

УДК 621.187.7:697.34

Олексюк А.А., д.т.н., проф., Шайхед О.В.

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ
НИЗКОСОРТНЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ В ТОПКАХ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
И КОММУНАЛЬНЫХ КОТЕЛЬНЫХ**

Рассмотрены перспективы использования низкосортных и высокозольных углей, отходов углеобогащительных заводов и угольных пород в качестве твердого топлива на ТЭЦ и районных коммунальных котельных. Обоснована технология сжигания тощих углей в топках низкотемпературного кипящего слоя.

Введение

Использование высокозольных углей в качестве твердого топлива, для энергетических целей представляет потенциальный интерес, т. к. в последнее время ограничены расходы газообразного и жидкого топлива. Однако, использование низкосортного топлива приводит к снижению среднеэксплуатационной нагрузки энергетических котлов, ухудшению технико-экономических показателей и снижению КПД котлоагрегатов.

С 1984 г. по разработкам треста «Донецкуглеавтоматика» опытно-экспериментальным заводом ПО «Донецкуглеремонт» освоен выпуск водогрейных котлов с топками НТКС КВ-КС-3, а затем КВ-КС-4. С 1987 г. предприятием «Энергоремонт» ПО «Луганскуглеремонт» освоен выпуск котлов КВФ-4, 6-95 (разработчики: трест «Луганскуглеавтоматика» и НПО ЦКТИ им. Ползунова), имеющих отличие в конструкции погружных поверхностей нагрева.

Накопленный опыт позволяет сделать вывод, что полученные результаты являются обнадеживающими для дальнейшего глубоко исследования и широкого внедрения топок кипящего слоя на индустриальной основе.

Цель

Разработка математической модели технологии сжигания низкосортных углей в топках котлов с низкотемпературным кипящим слоем для уменьшения вредных выбросов с дымовыми газами в окружающую среду.

Пути решения проблемы

В последние годы технология сжигания в кипящем слое вызывает нарастающий интерес из-за возможного использования низкосортных видов топлива с высокой долей негорючих веществ, большим содержанием влаги и низкой теплотворной способностью.

Возрастающие требования по охране окружающей среды требуют дополнительных сооружений и затрат, направленных на снижение вредных выбросов в атмосферу. В результате полного выгорания горючего происходит связывание вредных веществ непосредственно в кипящем слое, что упрощает очистку.

Одновременно с энергетическим кризисом остро встал вопрос о возможности экологического кризиса, связанного с повышением выбросов вредных веществ в окружающую среду.

Вторым поколением котлов кипящего слоя можно назвать топки с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС), которые сочетают преимущества низкотемпературного кипящего слоя (устойчивое горение, экологическая чистота) и пылевидного сжигания (малый унос, отсутствие шлакования).

Топки ЦКС обеспечивают надежное регулирование процесса теплообразования от 100 до 25 % номинальной тепловой мощности.

Следует отметить, что установки с топками ЦКС имеют большую высоту, достаточно дороги и это в какой-то степени сдерживает масштабы их внедрения.

Сжигание твердого топлива в кипящем слое является, бесспорно, прогрессивным направлением и заслуживает детального изучения и широкомасштабного внедрения.

Описание псевдооживленного состояния слоя

Насыпной непродуваемый слой зернистого материала можно рассматривать как сплошную среду. В таком слое частицы воздействуют друг на друга своей массой. В продуваемом зернистом слое возникают дополнительные силы воздействия дутьевого воздуха как на отдельные частицы, так и на весь поток в целом.

В случае восходящего потока локальная сила, действующая со стороны потока на единицу объема зернистого материала, вычитается из веса единицы объема $\gamma_n = \rho_n g$ и ослабляет давление вышележащих частиц на нижележащие. При этом материал слоя, пронизываемый потоком воздуха, может находиться в двух качественно различных стационарных состояниях.

При скорости воздуха v ниже некоторой критической v_0 твердые частицы неподвижны, порозность слоя остается неизменной, а его гидравлическое сопротивление ΔP возрастает пропорционально v .

При достижении воздухом критической скорости v_0 гидродинамическое давление восходящего потока становится равным весу материала слоя, слой взвешивается, твердые частицы теряют взаимный контакт, перемешиваются и перемещаются. При скорости v_0 псевдооживленный слой расширен и однороден (рисунок 1).

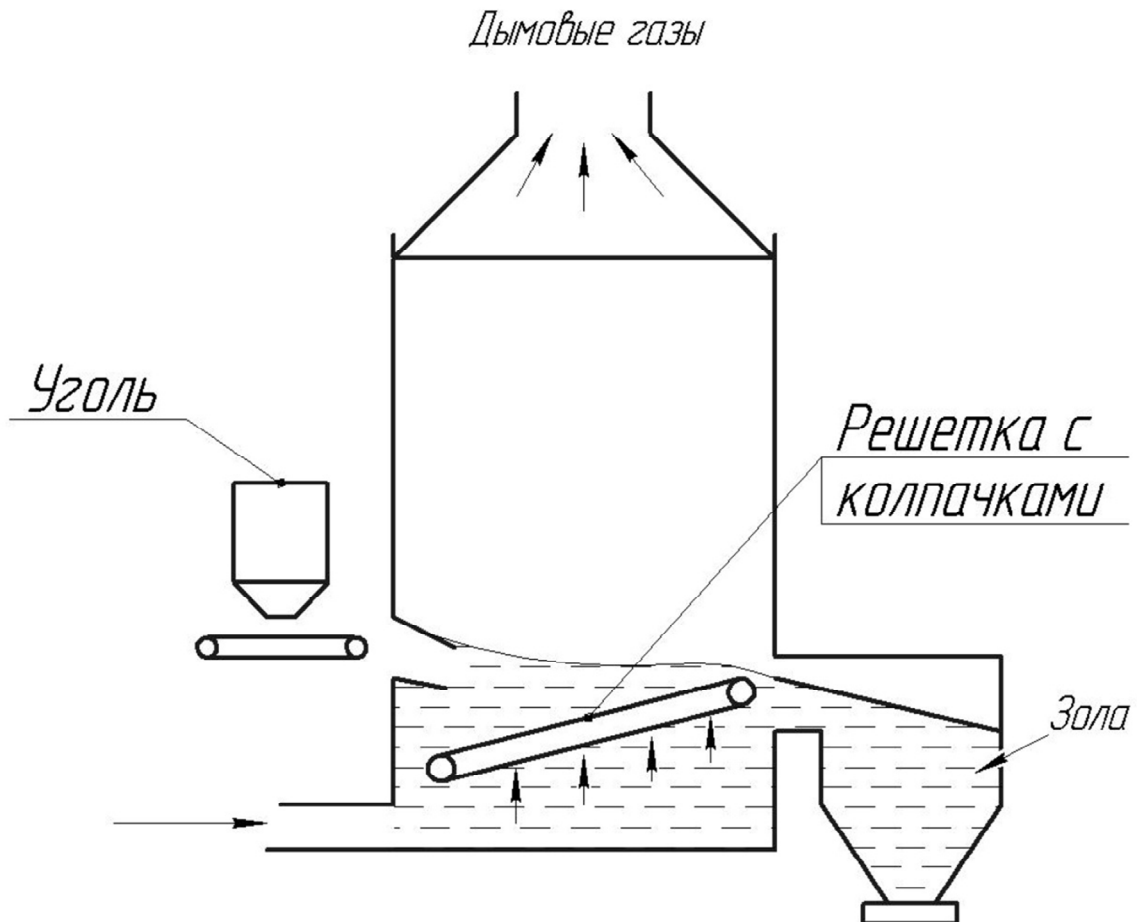


Рисунок 1 – Высокотемпературный кипящий слой при скорости потока воздуха ниже критической V_0

С увеличением скорости воздуха слой расширяется, его однородность нарушается и в нем появляются небольшие газовые пузыри, повышающие интенсивность перемешивания, концентрация твердого материала в объеме понижается, а порозность ϵ повышается (кипящий слой).

При дальнейшем увеличении скорости воздуха возрастает размер пузырей, вызывая колебания поверхности слоя (волны, всплески). В этом состоянии псевдожидкий слой напоминает кипящую жидкость, благодаря чему его назвали псевдооживленным или кипящим. На однородность псевдооживления заметное влияние оказывает конструкция воздухораспределительной решетки и ее живое сечение. Начало псевдооживления перед достижением первой критической скорости v_0 наблюдается в местах выхода воздушных струй из отверстий колпачков воздухораспределительной решетки при размещении труб погружных поверхностей нагрева в заторможенном кипящем слое непосредственно в его инертной засыпке (рисунок 2). При дальнейшем увеличении скорости потока эти места служили источниками пузырей, поднимающихся кверху. При этом размер газовых пузырей, пронизывающих слой, увеличивался.

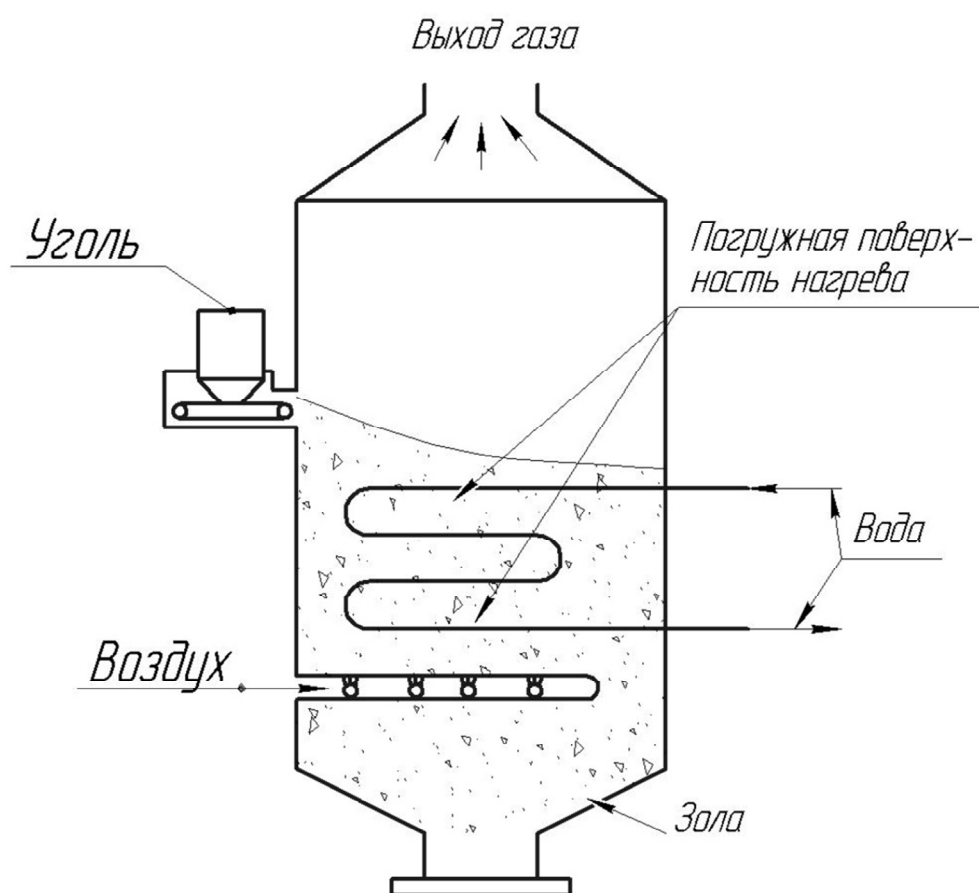


Рисунок 2 – Низкотемпературный слой под атмосферным давлением со всплесками кипящего слоя при $V > V'$

Следовательно, кипящий слой – совокупность полидисперсных твердых частиц, через которые продувается оживающий воздух со скоростью выше первой критической скорости (скорости оживления) и ниже второй критической скорости (скорости уноса или пневмотранспорта) (рисунок 3).

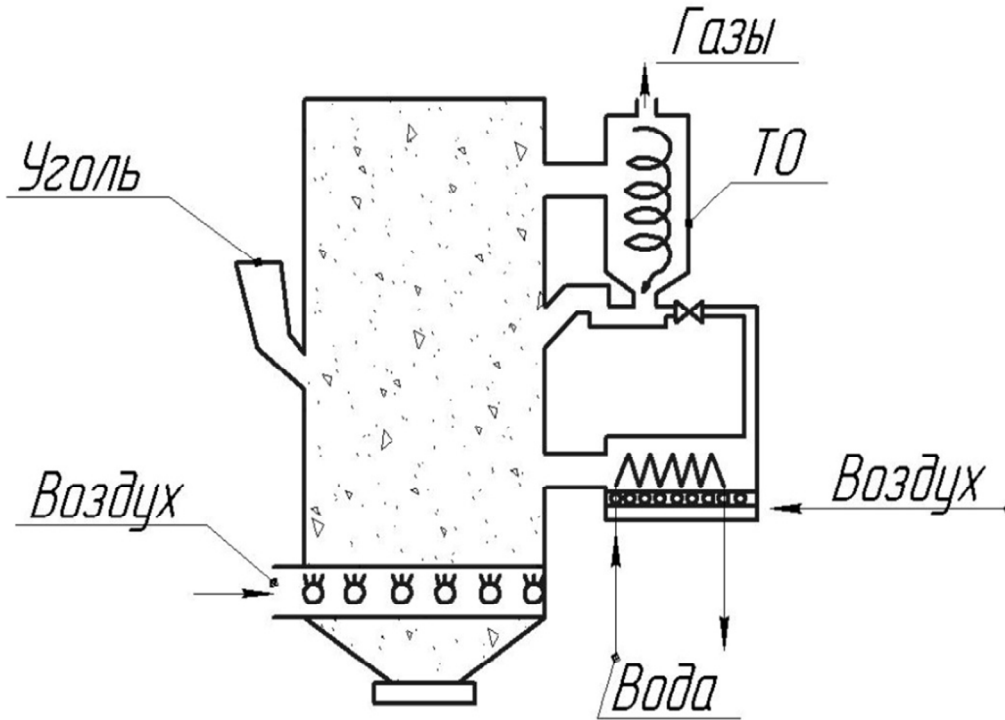


Рисунок 3 – Циркулирующий кипящий слой при скорости потока воздуха

$$V_{кр}^{II} > V > V_{кр}^I \text{ ниже второй критической}$$

При ожигании воздухом, даже при скоростях больше первой критической скорости ожигания, кипящий слой может быть неравномерным для всех составляющих слоя.

Определение потерь давления в слое

Основными техническими параметрами псевдоожигания являются потери напора в слое ΔP_n , значения критических скоростей v_o' и v_o'' , а также допустимая степень полидисперсности псевдоожигаемых смесей твердых частиц, находящихся в топливе.

Поддерживать слой в псевдоожиганном состоянии возможно только при непрерывном обмене энергией между частицами, составляющими слой, и дутьевым воздухом. Эта энергия затрачивается на преодоление трения твердых частиц друг о друга и воздуха об их поверхность, а также трения частиц слоя и воздуха о стенки топки и погружные поверхности нагрева.

Для топочных камер постоянного поперечного сечения, если пренебречь сжимаемостью воздуха, поток энергии, Вт, составит:

$$E = v f_c \Delta P, \quad (1)$$

где v – скорость дутьевого воздуха, м/с;

f_c – площадь поперечного сечения слоя, м²;

ΔP – потери давления при движении воздуха через псевдоожиганный слой (гидравлическое сопротивление слоя), Па.

Условием перехода из стационарного слоя в псевдооживленное состояние в поле сил тяготения является уравновешивание веса частиц слоя напором восходящего потока снизу. Поэтому ΔP_n является определяющей величиной при выборе дутьевого вентилятора.

Если принять порозность слоя ε неизменной или усредненной по высоте H слоя в рабочем состоянии, то ΔP , Па, можно определить из выражения:

$$\Delta P = \gamma_{\varepsilon} (1 - \varepsilon) H, \quad (2)$$

где $\gamma_{\varepsilon} = \gamma_m - \gamma$ – эффективный удельный вес частиц, н/м³;

γ_m и γ – удельный вес твердых частиц и оживающего агента, соответственно, н/м³ (при оживлении воздухом $\gamma_m \gg \gamma_{\varepsilon}$ и $\gamma_{\varepsilon} \approx \gamma_m$);

γ_{ε} – удельный вес воздуха, н/м³,

ε – порозность слоя.

С увеличением скорости оживающего агента одновременно возрастают H и ε , но произведение $(1 - \varepsilon) H$ для топок с постоянным поперечным сечением остается const, так как площадь поперечного сечения слоя f_c и эффективная масса псевдооживаемого твердого материала постоянны. Поэтому выражение (2) справедливо также для слоя в момент его перехода в псевдооживленное состояние:

$$\Delta P = \gamma_{\varepsilon} (1 - \varepsilon_o) H_o, \quad (3)$$

где H_o – высота неподвижного слоя, м;

ε_o – порозность неподвижного слоя.

Зная эффективную насыпную плотность материала слоя $\gamma_o = \gamma_{\varepsilon} (1 - \varepsilon_o)$ и высоту неподвижного слоя H_o , можно рассчитать потери напора в слое.

В действительности значения ΔP_n обычно на 10–15 % меньше теоретических, вследствие недостаточного полного псевдооживления твердого материала в слое, каналообразования и других отклонений от нормального процесса.

Для пирамидальной топки с вершиной вниз (рисунок 4) расчет ΔP_n , Па, может быть выполнен по формуле:

$$\Delta P = \frac{G_{\varepsilon}}{a_o^2 + 2H a_o t q \left(\frac{\alpha}{2} \right) + H^2 \frac{4}{3} t q \left(\frac{\alpha}{2} \right)}, \quad (4)$$

где a_o – сторона нижнего квадратного сечения слоя, м;

α – угол между противоположными боковыми стенками пирамиды.

Для топки в форме призмы потери давления (рисунок 5) определяют по формуле:

$$\Delta P = \frac{G_{\varepsilon}}{\varepsilon_o l + 2H l t q \left(\frac{\beta}{2} \right)}, \quad (5)$$

где G_3 – вес материала в слое, высотой H ;

$$G_3 = \gamma_3(1-\varepsilon)V;$$

где V – объем слоя, м^3 ;

b_0 – ширина нижнего сечения топки, м;

l – длина топки, м;

β – угол между наклонными стенками призмы.

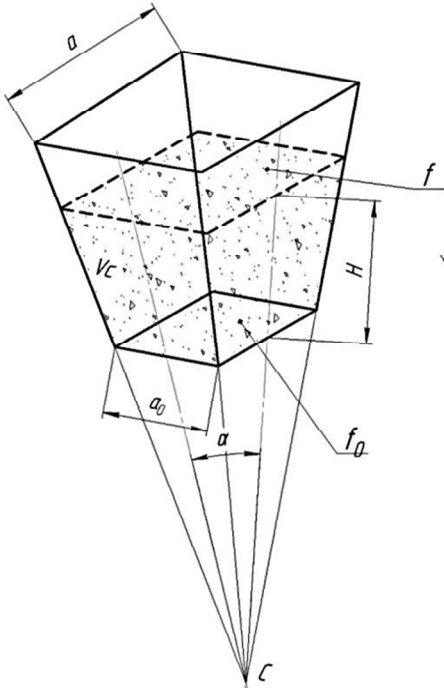


Рисунок 4 – Схема к расчету потерь напора в топке пирамидальной формы

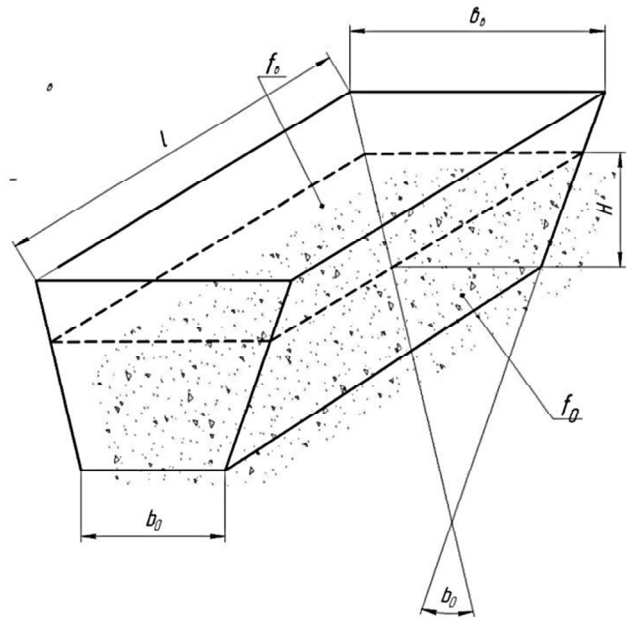


Рисунок 5 – Схема к расчету потерь напора в топке формы призмы

В таких формах топок с повышением скорости оживающего воздуха слой расширяется и ΔP_n , естественно, уменьшается.

Возможны комбинированные формы топок (например, топка котла КВ-КС-4). В этом случае приведенные формулы также справедливы.

Однако при погружении в слой пучка труб на глубину h , зависящую от степени расширения слоя и, следовательно, от скорости оживающего воздуха, потери напора в слое (рисунок б) определяют по уравнению:

$$\Delta P = \gamma_3(1-\varepsilon)H = \gamma_3(1-\varepsilon)(h+h_0) \approx \frac{G_3 - \gamma_3(1-\varepsilon)h_0 f_T}{f_c - f_T}, \quad (6)$$

где f_T – площадь поперечного сечения трубы, м^2 ;

h_0 – расстояние от трубы до воздухораспределительной решетки, м;

h – глубина погружения трубы, м.

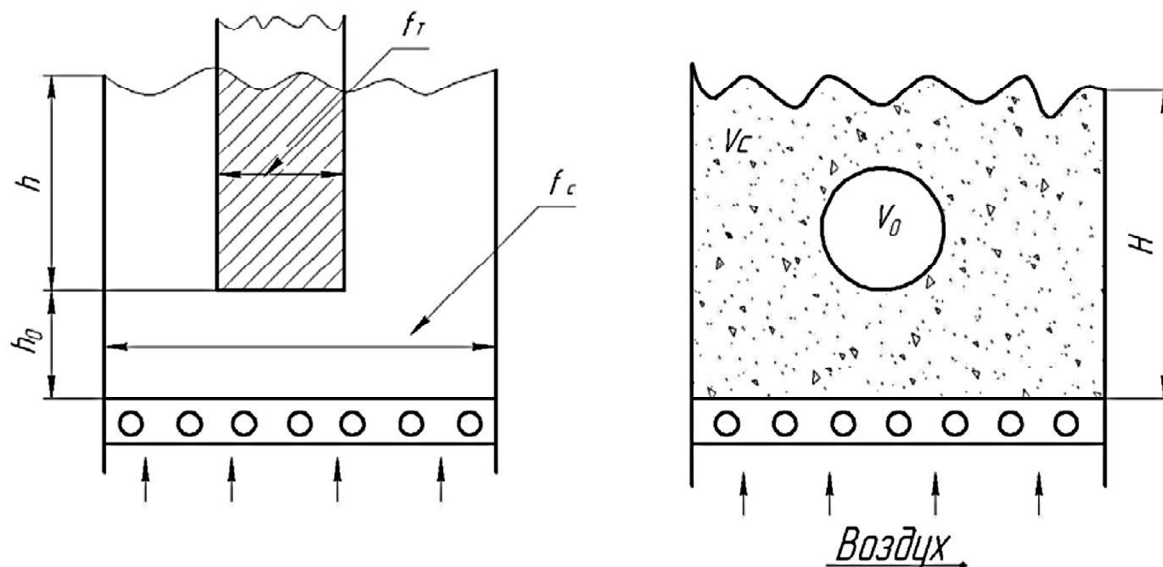


Рисунок 6 – Схема к расчету потерь напора в топке при погружении пучка труб, если в кипящий слой постоянного сечения f_c и объема V помещены трубы объема V_0

Если в кипящий слой постоянного сечения f_c и объема V помещены трубы объемом V_0 , то объем системы (кипящий слой и погружные трубы) будет равен $V_c + V + V_0$. Так как $V_c = Hf_c$, то уравнение (6) примет вид:

$$\Delta P = \gamma_{\text{ж}}(1-\varepsilon)\frac{V+V_0}{f_c} = \frac{\gamma_{\text{ж}}}{f_c}V(1-\varepsilon) + \frac{\gamma_{\text{ж}}V_0}{f_c}(1-\varepsilon). \quad (7)$$

Так как объем твердых частиц в слое постоянный, $V_0(1-\varepsilon) = V_T = \text{const}$, то первое слагаемое в правой части равенства тоже постоянно и от скорости воздуха не зависит. Во втором слагаемом имеется величина ε , которая увеличивается с ростом скорости газа. Поэтому ΔP_n уменьшается при возрастании скорости воздуха, причем тем быстрее, чем больше объем помещенного тела.

Определение критической скорости псевдооживления при изменении управляемых параметров слоя

Первый метод определения скорости псевдооживления начинается с момента, когда гидравлическое сопротивление потоку оживающего агента уравнивается весом псевдооживаемого материала слоя. Во втором методе рассматривается взаимосвязь между скоростью витания частиц V'_e и скоростью начала псевдооживления V' .

Впервые ученые М. Лева и О.М. Тодес предложили универсальную расчетную формулу для определения критической скорости начала псевдооживления при среднем значении порозности неподвижного слоя:

$$Re_{кр} = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}}, \quad (8)$$

где $Re_{кр}$ – критическая величина критерия Рейнольдса,

$$Re_{кр} = \frac{V'd_a}{\nu}, \quad (9)$$

d_a – средний поверхностный диаметр с учетом коэффициента формы, м,

$$d_a = \psi d_{\text{экв}}, \quad (10)$$

где ψ – коэффициент формы;

$d_{\text{экв}}$ – эквивалентный гидравлический диаметр, м,

$$d_{\text{экв}} = \frac{4\varepsilon}{d_0(1-\varepsilon)}, \quad (11)$$

где d_0 – удельная поверхность одиночного зерна, $\text{м}^2/\text{м}^3$;

ν – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$;

Ar – критерий Архимеда

$$Ar = \frac{gd_a^3(\gamma_T - \gamma_\varepsilon)}{\nu^2}, \quad (12)$$

где g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Для более рыхлых слоев с порозностью $\varepsilon = 0,48$:

$$Re_{кр} = \frac{Ar}{710 + 4\sqrt{Ar}}. \quad (13)$$

Если формулу (8) преобразовать к виду, не содержащему численных коэффициентов, которые непосредственно входят в размерные параметры d_0 , V_0 , зависящие только от физических свойств потока воздуха (γ_ε и ν) и частиц слоя γ_T :

$$\frac{V'}{V_0} = \frac{\left(\frac{d_a}{d_0}\right)^2}{1 + (d_a + d_0)^{3/2}}, \quad (14)$$

где V_0 – скоростной параметр при расчете внешней гидродинамики кипящего слоя, $\text{м}/\text{с}$.

Для псевдооживленных слоев, имеющих порозность, отличную от 0,4, также можно применить формулу (8), если изменить численные коэффициенты вводимых параметров d_0 и V_0 . В общем случае можно записать:

$$d_0 = 23,33 \sqrt[3]{\frac{(1-\varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3}} \sqrt[3]{\frac{\nu \gamma_\varepsilon}{g \gamma_T - \gamma_\varepsilon}}, \quad (15)$$

$$V_0 = 3,86 \sqrt[3]{\varepsilon_0^3 (1-\varepsilon_0)^2} \sqrt[3]{g \nu \frac{\gamma_T - \gamma_\varepsilon}{\gamma_\varepsilon}}. \quad (16)$$

Если правильно учесть коэффициенты формы ψ и среднего диаметра d_a , формула (14) может быть применена в инженерных расчетах с точностью $\pm 30\%$.

Второй подход к определению скорости начала псевдооживления отражен в работах Я. Беранека и Д. Сокола.

Авторы приводят следующие соотношения, базирующиеся на скорости витания V_ε :

для ламинарного движения ($B_0 < 0,3$)

$$V'/V_g = 0,019 \pm 0,003; \quad (17)$$

для переходной области

$$V'/V_g = 0,022B_0^{0,2}; \quad (18)$$

для турбулентного режима ($B_0 > 10^3$)

$$V'/V_g = 0,009 \pm 0,005, \quad (19)$$

где $B_0 = \frac{V_g^3 \gamma_g}{g \nu \gamma_s}$ – критерий свободного падения для сферических частиц.

Выражения (17) и (18) приемлемы и для частиц любой формы, если ввести критерий B , который бы отличался от B_0 коэффициентом формы ψ , определенным экспериментально. Эти выражения могут быть приведены к виду $Re_{кр} = f(Ar)$:

для ламинарной области:

$$Re_{кр} = 1,069 \cdot 10^{-3} Ar; \quad (20)$$

для переходной области:

$$\frac{Re_{кр}^3}{Ar} = 0,022B_0^{1,6}; \quad (21)$$

для турбулентного режима:

$$Re_{кр} = 0,227 Ar^{0,5}. \quad (22)$$

Определение степени расширения псевдооживленного слоя

Между частицами, как в спокойном, так и в кипящем слое, имеется свободный объем. Отношение свободного объема к общему объему слоя принято называть порозностью:

$$\varepsilon = \frac{V - V_T}{V} = 1 - \frac{V_T}{V}, \quad (23)$$

где V и V_T – объем слоя и твердых частиц в нем, соответственно, m^3 .

Изменение порозности характеризует расширение слоя при псевдооживлении.

Для практических расчетов можно воспользоваться выражением:

$$\varepsilon = \left(\frac{18 Re + 0,36 Re^2}{Ar} \right)^{0,21}, \quad (24)$$

где Re и Ar – критерии Рейнольдса и Архимеда.

Для различных материалов ε_0 находится в пределах от 0,35 до 0,45. Без особой погрешности можно принять среднеарифметическое значение $\varepsilon_0 = 0,4$. Вынос частиц определяется порозностью при $\varepsilon_0 = 1$.

Удельная масса твердого материала в слое $\rho_{сл}$ может быть определена по удельной массе твердых частиц и порозности:

$$\rho_{сл} = \rho_T (1 - \varepsilon),$$

а удельная масса насыпного неподвижного слоя:

$$\rho_0 = \rho_T(1 - \varepsilon_0).$$

При использовании в качестве оживающего агента дутьевого воздуха, потери давления в слое ΔP_n , Па, могут быть определены из выражения:

$$\Delta P_n = g\rho_T(1 - \varepsilon)H.$$

Высоту слоя при псевдооживлении можно вычислить по формуле:

$$H = H_0 \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon} = H_0 R. \quad (25)$$

Поэтому очень важно при проектировании котлов с кипящим слоем знать степень расширения псевдооживленного слоя $R \frac{H}{H_0} = (1 - \varepsilon_0)/(1 - \varepsilon)$ при разных скоростях оживающего воздуха. Данная величина R влияет на рабочую высоту топки котла, состояние кипящего слоя и эффективность выравнивания свойств по объему слоя в результате перемешивания.

Выводы

1. Обоснована технология сжигания низкосортных топлив в топках котлов с кипящим слоем.
2. Использование предложенных технических решений позволило определить потери давления в кипящем слое при изменении скорости дутьевого воздуха и степени расширения псевдооживленного слоя.
3. Дано теоретическое описание по определению критической скорости псевдооживления при изменении управляемых параметров слоя.
4. Определена величина порозности для различных материалов $\varepsilon = 0,35 \dots 0,45$, характеризующей расширение слоя при псевдооживлении, влияющей на высоту топки котла.

Список литературы

1. Бородуля В.А. Сжигание твердого топлива в псевдооживленном слое / В.А. Бородуля, Л.М. Виноградов. – Минск: Наука и техника, 1980.
2. Кучин Г.П. Сжигание низкосортных топлив в псевдооживленном слое / Г.П. Кучин, В.Я. Скрипка, Н.Н. Урда. – К.: Техника, 1987.
3. Бочаров А.А. О реконструкции теплоэнергетических котлов на сжигание твердого топлива в кипящем слое / А.А. Бочаров. – Химическая технология. – 1987. – № 2 – С. 49–53.
4. Бочаров А.А. Сжигание высокозольного топлива в шахтных котельных / А.А. Бочаров, В.В. Гавриленко. – Уголь Украины. – 1986. – № 5. – С 7–9.
5. Бочаров А.А. Сжигание углей в кипящем слое / А.А. Бочаров, В.В. Мацнев. – Уголь. – 1985. – № 10. – С. 26–29.
6. Ильенко Б.К., Сжигание твердых топлив в кипящем слое под давлением / Б.К. Ильенко, В.Н. Шемякин, В.П. Воловенко – Промышленная теплотехника. – 1987. – № 4. – С.102–106.
7. Шелудченко В.И. Ресурсо и энергосберегающие технологии в системах теплогазоснабжения / В.И. Шелудченко. – Макеевка: ДГАСА, 1999. – С. 232.

Рецензент: д.т.н., проф. С.П. Висоцький, АДІ ДВНЗ «ДонНТУ».

Стаття надійшла до редакції 06.06.12
© Олексюк А.А., Шайхед О.В., 2012