

ОХЛАЖДЕНИЕ / НАГРЕВ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО МАТЕРИАЛА ВОЗДУХОМ В МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ЦИКЛОННЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ

АННОТАЦИЯ

В данной статье рассмотрены вопросы расчета распределения температур по ступеням последовательно включенных циклонных теплообменников. Такие теплообменники могут применяться для охлаждения или нагрева мелкозернистого материала потоком газа (в частности, воздухом).

1. ВВЕДЕНИЕ

Многоступенчатые циклонные теплообменники для охлаждения мелкозернистых материалов нагреваемым газом (или, наоборот, для охлаждения продуктов сгорания в целях нагрева мелкозернистого материала) нашли широкое распространение в ряде отраслей промышленности, особенно — на глиноземных (алюминиевых) и цементных заводах [1—3]. Их успешная эксплуатация в течение нескольких десятков лет на большинстве установок для кальцинации глинозема дает основание рекомендовать их и для других отраслей промышленности. Такая проблема возникает, в частности, в установках энерготехнологической переработки сланцев.

Ниже выводятся основные уравнения для теплового расчета охладителей мелкозернистого материала. Считаем заданными температуру и расход мелкозернистого материала на входе в охладитель, температуру охлаждающего воздуха и предельную температуру, до которой должен быть охлажден мелкозернистый материал.

2. РАСЧЕТ ИДЕАЛЬНОЙ СХЕМЫ ПРИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛОНОВ РАВНОЙ ЕДИНИЦЕ

Циклоны-охладители работают при очень больших (по сравнению с циклонами для санитарной очистки газов) концентрациях мелкозернистого материала — порядка 1 кг материала на 1 кг несущего газа. Примерно такие же концентрации имеют место на входе в так называемые горячие (850 °С) циклоны в котлах с циркуляционным кипящим слоем. Опыт их эксплуатации (в мире в настоящее время работает несколько сотен крупных котлов такого типа) показывает, что концентрация пыли на выходе из него даже при диаметре циклона, равном 3...4 м, составляет 60...100 г/м³ при концентрации на входе — несколько килограммов на м³ [4]. Столь же эффективно работают циклоны на выходе из печей с циркуляционным кипящим слоем для кальцинации глинозема [2].

По-видимому, повышение эффективности улавливания η связано с образованием кластеров из час-

тиц при столь высокой их концентрации. Чтобы понять основные факторы, определяющие эффективность охлаждения, для начала примем $\eta = 1$.

Схема охладителя, состоящего из четырех циклонов, представлена на рис. 1.

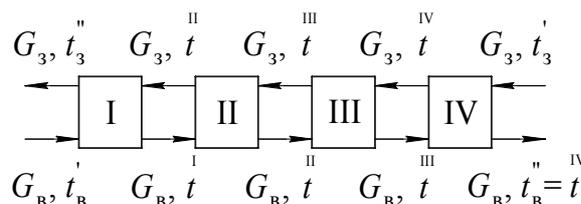


Рис. 1. Схема охладителя из четырех циклонов

Горячая зола поступает в циклон IV с температурой t'_3 и последовательно проходит через все циклоны, выходя из циклона I с температурой t''_3 . Расход золы G_3 , кг/с, через все циклоны, естественно, один и тот же.

Охлаждающий воздух подается в циклон I с температурой t'_B . В трубопровод, по которому поток этого воздуха поступает в циклон, подается зола из циклона II. В трубопроводе (и в самом циклоне) они смешиваются, их температуры выравниваются. Температура золы, выходящей из этого циклона в разгрузочный бункер, равна температуре обеспыленного воздуха, поступающего в циклон II. Во входной трубопровод перед циклоном II перетекает зола из циклона III и т.д. Расход воздуха G_B , кг/с, одинаков во всех циклонах.

Составим уравнение теплового баланса первого циклона:

$$G_B C_B \left(t - t'_B \right) = G_3 C_3 \left(t - t'' \right), \quad (1)$$

считая удельные теплоемкости золы C_3 и воздуха C_B , Дж/(кг·К) постоянными.

Обозначим отношение теплоемкостей потоков:

$$A = \frac{G_B C_B}{G_3 C_3}.$$

Тогда уравнение (1) запишется в форме:

$$t = t + A \left(t - t'_B \right). \quad (2)$$

По аналогии с решением, приведенным в [5], для любого i -го циклона, начиная со второго, можно записать:

$$t = t + \left(t - t'_B \right) \sum_{k=1}^{i-1} A^k. \quad (3)$$

Эта формула справедлива вне зависимости от числа циклонов. На первый взгляд кажется странным, что температура, скажем, в третьем циклоне рассчитывается по той же формуле вне зависимости от того, сколько циклонов включено в цепочку. Дело в том, что от общего количества циклонов зависит температура t в первом из них, входящая в формулу (3).

В частности, температура золы, входящей в IV (последний в схеме на рис. 1) циклон, связана с параметрами охладителя следующим соотношением:

$$t'_3 \equiv t = t + \left(t - t'_B \right) \left[A + A^2 + A^3 + A^4 \right]. \quad (4)$$

Из этого соотношения нетрудно получить формулу для расчета температуры охлажденной золы t''_3 , выходящей из первого циклона при заданной температуре t'_3 :

$$t''_3 \equiv t = \frac{t'_3 + t'_B \left[A + A^2 + A^3 + A^4 \right]}{1 + A + A^2 + A^3 + A^4}. \quad (5)$$

В общем виде:

$$t''_3 \equiv t'_3 = \frac{t'_3 + t'_B \sum_{k=1}^i A^k}{1 + \sum_{k=0}^i A^k}. \quad (6)$$

Температура нагретого воздуха t''_B равна температуре в последнем циклоне. Ее можно рассчитать по формуле (3) и проверить по уравнению теплового баланса охладителя:

$$C_3 G_3 t'_3 + C_B G_B t'_B = G_B C_B t''_B + G_3 C_3 t''_3, \quad (7)$$

$$t''_B = \frac{t'_3 + A t'_B - t''_3}{A}. \quad (8)$$

3. РАСЧЕТ СХЕМЫ ПРИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛОНОВ МЕНЬШЕ ЕДИНИЦЫ

3.1. Поток золы при $\eta < 1$

Когда эффективность улавливания золы в циклоне меньше единицы, необходимо учитывать, что воздух, уходящий из i -го циклона, будет уносить часть золы в следующий $(i+1)$ -й циклон, а в предыдущий $(i-1)$ -й циклон поступит меньше золы. Это представлено на рис. 2.

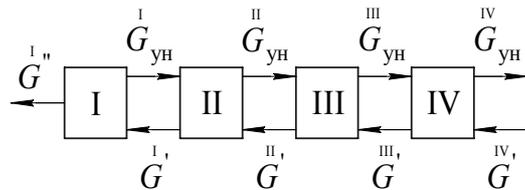


Рис. 2. Схема потоков золы при наличии уноса из циклонов

Для любого i -го циклона (кроме первого) справедливо соотношение:

$$G''_{yH} = \left(G' + G''_{yH} \right) \left(1 - \eta \right). \quad (9)$$

В то же время материальный баланс циклонов:

$$G' + G''_{yH} = G''_{yH} + G'. \quad (10)$$

Из (9) и (10) следует:

$$G''_{yH} \eta = G' \left(1 - \eta \right). \quad (11)$$

Будем считать эффективность улавливания всех циклонов одинаковой и равной η . Тогда, составляя рекуррентные уравнения, начиная с циклона I, после некоторых преобразований получаем:

$$G''_{yH} = G'' \frac{1 - \eta}{\eta}; \quad (12)$$

$$G''_{yH} = G'' \frac{1 - \eta}{\eta^2}; \quad (13)$$

$$G''_{yH} = \frac{G''}{\eta} \left[\left(\frac{1 - \eta}{\eta} \right)^2 + 1 - \eta \right]; \quad (14)$$

$$G''_{yH} = \frac{G''}{\eta} \left[\left(\frac{1 - \eta}{\eta} \right)^3 + \frac{1 - \eta}{\eta} \right]; \quad (15)$$

$$G' = \frac{G''}{\eta}; \quad (16)$$

$$G' = G'' \left[\frac{1 - \eta}{\eta^2} + 1 \right]; \quad (17)$$

$$G' = \frac{G''}{\eta} \left[\left(\frac{1 - \eta}{\eta} \right)^2 + 1 \right]; \quad (18)$$

$$G' = \frac{G''}{\eta} \left[\left(\frac{1 - \eta}{\eta} \right)^3 + \frac{1 - \eta}{\eta} + \eta \right]. \quad (19)$$

Здесь G'' — расход охлажденной золы (т.е. выходящей из циклона I). Он должен равняться расходу золы, поступающей в последний циклон, за вычетом уноса из него. В случае охладителя из четырех циклонов (большого числа последовательно включенных циклонов авторы не встречали):

$$G'' = G' - G''_{yH}. \quad (20)$$

Из (19) можно получить:

$$G'' = \frac{G' \eta}{\left(\frac{1 - \eta}{\eta} \right)^3 + \frac{1 - \eta}{\eta} + \eta}. \quad (21)$$

Величина G' задана по условию. Если охладитель состоит всего из трех циклонов, то:

$$G'' = G' - G_{\text{ун}}^{\text{III}}, \quad (22)$$

и заданным расходом охлаждаемой золы является G' .

На рис. 3 приведено распределение потоков золы, перетекающих из циклона в циклон, и величин уноса из каждого циклона, рассчитанных по приведенным формулам при $\eta = 0.8$.

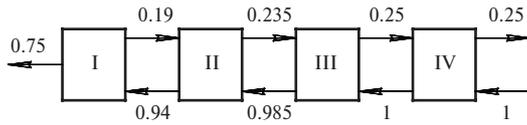


Рис. 3. Распределение потоков золы при эффективности пылеулавливания $\eta = 0.8$

Столь низкая эффективность улавливания золы в каждом циклоне выбрана специально, чтобы отчетливо представить картину. Оказывается, что поток перетекающей из циклона в циклон золы почти не меняется (от 1 до 0,94). Соответственно и перенос золы воздухом из циклона в циклон также почти постоянный (за исключением, естественно, I циклона, в который поступает чистый воздух, без золы). Грубо можно считать, что поток золы, подаваемой в последний циклон, проходит через все циклоны до первого, в нем основная часть золы выделяется (с эффективностью улавливания чуть меньше, чем η), а остальная зола вместе с потоком воздуха проходит обратно через все циклоны, нагревается в них и уходит с нагретым воздухом.

3.2. Распределение температур циклонов при наличии пылеуноса

На основании вышеизложенного для упрощения задачи будем считать, что из циклона в циклон перетекает поток золы G_3 , обратно возвращается с уносом aG_3 . Из последнего циклона уносится с воздухом aG_3 , из первого выгружается $(1-a)G_3$. Как видно из рис. 3, $a \approx 1.25(1-\eta)$.

Тогда уравнение теплового баланса циклона I примет вид:

$$G_B C_B \left(t - t'_B \right) = G_3 C_3 t - (1-a) G_3 C_3 t - a G_3 C_3 t. \quad (1')$$

Из уравнения баланса циклона II с учетом (1') получим:

$$t = t + \left(t - t'_B \right) \left[A + A(A+a) \right]. \quad (2')$$

В общем виде температура i -го циклона определяется формулой:

$$t = t + \left(t - t'_B \right) A \sum_{k=0}^{i-2} (a+A)^k. \quad (3')$$

Повторив вывод, проделанный для схемы с «идеальными» циклонами, окончательно получим:

$$t \equiv t''_3 = \frac{t'_3 + A t'_B \sum_{k=0}^{i-1} (a+A)^k}{1 + A \sum_{k=0}^{i-1} (a+A)^k}; \quad (6')$$

$$t''_B = \frac{t'_3 + A t'_B - (1-a)t''_3}{A+a}. \quad (8')$$

Из сравнения формул (6)—(8) и (6')—(8') видно, что наличие уноса частиц из циклонов позволяет сильнее охладить золу при том же отношении A теплоемкостей потоков воздуха и золы на входе в охладитель. Это естественно, поскольку унесенная зола уходит из охладителя, имея температуру нагретого воздуха, а количество охлажденной до температуры t''_3 золы уменьшается.

4. УЧЕТ ТЕПЛОПOTЕРЬ ОТ ПОВЕРХНОСТИ ЦИКЛОНОВ

Чаще всего теплота воздуха, охлаждающего мелкозернистый материал, используется в технологическом процессе. В этом случае циклоны целесообразно теплоизолировать снаружи. Однако, иногда возникает необходимость просто охладить материал без утилизации теплоты, например, заменить мокрое охлаждение горячей золы сухим. Поэтому целесообразно оценить количество теплоты, теряемой от поверхностей неизолированных циклонов. Эта оценка, кстати, позволит установить, в каких случаях можно обойтись без тепловой изоляции, даже если предполагается использовать теплоту нагретого воздуха.

Количество теплоты, теряемой i -м циклоном, равно $k_i F_i \left(t - t'_B \right)$, где k — коэффициент теплопередачи, а F — теплоотдающая поверхность циклона.

Введем безразмерный комплекс:

$$B_i = \frac{k_i F_i}{G_3 C_3}. \quad (23)$$

При сильном нагреве воздуха (скажем, от 20 до 500 °C) его объемный расход существенно возрастает, поэтому диаметр последнего циклона, а следовательно, и его поверхность F получаются больше, чем первого. Коэффициент теплопередачи также будет увеличиваться по мере нагрева воздуха в связи с возрастанием лучистой составляющей теплоотдачи. Поэтому комплекс B_i может быть разным для разных циклонов.

В этом случае практически невозможно получить простую расчетную формулу типа (6)—(6') или (8)—(8').

Из уравнения теплового баланса первого циклона будем иметь:

$$t = t(1 + A + B_1) - t'_B (A + B_1), \quad (24)$$

а из уравнения баланса второго и всех последующих:

$$t^i = t^{i-1} (1 + a + A + B_{i-1}) - t^{i-2} (a + A) - t'_B B_{i-1}. \quad (25)$$

Данная формула справедлива для III и последующих циклонов. Если по условию задана допус-

тимая температура материала t на выходе из первого циклона, то такой расчет позволяет найти число циклонов, необходимых для охлаждения материала с заданной температурой на входе в аппарат. Скажем, если горячий материал имеет температуру

750°C , а расчёт даёт $t = 800^\circ\text{C}$, следовательно, достаточно установить последовательно четыре

циклона (в этом случае t есть температура материала, поступающего в четвертый циклон из гипотетического — несуществующего — пятого). Если же задано число циклонов (скажем IV) и температура материала на входе (обозначенная в этом случае,

как t), то расчет проводится методом итераций. Окончательный расчет с учетом теплоотдачи, если она играет заметную роль, в любом случае приходится проводить после предварительного определения размера циклонов на основании результатов приближенного расчета.

В качестве примера приведем расчет охладителя золы установки УТТ-750 для получения сланцевого масла посредством нагрева сланца твердым теплоносителем. Требуется охладить воздухом с температурой 20°C 12 т/ч золы с температурой 750°C до температуры 60°C . Теплоемкость золы равна $1.26 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$. Зола в основном состоит из частиц мельче 0.1 мм.

Расчет выполнен для простейшего случая применения «идеальных» циклонов без тепловых потерь (формулы (6) и (8)). В четырехступенчатом охладителе (конструктивная схема теплообменника представлена на рис. 4) при расходе воздуха $19\,400 \text{ м}^3/\text{ч}$ (в нормальных условиях) зола охладится до 55.5°C . При этом воздух нагреется до температуры 397°C .

Практически того же результата можно добиться в теплообменнике, состоящем из трех циклонов, если увеличить расход воздуха до $25\,060 \text{ м}^3/\text{ч}$ (н. у.). При этом зола охладится до 57°C , а воздух нагреется до 328°C .

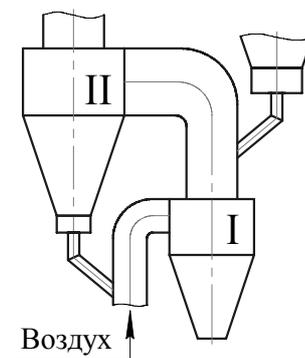


Рис. 4. Конструктивная схема теплообменного аппарата

ВЫВОДЫ

Многоступенчатые циклонные теплообменники позволяют эффективно охладить мелкозернистый материал воздухом (в частности, вместо воды при мокром золоудалении). Нагретый воздух может быть использован в технологическом цикле.

Как видно из полученных формул, расчет такого теплообменника не представляет затруднений.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- G — массовый расход потока, кг/с;
 C — удельная теплоемкость вещества, Дж/(кг·K);
 t — температура потока или температура в циклоне, $^\circ\text{C}$.
 η — эффективность пылеулавливания циклона, д. е.
 Индексы:
 z — поток золы;
 v — поток воздуха;
 $'$ — вход в циклон;
 $''$ — выход из циклона;
 i, I, II, III, IV, V — номера циклонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Процессы** и аппараты глиноземного производства/ А.И. Еремин, А.Н. Наумчик, В.Г. Казаков. М.: Металлургия, 1980.
2. **Производство** глинозема/А.И. Лайнер, А.И. Еремин, Ю.А. Лайнер, И.М. Певзнер. М.: Металлургия, 1978.
3. **Kondo M., Fukuda S.** // Zement — Kalk — Gips. 1974. № 9. P. 451—456.
4. **Котлы** и топки с кипящим слоем/А.П. Баскаков, В.В. Мацнев, И.В. Распопов. М.: Энергоатомиздат, 1995.
5. **Баскаков А.П.** Расчет многокамерного аппарата с кипящим слоем для охлаждения мелкозернистых материалов // Инженерно-физический журнал. 1963. Т. VI. № 1. С. 101—104.