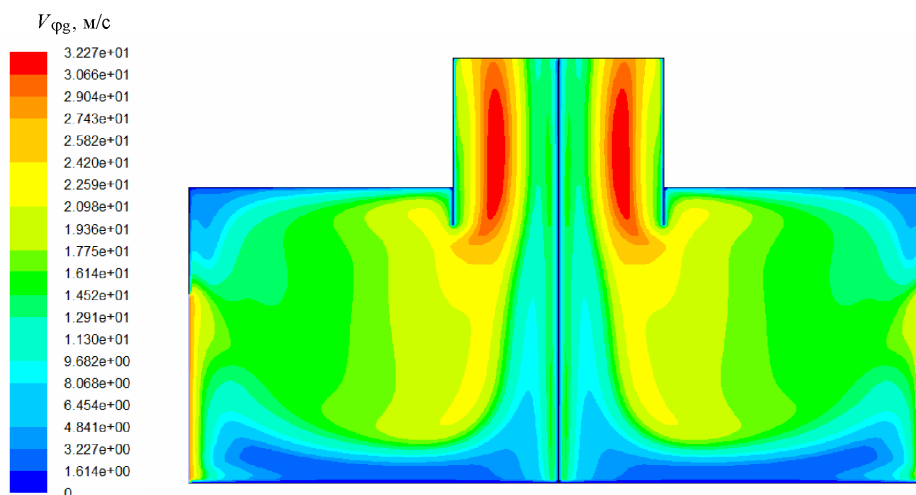


Рис. 3. Распределение тангенциальной скорости воздуха в цилиндрической вихревой камере через 10 с после подачи газа

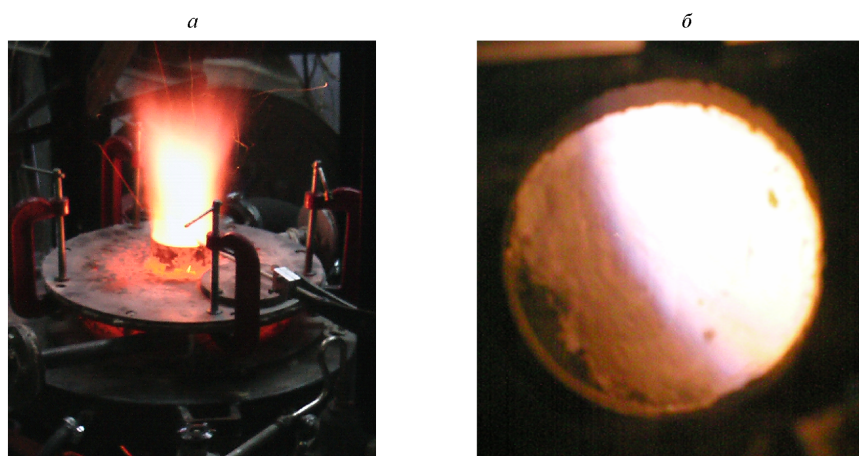


Рис. 4. Характерный вид пламени в камере с боковым завихрителем: *а* — вид сверху камеры; *б* — вид через кварцевое окно на нижнем торце камеры

рителя оголяется и газ проходит через его верхнюю часть при отсутствии теплообмена между частицами песка и газом.

При горении в камере с боковым завихрителем из нее выходит факел, показанный на рис. 4, *а*. Характерный вид слоя песка и пламени в такой камере можно наблюдать через окошко на ее нижнем торце вблизи боковой стенки камеры (рис. 4, *б*). В рассматриваемой камере максимальная загрузка инертным материалом составляла 131 кг/м^3 и в эксперименте, и в расчетах. При замене инертного песка частицами катализатора (порошок марки Al_2O_3) с диаметром частиц 3.5 мм и плотностью гранул 1500 кг/м^3 для интенсификации горения катализатор быстро изнашивался и выносился из камеры из-за высокой скорости вращения его слоя.

Коническая камера. С целью снижения скорости вращения слоя песка при сохранении скорости обтекания его частиц закрученным потоком была рассмотрена коническая вихревая камера, представленная на рис. 5. Эта камера состоит из конических боковых завихрителей 1 (двадцать щелей шириной по 2 мм, направленных под углом 72° к радиусу) и корпуса 2. Угол между осью камеры и образующей завихрителя 45° , максимальный радиус камеры 174 мм, диаметр выходного патрубка 60 мм, расстояние между коническими боковыми 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.

Рассмотрено горение пропана в смеси с воздухом с массовой долей пропана 0.0385 и расходом смеси 0.787 кг/с . Смесь в камере предварительно подогревалась до 500 К за счет тепла, отдаваемого смесью, прохо-

дящей через зазор между камерой и кожухом. Слой песка массой 3.86 кг с размером частиц 1 мм и плотностью 2600 кг/м³ был предварительно разогрет до температуры 1000 К.

Численный расчет двухфазного потока по модели взаимопроникающих континуумов показал, что в отличие от цилиндрической вихревой камеры в конической камере (рис. 5) можно удерживать значительно более толстый слой псевдооживленного материала (до 20 мм в цилиндрической камере и до 50 мм в конической). Соответственно, если в цилиндрической камере максимальное удельное содержание инертного материала (песка) составляло 131 кг/м³, в конической камере максимальное удельное содержание песка составляло 478 кг/м³. При этом скорость вращения слоя песка в конической камере относительно ее стенок уменьшена по сравнению с цилиндрической камерой с 3.78 до 2 м/с (рис. 6), что существенно снижает износ частиц и стенок камеры. Например, в эксперименте гранулы катализатора из порошка Al₂O₃ в камере с боковым завихрителем изнашивались и выносились из камеры за 10 мин, тогда как в конической камере гранулы этого катализатора находились более двух часов без потери массы. Скорость закрутки потока газа быстро падает по мере прохождения слоя (рис. 7), при этом поток в значительной степени смещается к периферии камеры. Характерные температуры газа через 2.69 с после начала горения в конической камере показаны на рис. 8 (равновесная адиабатическая температура составляла 1733 К).

Видно, что в слое песка наблюдается превышение температуры газа над адиабатической температурой сгорания, что является следствием передачи тепла по слою к зоне, где газ еще не сгорел, и где поэтому энтальпия

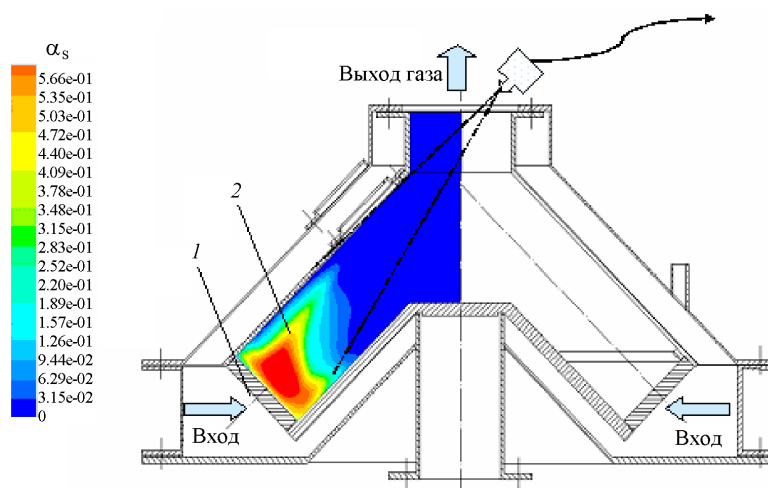


Рис. 5. Коническая вихревая камера: 1 — щелевой завихритель; 2 — слой частиц песка

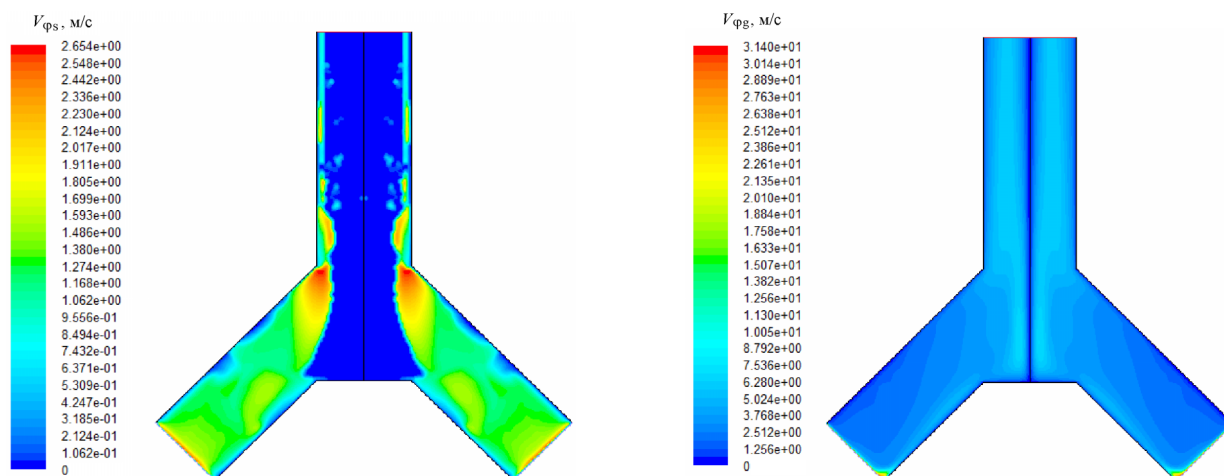


Рис. 6. Распределение тангенциальной скорости частиц песка в конической камере при горении пропана

Рис. 7. Распределение тангенциальной скорости газа в конической камере при горении пропана

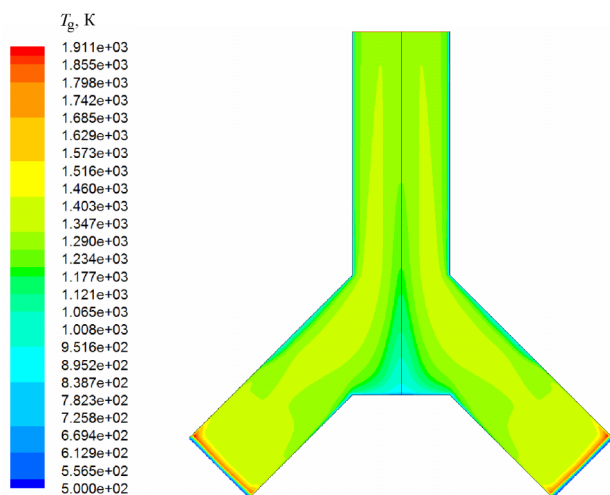


Рис. 8. Распределение температуры газа в конической камере через 2.69 с после подачи газа

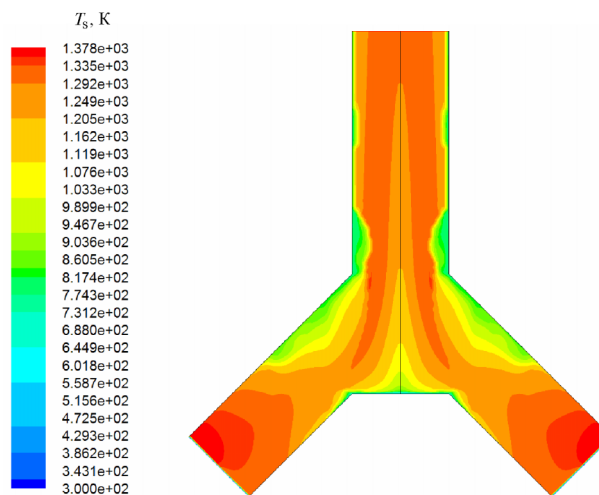


Рис. 9. Распределение температуры частиц песка в конической камере через 2.69 с после подачи газа

Рис. 10. Распределение массовой концентрации углекислого газа в конической камере

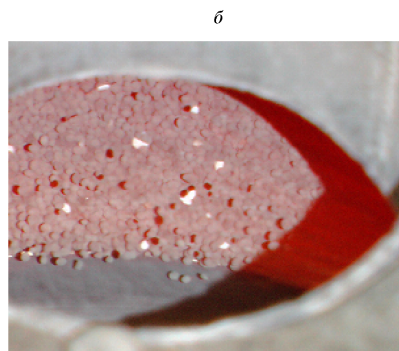
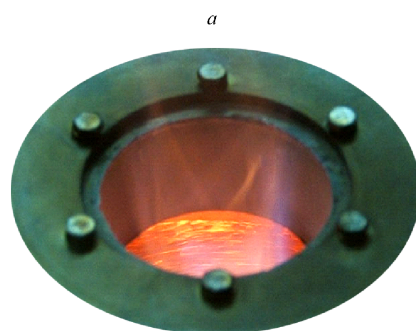
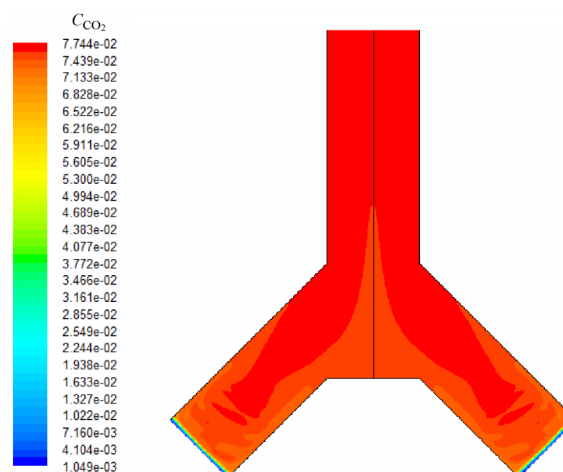


Рис. 11. Изображения слоя песка (а) и катализатора (б) в конической камере

этой смеси выше энтальпии газа, входящего в камеру через щелевой завихритель. Песок в камере разогревается соответствующим образом (рис. 9). Видно, что слой песка быстрее разогревается в периферийной зоне камеры.

Поле массовой концентрации углекислого газа достигает состояния равновесия на выходе из камеры (рис. 10), что свидетельствует об отсутствии пламени в этом месте. Это подтвердилось экспериментально (рис. 11). Фотографии камеры сверху при наличии слоя песка и слоя катализатора показывают отсутствие пламени на выходе из камеры.

Цилиндрическая камера с нижним торцевым и боковым завихрителями. Проверена возможность приближения параметров удержания слоя песка и организации горения в цилиндрической камере к аналогичным параметрам конической камеры. Схема вихревой камеры с нижним торцевым и боковым завихрителями показана на рис. 12. Диаметр камеры $D = 100$ мм, высота $H = 160$ мм. В рассмотренных в расчетах случаях над верхней частью камеры устанавливался патрубок диаметром 70 мм и высотой 50 мм. Закрученный поток создавался с помощью торцевого и бокового завихрителей, расположенных на нижнем торце камеры. Торцевой завихритель имел 12 щелей шириной 1.5 мм с углом наклона к горизонтальной поверхности 7° , ширина торцевого завихрителя по радиусу 7 мм, площадь проходного сечения щелей завихрителя 126 мм^2 . Боковой завихритель высотой 10 мм состоял из 38 щелей шириной 2 мм, расположенных под углом 40° к радиусу камеры. Общая площадь проходного сечения щелей бокового завихрителя составляла 760 мм^2 .

Ниже представлены результаты расчета горения пропана с массовой долей 0.0385 в смеси с воздухом. Смесь разогревалась до 500 К. Слой частиц песка с диаметром частиц 1 мм и массой 146.5 г предварительно разогревался до 1000 К. Газ подавался через нижний торцевой завихритель со скоростью 0.0015 кг/с. Тангенциальная скорость газа на выходе из щелей составляла 73.4 м/с.

На рис. 13 показано распределение объемной доли частиц песка через три секунды с момента подачи горючей смеси через нижний торцевой завихритель вихревой камеры с нижним торцевым и боковым завихрителями. Видно, что вблизи боковой стенки камеры образуется разреженная зона, через которую проходит газ. Тангенциальная скорость частиц песка в этой зоне достигает 1.81 м/с (рис. 14), что ниже, чем в конической камере и цилиндрической камере с боковым завихрителем. Тангенциальная скорость газа на выходе из слоя значительно ниже (рис. 15), чем в цилиндрической камере с боковым вдувом (см. рис. 3) и конической камере (см. рис. 7). Линии тока сгущаются в зоне разреженной части слоя (рис. 16), что свидетельствует о том, что основная часть горючей смеси проходит через разреженную зону слоя. Максимальные температуры газа достигаются в верхней части камеры (рис. 17), где углекислый газ достигает своих равновесных значений (рис. 18). Это говорит о том, что факела на выходе из камеры нет. На рис. 19 показана фотография цилиндрической камеры с нижним торцевым и боковым завихрителями для указанного режима горения. Видно отсутствие пламени на выходе из камеры.

Рассмотренный режим горения реализовался при предварительном разогреве слоя песка до 1000 К. При отсутствии подогрева песка в камерах всех рассмотренных типов наблюдался факельный режим горения — слой не разогревался до температур, необходимых для быстрого сгорания топлива в слое песка. Увеличение начальной массы песка в камере от 146.5 до 244 г при остальных параметрах, таких же, как и в предыдущем случае, приводит к заметному снижению скорости вращения слоя. Удельное содержание песка в объеме камеры

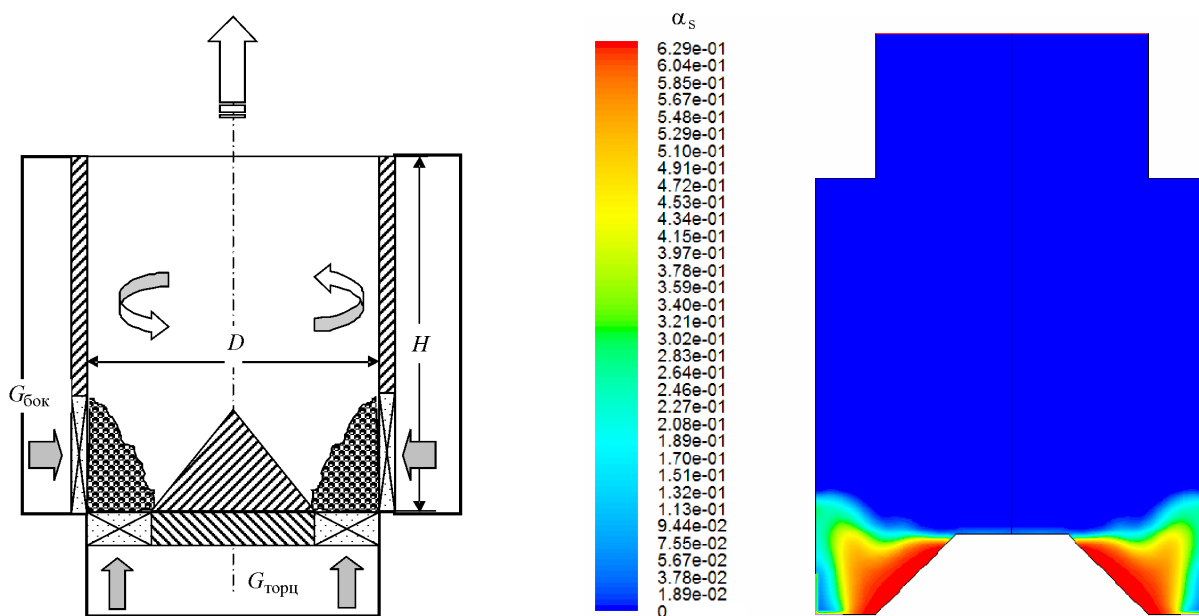


Рис. 12. Схема вихревой камеры с нижним торцевым ($G_{\text{торц}}$) и боковым ($G_{\text{бок}}$) завихрителями

Рис. 13. Распределение объемной доли частиц песка в цилиндрической вихревой камере с торцевым вдувом через 3 с после подачи газа

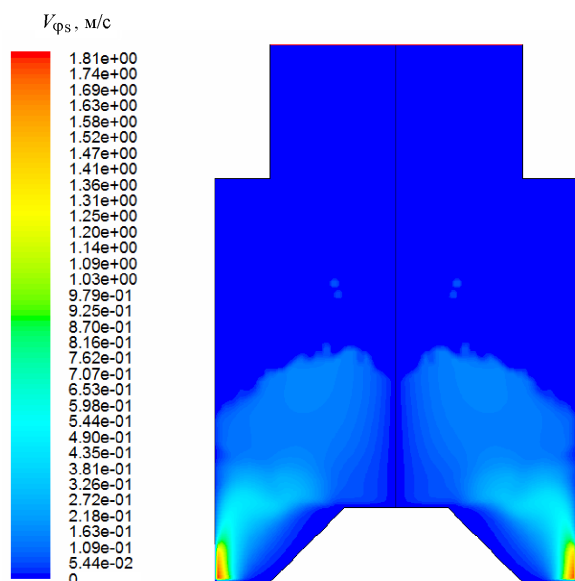


Рис. 14. Распределение тангенциальной скорости частиц песка в цилиндрической вихревой камере с торцевым вдувом через 3 с после подачи газа

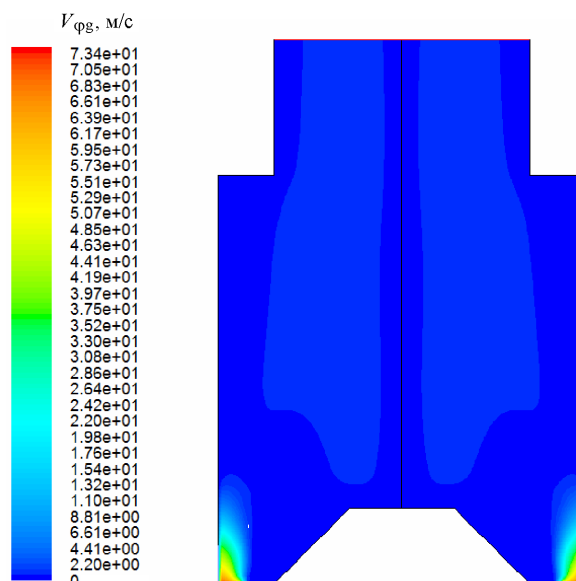


Рис. 15. Распределение тангенциальной скорости газа в цилиндрической вихревой камере с торцевым вдувом через 3 с после подачи газа

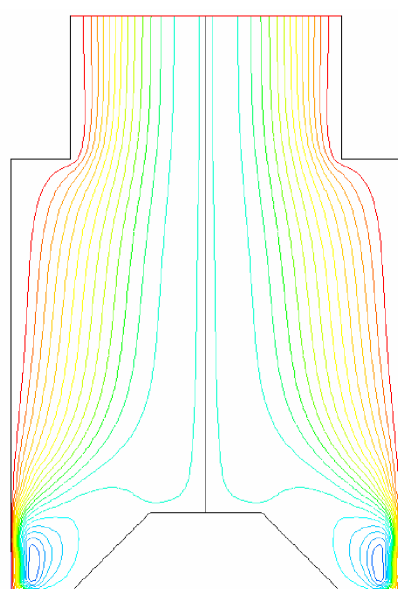


Рис. 16. Линии тока газа в цилиндрической вихревой камере с торцевым вдувом через 3 с после подачи газа

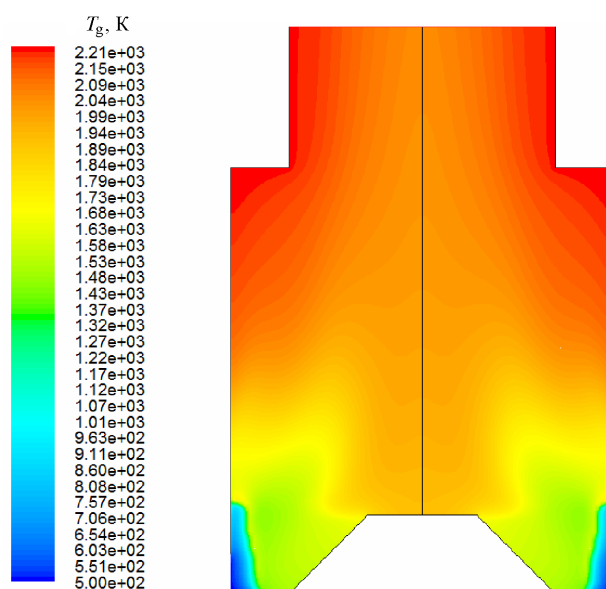


Рис. 17. Распределение температуры газа в цилиндрической вихревой камере с торцевым вдувом через 3 с после подачи газа

составляет при этом 267 кг/м^3 , что больше, чем для цилиндрической камеры с боковым завихрителем (131 кг/м^3), но меньше, чем в конической камере (478 кг/м^3). Слой плохо перемешивается, степень сжигания топлива снижается. Дополнительная подача горючей смеси через боковой завихритель с расходом 1.5 г/с при том же расходе смеси через нижний торцевой завихритель качественно не изменяет ни динамику слоя частиц, ни характер сжигания. На рис. 20 показано распределение объемной доли песка для последнего случая. Как видно, качественное распределение доли песка в этой камере сходно с аналогичным распределением при меньшей массе слоя песка (см. рис. 13). Однако скорость вращения частиц песка (рис. 21) несколько ниже, чем при меньшей массе слоя песка (см. рис. 14). Дисперсный материал в такой камере удерживается так же долго, как

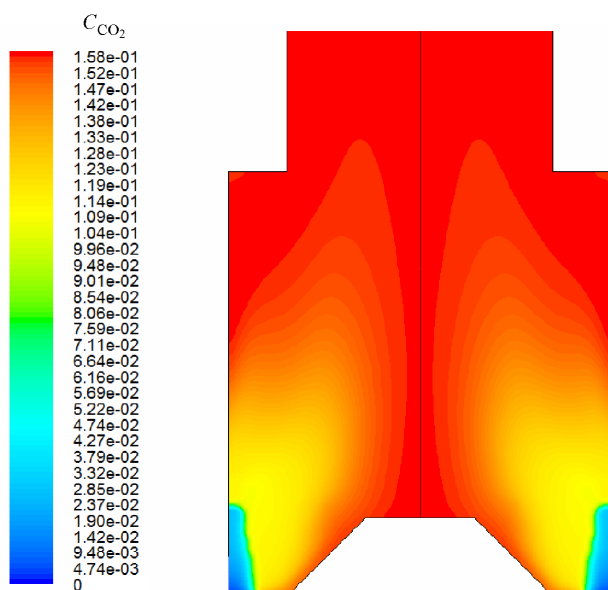


Рис. 18. Распределение массовой концентрации углекислого газа в цилиндрической вихревой камере с торцевым вдувом через 3 с после подачи газа

Рис. 19. Фотография камеры с нижним торцевым вдувом при горении с отсутствием факела

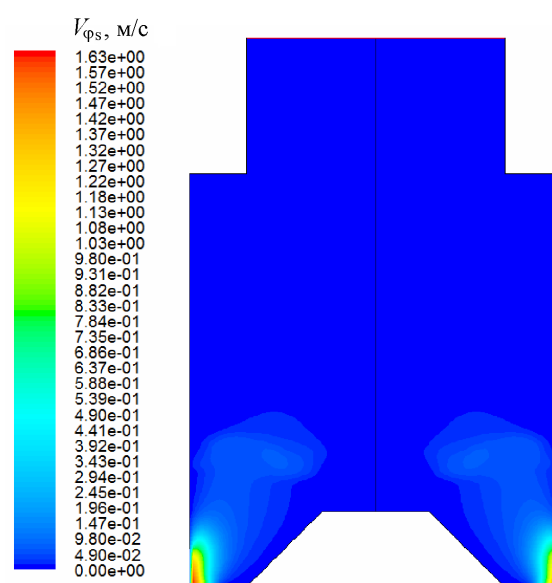
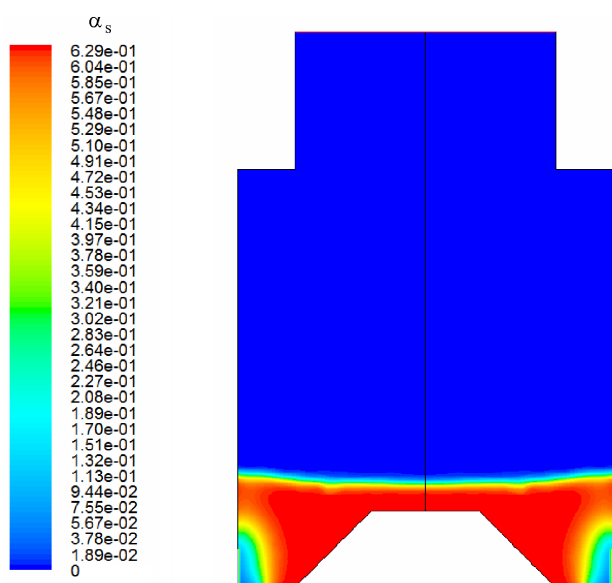


Рис. 20. Распределение объемной доли частиц песка в цилиндрической вихревой камере с торцевым и боковым вдувом через 3 с после подачи газа

Рис. 21. Распределение тангенциальной скорости частиц песка в цилиндрической вихревой камере с торцевым и боковым вдувом через 3 с после подачи газа

и в конической камере, гранулы катализатора из порошка Al_2O_3 тоже практически не изнашиваются, как и в конической камере, что объясняется низкими скоростями вращения частиц в камере.

Выводы

1. Коническая камера сгорания имеет лучшие характеристики по удержанию слоя дисперсного материала, полноте сгорания топлива и удельной загрузке камеры дисперсным материалом по сравнению с цилиндрическими камерами.

2. Цилиндрическая камера сгорания с нижним торцевым завихрителем имеет такие же характеристики, что и коническая камера по времени удержания слоя дисперсного материала и отсутствию износа гранул порошка Al_2O_3 , а также по возможности полного сжигания топлива в камере, однако характеризуется более низкой удельной загрузкой дисперсным материалом и более низкими скоростями обтекания его частиц газом.

3. Вихревая камера сгорания с боковым завихрителем обеспечивает самые высокие скорости обтекания частиц дисперсного материала газом, однако из-за малой толщины слоя этого материала имеет худшие показатели по степени сгорания топлива в нем; из-за высоких скоростей движения частиц дисперсного материала гранулы из порошка Al_2O_3 в такой камере быстро изнашиваются.

Обозначения

C_i^q — массовая концентрация i -го вещества, содержащегося в q -й фазе; C_{CO_2} — массовая концентрация углекислого газа; C_d — коэффициент сопротивления частиц песка; F_q — массовая сила; G_{qk} — кинетическая энергия турбулентности в q -й фазе; g — ускорение свободного падения; h_q — удельная энтальпия q -й фазы; J_i^q — диффузионный поток i -го вещества в q -й фазе; k_q — турбулентная энергия q -й фазы; $K_{lq} = \frac{\alpha_q \alpha_l \rho l f}{\tau_l}$ — коэффициент обмена импульсом между l -й и q -й фазами; $\dot{m}_{pq}$ — масса вещества, перешедшего из p -й в q -ю фазу; $\dot{m}_{p^i q^j}$ — масса j -го вещества в q -й фазе, перешедшего из i -го вещества p -й фазы; P — давление; q_q — тепловой поток в q -й фазе; Q_{pq} — источниковый член обмена теплом между p -й и q -й фазами; R_i^q — скорость образования i -го вещества за счет реакций в q -й фазе; R — скорость гетерогенной реакции; $R_{pq} = K_{pq}(V_p - V_q)$ — сила взаимодействия p -й и q -й фаз; Re_s — число Рейнольдса, построенное по диаметру частиц песка и скорости их обтекания; S_i^q — источниковый член образования i -го вещества в q -й фазе; S_q — источниковый член тепла; T_g — температура газа; T_s — температура песка; V_q — вектор скорости q -й фазы; V_{pq} — вектор скорости межфазного взаимодействия; α_s — объемная доля песка в потоке газодисперсной смеси; α_q — объемная доля q -й фазы в потоке газодисперсной смеси; ε_q — скорость диссипации турбулентной энергии q -й фазы; μ_{qt} — турбулентная вязкость q -й фазы; ρ_q — плотность q -й фазы; $\tau_l = \frac{\rho_l d_l^2}{\mu_q}$ — время релаксации частицы песка; $\bar{\tau}_q$ — тензор напряжений q -й фазы. Индексы: q, s, l, p — номера взаимопроникающих фаз; i — номер вещества в фазе; s — песок; g — газ; d — сопротивление; t — турбулентный; φ — тангенциальный; k — кинетический.

Литература

1. Кутепов А. М., Латкин А. С. Вихревые процессы для модификации дисперсных систем. М.: Наука, 1999.
2. Гольдштик М. А. Процессы переноса в зернистом слое. 2-е изд., перераб. и доп. Новосибирск: Изд-во Ин-та теплофизики СО РАН, 2005.
3. Белоусов А. С., Сажин Б. С., Кочетов Л. М. и др. Структура течения потоков двухфазной полидисперсной смеси в вихревой сушилке//Успехи в химии и химической технологии. 2005. Т. 19, № 10. С. 77–80.
4. Бородуля В. А., Подберёзский А. И., Журавский Г. И. Массообмен в центробежном псевдооживленном слое//Тепло- и массоперенос: от теории к практике. Минск: ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР, 1984. С. 31–34.
5. Волчков Э. П., Кайданик А. Н., Ядыкин А. Н. Влияние вращающегося слоя зернистого материала на параметры газового потока в вихревой камере сгорания//Сибирский физ.-техн. журн. 1991. Вып. 5. С. 102–105.
6. 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.
7. Волчков Э. П., Дворников Н. А., Ядыкин А. Н. Особенности тепло- и массообмена в псевдооживленном слое частиц в вихревой камере//Тепломассообмен–ММФ–2000. IV Минский междунар. форум, 22–26 мая, 2000 г. Т. 6. Тепломассообмен в дисперсных системах. Минск, 2000. С. 115–124.
8. Дворников Н. А., Зинкин П. В., Ядыкин А. Н. Исследование псевдооживления в вихревых камерах для удержания инертного материала//Тр. Третьей Российской нац. конф. по теплообмену: В 8 т. Т. 5. Двухфазные течения. Дисперсные потоки и пористые среды. М.: Изд-во МЭИ, 2002. С. 199–202.
9. Volchkov E. P., Dvornikov N. A., Lukashov V. V., and Abdrakhmanov R. Kh. The mass transfer and flow field in the vortex chamber with centrifugal fluidized bed//Proc. Int. Conf. on Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2008), Novosibirsk, Russia, 2008, <http://www.itam.nsc.ru/tmp/Test/5/Volchkov.pdf>.

10. **Теплицкий Ю. С., Ковенский В. И., Бородуля В. А.** Особенности процесса переноса в полидисперсных псевдооживленных слоях//Материалы Пятой Российской нац. конф. по теплообмену. М., 2010. Т. 5. С. 230–233.
11. **Дворников Н. А., Белоусов П. П.** Исследование псевдооживленного слоя в вихревой камере//ПМТФ. 2011. Т. 52, № 2. С. 59–65.
12. **Das A. and Miller J. D.** Swirl flow characteristics and froth phase features in air-sparged hydrocyclone flotation as revealed by X-ray CT analysis//Int. J. Mineral Processing. 1996. Vol. 47, Issue 3–4. Pp. 251–274.
13. **Kuzmin A. O., Pravdina M. Kh., Yavorsky A. I., et al.** Vortex centrifugal bubbling reactor//Chem. Eng. J. 2005. No. 107. Pp. 55–62.
14. **Ekatpure R. P., Heynderickx G. J., Broqueville A., and Marin G. B.** Experimental investigation of a rotating fluidized bed in a static geometry//Proc. 2-nd Int. Congress on Green Process Engineering, 14–17 June 2009, Venice (Italy); http://www.lct.ugent.be/_STUDIOEMMA_WWW/uploads/pages/EPIC2009-14-17_June-Venice-RE-PP.pdf.
15. **Wilde J. and Broqueville A.** Experimental investigation of a rotating fluidized bed in a static geometry//Powder Technology. 2008. No. 183. Pp. 426–435.