

## ПРОЦЕССЫ ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ В ТОПКАХ С НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМ КИПЯЩИМ СЛОЕМ

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры*

**Аннотация.** Рассмотрены процессы псевдоожигения в топках с низкотемпературным кипящим слоем. В процессе псевдоожигения мелкий песок выполняет важные функции: аккумуляцию топлива в качестве среды, обеспечивающей псевдоожигение вместе с дутьевым воздухом и в качестве абразивной среды, обеспечивающей истирание частиц топлива. Генерация тепла в псевдоожигенном слое происходит столь эффективно, что процесс горения топлива идет при температуре на несколько сот градусов ниже, чем в традиционных котлах факельного или слоевого сжигания.

*Ключевые слова:* кипящий слой, инертная масса, частица топлива, песок.

**Анотація.** Розглянуто процеси псевдозрідження в топках з низкотемпературним киплячим шаром. В процесі псевдозрідження дрібний пісок виконує важливі функції: акумулювання палива в якості середовища, що забезпечує псевдозрідження разом з дутьовим повітрям і в якості абразивного середовища, що забезпечує стирання частинок палива. Генерация тепла в псевдозрідженому шарі відбувається настільки ефективно, що процес горіння палива йде при температурі на кілька сот градусів нижче, ніж в традиційних котлах факельного або шарового спалювання.

*Ключові слова:* киплячий шар, інертна маса, частка палива, пісок.

The processes of fluidization in furnaces with low-temperature fluidized bed. During fluidization, the fine sand performs important functions in the accumulation of fuel in an environment providing fluidization with air blow and, as abrasive medium providing attrition fuel particles. The generation of heat in the fluidized bed takes place so efficiently that the process of combustion takes place at a temperature of several hundred degrees lower than in conventional boilers, combustion flare or layers.

*Key Words:* fluidized bed, the inertial mass of the particle fuel, sand.

**Введение.** В последние годы технология сжигания в низкотемпературном кипящем слое вызывает нарастающий интерес из-за возможного использования низкосортных видов топлива с высокой долей негорючих веществ, большим содержанием влаги и низкой теплотворной способностью. В условиях реструктуризации и перехода к рыночным механизмам в энергетике приоритетными в развитии энергетической науки становятся направления, связанные со снижением себестоимости отпускаемой тепловой и электрической энергии. Сложная экономическая ситуация и отсутствие свободных финансовых ресурсов у генерирующих компаний вызывает необходимость изыскивать малозатратные методы модернизации и повышения эффективности работы теплоэнергетического оборудования.

**Цель и постановка задачи.** Повысить эффективность и экономичность работы котлоагрегатов при сжигании твердого топлива в топках с низкотемпературным кипящим слоем (НТКС).

**Методика исследований.** На частицу топлива и инертной массы, витающую в восходящем псевдооживленном газом с наполнителем потоке действует две силы: архимедова сила и сила, численно равная сопротивлению частицы кинетической энергии набегающего потока газов и псевдооживленных частиц.

Если принять, что частицы в псевдооживленном слое имеют шарообразную форму, то вес частицы в указанном слое будет равен:

$$F = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})g = \frac{1}{6}\pi d^3(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})g \quad (1)$$

где  $F$  – вес частицы, Н;

$\rho_{\text{ч}}$  - плотность частицы топлива, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{с}}$  - плотность частицы окружающего слоя, кг/м<sup>3</sup>;

$d$  - диаметр частиц, м;

$g$  - ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>.

С другой стороны, сопротивление частицы в набегающем потоке псевдооживленного слоя при относительно низких величинах скорости потока, имеющих место в топке с псевдооживленным слоем, подчиняется уравнению Стокса:

$$R = 3\pi\mu dW \quad (2)$$

где  $R$  - сопротивление, оказываемое частицей набегающему потоку, Н/м<sup>2</sup>; (кгм/с)

$\mu$  - динамическая вязкость Н·С/м<sup>2</sup>; (кг/м·с)

$W$  - скорость потока, м/с.

Следует отметить, что указанное уравнение применимо к ламинарному движению частиц.

Если принять  $\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}} = \Delta\rho$ , то при равенстве сил в псевдооживленном слое:

$$\frac{1}{18}d^2\Delta\rho \cdot g = \mu_0 W_0 \quad (3)$$

При определении влияния характеристик псевдооживленного слоя частиц инертной массы и топлива можно исходить из следующих предпосылок. Верхняя граница псевдооживленного слоя определяет верхний фронт витания частиц определённого размера.

В восходящем потоке псевдооживленного слоя каждая частица топлива и инертной массы испытывает трение, в основном соседних частиц, так как вязкость окружающих продуктов горения топлива очень низкая. Естественно, что трение будет тем больше, чем больше концентрация частиц в потоке. Таким образом, увеличение концентрации частиц увеличивает кажущуюся динамическую вязкость потока.

Если принять псевдооживленный слой как вязкую жидкость, то кажущаяся вязкость жидкости для полидисперсного слоя частиц подчиняется следующему закону [1]:

$$\frac{\mu}{\mu_0} = (1 - C)^{-2,5} = \varepsilon^{-2,5} \quad (4)$$

где  $\mu$  - кажущаяся динамическая вязкость, кг/м·с;

$\mu_0$  - динамическая вязкость среды при большом разбавлении, кг/м·с

$C$  - доля объема, занимаемая частицами;

$\varepsilon$  - доля свободного объема (порозность слоя).

При заданном значении скорости потока верхняя граница витающих частиц в псевдооживленном слое стабилизируется в положении, соответствующему размеру частиц и их плотности.

Если принять, что объемная концентрация частиц в слое изменяется одинаково по всем трем направлениям, то скорость потока в псевдооживленном слое будет обратно пропорциональна доли свободного сечения  $(1 - C)^{0,67} = \varepsilon^{0,67}$

$$W = \frac{W_0}{(1 - C)^{0,67}} = \frac{W_0}{\varepsilon^{0,67}} \quad (5)$$

где  $W$  - скорость потока в свободном сечении, между частицами топлива и инертного материала, м/с;

$W_0$  - скорость потока в свободном сечении, не занятом материалом, м/с

Подставляя значения " $\mu$ " из (4) и  $W$  из (5) в уравнение (1), получаем

$$\varepsilon = 1,21 \left( \frac{\mu_0 W_0}{\Delta \rho d^2} \right)^{0,316} \quad (6)$$

Из уравнения (6) следует, что в псевдооживленном полидисперсном слое частиц происходит их распределение по высоте слоя в соответствии с изменением параметра  $\Delta \rho d^2$ . При увеличении скорости потока значение  $W$  и  $W_0$  постепенно приближается один к другому и при  $\varepsilon$  равном 1 происходит вынос частиц с минимальным значением параметра  $\Delta \rho d^2$ .

В процессе псевдооживления мелкий песок выполняет три важных функции: аккумулярование топлива в качестве среды, обеспечивающей псевдооживление вместе с дутьевым воздухом и в качестве абразивной среды, обеспечивающей истирание частиц топлива.

Необходимо отметить, что в рассмотренном подходе существуют некоторые противоречия. При плотности рассматриваемого оживающей и теплопередающей среды – песка (2,6 кг/м<sup>3</sup>) больше плотности частиц топлива

(примерно  $1,6 \text{ кг/м}^3$ ) значение  $\Delta\rho$  необходимо принимать по модулю и для распределения частиц в псевдооживленном слое принимать значение  $|\Delta\rho d^2|$

Несколько другой подход, рассматривающий псевдооживления частиц угля в воздушном потоке, принят в [2]. При этом учитывается действие трех сил:

сила тяжести:  $F_T = mg$ ,

сила динамического давления:

$$F_D = \frac{\pi R^2 \cdot \rho_1 \cdot (U - V)^2}{2} \quad (7),$$

сила трения:

$$F_T = 6\pi R\mu(U - V)$$

где  $R$  – радиус частицы, м ;

$\rho_1$  - плотность воздуха,  $\text{кг/м}^3$  ;

$\mu$  – коэффициент внутреннего трения воздуха,  $\text{кг/мс}$  ;

$m$  – масса частицы,  $\text{кг}$  ;

$U$  – скорость частицы относительно корпуса топки,  $\text{м/с}$  ;

$V$  – скорость частицы относительно газового потока,  $\text{м/с}$ .

При псевдооживлении слоя вес частицы уравновешивается силами динамического давления и трения. При этом:

$$mg = \frac{\pi R^2 \cdot \rho_1 \cdot (U - V)^2}{2} + 6\pi R\mu(U - V) \quad (8)$$

Подставив в уравнение (8) значение  $m = \frac{4}{3}\pi R^3\rho$  и решив его в отношении скорости частиц, получаем:

$$V = U \cdot 6 \frac{\mu}{\rho_1} R \left( \sqrt{\frac{1 + 2g\rho_1\rho}{27\mu^2 - 1}} \right) \quad (9)$$

где  $\rho$  - плотность воздуха,  $\text{кг/м}^3$ .

Нетрудно убедиться, что в указанном подходе отсутствует учет влияния вязкостного трения частиц наполнителя (песка) и соседних частиц. Однако влияние этого параметра является определяющим, так как вязкость воздуха на несколько порядков ниже вязкости псевдооживленного слоя частиц.

При учете сил динамического давления каждая более крупная частица топлива в слое инертной загрузки испытывает также давление более мелких частиц песка в псевдооживленном слое.

При аккумуляции тепла большое значение имеет наличие фазового перехода в аккумулялирующей среде. Так, например, вода и лед обладают значительной аккумулялирующей емкостью. В результате этого отвод или подвод тепла не сказывается на изменении температуры двухфазной системы, при этом происходит изменение относительной доли фаз.

По аналогии с этим кварцевый песок, устойчиво существующий при температуре до  $573^\circ\text{C}$  в виде  $\beta$  – формы, переходит в  $\alpha$  - форму при повышении температуры выше указанного значения с поглощением или

выделением теплоты 250 ккал/моль (17,42 мДж/кг) при переходе из одной формы в другую. При температуре  $> 870^{\circ}\text{C}$   $\alpha$ - кварц переходит в устойчивую форму тридимит.

Таким образом, 1,68т песка запасает (аккумулирует) только в фазовом переходе количество тепла, которое выделяется при сжигании 1 т условного топлива (29,26 мДж/кг).

Область температур от 573 до  $870\text{-}900^{\circ}\text{C}$  соответствует различному соотношению в кварцевом песке  $\beta$  и  $\alpha$  форм.

Снижение подвода тепла в результате уменьшения количества сжигаемого топлива или уменьшения интенсивности горения (например, при уменьшении избытка воздуха) приводит к увеличению доли  $\beta$ - формы и отдаче тепла от песка, а увеличение подвода тепла способствует поглощению инертной массой тепла и увеличению в ней  $\alpha$ - формы. Отсюда следует, что песок в псевдооживленном слое является не просто инертным материалом, а эффективным тепловым аккумулятором.

Истирающая способность кварцевого песка обеспечивает развитие поверхности горящих частиц угля и интенсификацию процесса горения в соответствии с законом Фика. Истирающую способность обычно оценивают по шкале МООСа, в которой существует 10 градаций по шкале твердости от 1 до 10: тальк < гипс < кальцит < флюорит < апатит < полевой шпат < кварц < топаз < корунд < алмаз. Материал в верхнем (правом) ряду «царапает»- истирает материал, который расположен слева. Так как каменный уголь различной степени метаморфизма расположен значительно левее (на несколько единиц ниже) по указанной шкале, то он подвергается истирающему воздействию при нахождении в псевдооживленном слое песка.

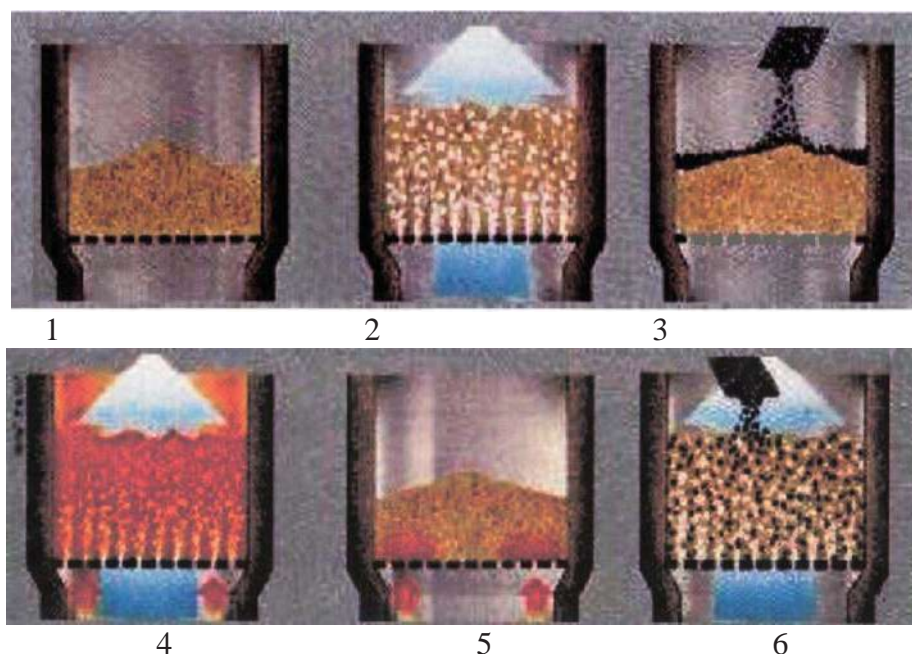
Сложность процессов поведения частиц топлива в слое обусловлена также тем, что каждая частица изменяет свою температуру и размеры по мере выгорания. Кроме того, при рециркуляции частиц происходит вынос более мелких частиц, как инертной массы, так и топлива.

Процесс сжигания в псевдооживленном слое состоит в следующем. В топку, на определенную высоту, заполненную тонким песком, через нижнее распределительное отверстие подается воздух. Он обеспечивает "кипение" и хаотичное переливание частиц песка. Затем витающие частицы песка нагреваются до температуры примерно  $480^{\circ}\text{C}$  за счет подачи вместе с воздухом природного газа и поджигают его.

После разогрева инертной массы до указанной температуры в слой подается твердое топливо, а подача природного газа прекращается, при горении твердого топлива температура слоя поддерживается  $815\text{-}830^{\circ}\text{C}$ .

Стадии процесса псевдооживления и горения частиц в псевдооживленном слое показаны на рис. 1.





**Рис. 1. Процесс псевдооживления частиц песка и угля**

1 – Стадии процесса псевдооживления ("кипения") частиц песка при подаче воздуха под распределительную решетку с меньшей интенсивностью.

2 - Стадии процесса псевдооживления ("кипения") частиц песка при подаче воздуха под распределительную решетку с большей интенсивностью.

3 - Подача угольных частиц в верхнюю часть псевдооживленного слоя песка.

4 - Перемешивание частиц угля в слое песка.

5 - Процесс медленного разогрева псевдооживленного слоя.

6 - Процесс горения частиц угля в псевдооживленном слое.

Генерация тепла в псевдооживленном слое происходит столь эффективно, что процесс горения топлива идет при температуре на несколько сот градусов ниже, чем в традиционных котлах факельного или слоевого сжигания. Температура горящих частиц топлива превышает среднюю температуру слоя, чем выше температура слоя, тем меньше разница между температурой частиц топлива и средней температурой слоя.

**Выводы.** Можно сделать вывод, что сжигание твердого топлива в низкотемпературном кипящем слое при применении песка в качестве инертного материала позволяет наиболее эффективно и экономично использовать низкосортные угли и аккумулировать тепло. Данное решение позволит повысить КПД источников энергии, приведет к уменьшению затрат топлива и материальных ресурсов и улучшению качества энергоносителей, отпускаемых потребителю.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lewitt E.H. «Hydraulic and the mechanics of fluids», London, 1955.
2. Кузнецов Г.Ф. «Исследование свойств кипящего слоя угольной дробленки». VI Minsk International Heat and Mass Transver Forum, MiF 2008, May 2008.
3. Высоцкий С.П. «О гидравлических характеристиках фильтрующего слоя». Теплоэнергетика № 1, 1980, с.49-51.
4. Roscoe I.C., Kwiatkowski A.R., Harrison D. «The Temperature of Coke Particles in Fluidized Combustor», Trans. Inst. Chem. Eng., 58, 1980, p.p. 69-72.
5. Khraisha Y. H. «Batch combustion of OSE Shail Particles in Fluidized Bed Reactor», Fuel Process. Technol., 86, 2005, p.p.691-706.
6. Komatina M., Manoxic V., Dakis D., « Experimental Study of Temperature of Burning Coal Particle in Fluidized Bed», Energy Fuels, 20, 2006, p.p.114-119.