

Harjutused 11. Расчёт барабанного реактора – пиролизёра с твёрдым

теплоносителем.

1. Конструктивное оформление реактора-пиролизёра

Основными узлами отделения - реактор-пиролизер, в котором топливо смешивается с твердым теплоносителем (золой) и выделяются летучие продукты при термической деструкции (пиролизе) органической массы, и аэрофонтанная топка, в которой происходит дожигание твердых продуктов пиролиза и нагрев циркулирующего в предтопке теплоносителя с последующим использованием его физического тепла в реакторе-пиролизере.



Рис.1. Принципиальная технологическая схема реакторного узла отделения пиролиза процесса Galoter. 1- зольные циклоны; 2- смеситель; 3- бункер сухого сланца; 4- реактор;5- пылевая камера;6- аэрофонтанная топка (АФТ) завихритель; 7- ствол разгонного участка АФТ; 8- бункер провала; 9- шнек; 10-байпас теплоностеля.

При разработке данного процесса большое внимание отводилось рациональному аппаратурному оформлению. В частности, это относится к выбору оптимальных конструктивных параметров и к созданию метода расчета наиболее ответственного узла установки - реактора-пиролизера. Опыт эксплуатации установок по термической переработке твердых топлив показывает, что наиболее простой и эффективной конструкцией реакторапиролизера является вращающийся горизонтальный барабан. Непрерывное перемещение материала в таком реакторе не только устраняет слеживание и спекание частиц, наблюдаемые в реакторах бункерного типа, но и обеспечивает самоочистку стенок от коксовых отложений . Аналогичный аппарат использовался при переработке сланца в так называемой реторте Дэвидсона.



Рис. 2. Барабанный реактор: 1- корпус реактора, 2-футеровка (обмуровка),3 привод,4-5 подшипники

Реактор –пиролизёр представлет собой короткий ($\frac{L}{D} = 2 - 3$) полый ,горизонтальный аппарат с с торцевыми стенками, в которые врезаны цилиндрические патрубки. Патрубки служат для герметизации и тепловой компенсации вращающейся системы. Через один из патрубков поддействием силы тяжести в реактор подаётся твёрдая фаза из смесителя . Из патрубка на противоположном конце реактора организован выпуск твёрдой и парогазовой фаз.

Барабан вращается со скаоростью 1-2 оборота в минуту и движение материала в осевом направлении происходит за счёт разности кровня материала на концах барабана.

Выход продуктов термическоо разложения сланца определяется температурой в реакторе и временем пребывания твёрдой и газаовой фаз в реакционном объёме.

Тепловой режим зависит от количества и температуры смешивающихся материалов-сухого сланца и твердого теплоносителя-золы.

Время пребывания газовой фазы в реакторе связан со временем пребывания в реакторе твёрдой фазы, то есть со степенью заполнения твёрдой фазы.следовательно ,решающим фактором для процесса переработки сланца является время пребывания твёрдой фазы.

К настоящему времени три типа установки с твёрдым теплоносителем производительность 500 и 3000 и 6000 тонн сланца в сутки в проверены на практике и на сегодняшний день являются реальными агрегатами для промышленного внедрения.

Все типовые размеры реакторов характеризуются одинаковой степенью заполнения твердым материалом (50 %) и одинаковым давлением во внутренней полости барабана-реактора (0,2 бар).

Технические характеристики барабанных реакторов для процесса «Galoter» УТТ приведены в таблице

Установка	Скорость движения твёрдого материала в реакторе, м/с	Производительность по сланцу, т/ч	Число оборотов реактор, об/мин
УТТ-200	0,35	6,34	1,83
УТТ-500	0,57	20,2	1,18
УТТ-3000	1,1	139,0	0,92

Таблица 1. Технические характеристики барабанных реакторов УТТ

В настоящее время в методике расчёта барабанного реактора используют критериальные уравнения.

1. Степень заполнения φ представляет собой отношение объёма твёрдой фазы в аппарате V_m к его полному объёму $V_{,}$ что соответствует уравнению $V_m = \varphi \cdot V_{.}$ (1)

С учётом того, что объём твёрдого материала в реакторе связан с объёмным расходом Q и временем пребывания в реакторе τ соотношением $V_m = Q \cdot \tau$. (2)

степень заполнения выражается $\varphi = \frac{Q \cdot \tau}{V}$.

Степень зависит и от конструктивных размеров, характеристик твёрдой фазы и технологических режимов эксплуатации реактора :

- ✓ Диаметра реактор D (м);
- ✓ Длины реактора -L (м);
- ✓ Диаметра отверстия выходной диафрагмы -*D*₂ (м);
- ✓ Длины цилиндричесого патрубка *l(м);*

- ✓ Насыпной плотности материала *ρ_T* (кг/м³)
- ✓ Скорости вращения аппарата- *n* (об/мин);
- ✓ Кинематической вязкости парогазовой смеси –v (м²/с);
- ✓ Порозности слоя материала-*р* (м³/м³);
- ✓ Угла естественного откоса-β (град);
- ✓ Определяющего размера частицы твёрдой фазы-*d* (м);
- Абсолютной шероховатости стенок реактора, скорости парогазовой смеси-
- ✓ Скорости парогазовой смеси-*W*_g.
- ✓ Массового расхода твёрдой фазы-*G* (кг/час).

Степень заполнения барабанного реактора является функцией всех переменных: $\varphi = f(G, \rho_T, n, g, v, D, W)$

Данная зависимость может быть преобразована в критериальные уравнения , то есть в зависимости от следующих критериев подобия:

 $Re = \frac{W_g \cdot D}{v} - критерий Рейнольдса для газового потока;$ $Re_c = \frac{n \cdot D^e}{60 \cdot v} - центробежный критерий Рейнольдса;$ $Fr = \frac{W_g^2}{D \cdot g} - критерий Фруда для газового потока;$ $Fr_c = \frac{n^2 \cdot D}{3600 \cdot g} - центробежный критерий Фруда ;$ $Rt = \frac{Q}{60 \cdot n \cdot V} - удельное напряжение барабана по твёрдой фазе.$

Таким образом основное критериальное уравнение моделирования движения сыпучего материала во вращающемся реакторе имеет вид:

$$\varphi = A \cdot Rt^{p} \cdot Fr^{-m} = A \cdot \left(\frac{Q}{60 \cdot n \cdot V}\right)^{p} \cdot \left(\frac{n^{2} \cdot D}{3600 \cdot g}\right).$$

На основе опытных данных и модельных расчётов получено уравнение средней степени заполнения (в %) и среднего времени пребывания материала (мин) в барабанных реакторах с концевыми диафрагмами

$$\varphi = A \cdot Rt^{p} \cdot Fr_{c}^{-m} \left(\frac{D_{2}}{D}\right)^{q} \cdot \left(1 + \frac{l}{D}\right), \quad (3)$$

$$\tau = \frac{47.1 \cdot D^2 \cdot L}{Q} \cdot A \cdot Rt^p \cdot Fr_c^{0.05} \cdot \left(\frac{D_2}{D}\right)^q \cdot \left(1 + \frac{l}{D}\right) \quad (\text{MUH}), \quad (4)$$

$$A = 6,6 \cdot l^{0.95\frac{L}{D}}(5) \quad , \quad q = 0,5 \cdot \left(\frac{L}{D} - 3.1\right) \quad (6) \quad , \quad p = 0,18 \cdot \left(\frac{L}{D} - 1\right) \frac{D_2}{D} \quad (7),$$

при следующих условиях:

$$Rt \cdot 10^4 = 10 - 30$$
; $Fr_c \cdot 10^5 = 3 - 110$; $\frac{L}{D} = 1,8 - 5,0$; $\frac{D_2}{D} = 0,28 - 0,64$.

При поверочном расчёте реактора задача состоит в том, чтобы при заданной технологии проверить применимость уже существующей конструкции барабанного реактора для перерработки сланца.

В этом случае в уравнение (4) необходимо подставить численные значения входящих в них величин (G, D, L, l, D_2, n) и определить τ и φ .

При конструкторском расчёте реактора решается обратная задача, то есть уравнеие (4) и материального баланса реактора решаются относительно конструктивной переменной при заданных τ, φ, G, n .

Обычно в качестве такой переменной принимают один из размеров подпорного устройства (*l или D*₂), так ка наружный диаметр барабанного реактора ограничен стандартным рядом. Конструктивные размеры вычисляют:

- ✓ Толщина футеровки реактора δ (из теплового расчёта);
- ✓ Внутренний диаметр реактора- $D_{bn} = D 2 \cdot \delta$;
- ✓ Длина реактора- $L = \frac{4 \cdot \tau \cdot G}{\pi \cdot \varphi \cdot D_2 \cdot \rho_m};$
- ✓ Удельное напряжение реактора по твёрдой фазе- $Rt == \frac{G}{15 \cdot \pi \cdot \rho_m \cdot n \cdot D^2 \cdot L}$

2. Упрощенный расчёт времени пребывания твёрдой фазы в реакторе барабанного типа.

Рассмотрим реактор установки УТТ-3000, принимая следующие геометрические размеры: внутренний диаметр реактора- D=4,4 метра, длина реактор-L=15 метров.

Допускаем, что реактор имеет форму цилиндра.

➤ Тогда внутренний объём реактора составит (м²):

 $V = S \cdot L = 0.785 \cdot D^2 \cdot L = 0.785 \cdot 4.4^2 \cdot 15 = 228$

S-площадь поперечного сечения реактора, м².

Степень заполнения твёрдым материалом в проектных расчётах принимается равной 50% общего объёма реактора. В промышленных условиях степень заполнения меньше,

поэтому принимаем $\varphi = 0,4$ (40%.) Тогда объём материала, находящийся в реакторе, с учётом коэффициента заполнения будет равен (в м³):

$$V_m = \varphi \cdot V = 0.4 \cdot 228 = 91.2$$

Удельный расход твёрдого теплоносителя (золы) для «смоляного режима» составляет n_T=2-2,5 к одному. Принимаем нижний предел соотношения n_T=2, следовательно объём, занимаемый 2-мя частями теплоносителя-золы и одной частью сухого сланца составит 91,2 м³. Нетрудно вычислить, что объём сухого сланца, находящегося в реакторе составит (м³):

$$V_C = \frac{V_m}{n} = \frac{91.2}{3} = 30.4$$

Гринимаем, что по структуре потоков реактор-пиролизёр является реактором идеального вытеснения. В этом случае времена пребывания всех частиц потока в аппарате идеального вытеснения одинаковы. Среднее время пребывания частицы сланца τ_0 определяется частным от деления длины пройденного пути *L* (принимаем длину реактора), на линейную скорость- *w*. Проведем несложные преобразования:

$$\tau_0 = \frac{L}{w} = \frac{L \cdot S}{w \cdot S} = \frac{V}{Q},$$

Где V-объём, занимаемый потоком соответствующей фазы, м³.

Q – расход подачи соответствующей фазы в реактор м³/час.

Перейдём к от объёмных к массовым величинам, принимая, что насыпная плотность сухого сланца остаётся постоянной по длине реактора ρ =1000 (кг/м³).

$$\pi_{0} = \frac{V_{c} \cdot \rho_{c.n}}{Q_{c} \cdot \rho_{c} (1 - W)} = \frac{V_{c} \cdot \rho_{c.n}}{G_{c} (1 - W)} = \frac{30.4 \cdot 1000}{\left(\frac{3000}{24}\right) \cdot (1 - 0.1)1000} = 0.27$$

Где *G*_c- часовая производительность установки по сухому сланцу, при условии что исходный сланец имеет 10% влажность., Полученный результат 0,27 часа соответствует времени пребывания частицы в реакторе 16,2 минуты.

Установка	Отношение внутреннего и внешнего диаметров	Длина, м	Время пребывания в реакторе	
			твёрдого материала	ПГС, с
УТТ-200	1,64/2	4,5	20,6	18
УТТ-500	2,52/3	6,0	21,4	15
УТТ-3000	4,38/5	14,0	20,7	21,2

Вероятным фактором неполного разложения сланца является уменьшение времени пребывания частицы в реакторе, что связано с уменьшением полезного объёма реактора при нарушениях технологического режима. Поэтому реактор необходимо периодически останавливать на чистку.

Более подробный анализ движения материала в реакторе барабанного типа представлен в работе.

http://www.tstu.ru/education/elib/pdf/2009/pershin-a.pdf

3. Модель реактора идеального вытеснения

Для выяснения основных закономерностей теплообмена частиц твердого топлива с теплоносителем в реакторе-пиролизере воспользуемся моделью реактора идеального вытеснения, в которой каждый элементарный объем движущейся среды рассматривается как перемещающаяся вдоль оси реактора замкнутая система.

Предположим, что размеры всех частиц топлива одинаковы, а их смешение с частицами твердого теплоносителя происходит мгновенно и равномерно на входе в реактор.

Рассмотрим частицу топлива радиусом *R*, помещенную в засыпку мелких частиц теплоносителя. Уравнение, описывающее теплообмен между частицей топлива и частицами засыпки, имеет вид

$$\rho_a \cdot c_a \cdot m\left(\frac{4}{3}\pi \cdot R^3\right) \cdot \frac{dT_a}{dt} + \int_0^R \rho_p \cdot c_p \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} dr = 0.$$

Здесь ρ_a , c_a и T_a - соответственно плотность, теплоемкость и температура частиц теплоносителя; *m*- отношение массового расхода теплоносителя к массовому расходу топлива; ρ_p и c_p - соответственно плотность и теплоемкость частицы топлива.

Интегрирование при постоянных значениях плотностей и теплоемкостей дает следующее уравнение, связывающее температуры $T_a(t)$ и T(r,t):

$$\rho_{a} \cdot c_{a} \cdot m \cdot [T_{a,0} - T_{a}(t)] = 3 \cdot R^{-3} \int_{0}^{R} \rho_{p} \cdot c_{p} \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^{2} [T(r,t) - T_{0}] dr$$

Где $T_{a,0}$ и T_0 - начальные температуры частиц теплоносителя и топлива. Уравнение теплопроводности, описывающее прогрев частицы топлива, имеет вид

$$\rho_{p} \cdot c_{p} \cdot \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = \lambda_{p} \cdot \Delta T(r,t)$$

Где λ_p - теплопроводность частицы. Как показано в [11], тепло от засыпки к нагреваемой частице топлива передается главным образом теплопроводностью через газовую прослойку. Поэтому граничное условие на поверхности частицы имеет вид

$$-\lambda_{p} \cdot \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = \frac{Nu \cdot \lambda \cdot [T(R,t) - T_{a}]}{2R}$$

Здесь λ - теплопроводность газа, *Nu*- число Нуссельта. В случае теплообмена частиц топлива с частицами засыпки Nu[≈] 15 при *R* = 5÷10мм [1].

Численное решение системы уравнений теплообмена (5), (6) совместно с кинетическим уравнением (2) позволяет рассчитать динамику термического разложения твердого топлива и определить характерное время процесса τ .



В качестве примера рассмотрим пиролиз частиц сланца при их нагреве в засыпке из мелкого теплоносителя. Если пренебречь вторичными реакциями отложения смолы при ее движении во внутрипоровом пространстве частицы, для определения локальной концентрации керогена *Y* (*r*, *t*)внутри частицы можно воспользоваться значениями k_p , полученными при нагреве мелких частиц топлива в спутном потоке инертного газового теплоносителя. Будем считать. что радиус частиц топлива R = 10 мм, отношение массового расхода теплоносителя к массовому расходу топлива m = 2, начальная температура сухих частиц топлива $T_0 = 293$ K, начальная температура теплоносителя $T_{a0} = 973$ K. Примем [12], что $c_p = 1,0$ кДж/(кг·K), $\rho_p = 1200$ кг/м, $\lambda p = 0,3$ BT/(м·K). Начальное массовое содержание керогена в сухой массе сланца $Y_0 = 0,374$ (см. средние характеристики опытного образца сланца).

На рис. 4 приведены результаты расчета основных характеристик процесса: распределение температуры T = T(r, t) и концентрации керогенаY = Y(r,t) внутри частиц топлива, а также изменение среднего содержания керогена (Y) в частице топлива в зависимости от времени. При этом (У) определяется по формуле:

$$Y(t) = 3 \cdot R^{-3} \int_{0}^{R} Y(r,t) r^{2} dr.$$

Из рис. 4 видно, что в рассматриваемых условиях разложение керогена завершается за время $\tau = 480$ с.



Puc. 4

4. Особенности процесса

При нагревании частицы твердого топлива размягчаются и проходят через стадию пластического состояния. Устранить спекание частиц можно за счет непрерывного движения смеси твердого топлива и теплоносителя в реакторе. Простейшей конструкцией, позволяющей выполнить эти требования, является вращающийся горизонтальный барабан.

Специфичность реактора-пиролизера барабанного типа по сравнению с реакторами аналогичной конструкции, используемыми в других отраслях промышленности (цементной, силикатной, химической, металлургической и т. д.), заключается в том, что он относится к числу коротких горизонтальных барабанов (соотношение между длиной *L* и диаметром *D* равно 2-3), вращающихся с малой скоростью (1-2 оборота в минуту) и работающих с высокой степенью заполнения объема материалом ($\varphi = 0,4 \div 0,6$) при относительно малом времени пребывания твердой фазы (600 ÷ 1000 с) и сравнительно высокой температуре ($T = 700 \div 900$ K) [3].

Высокая степень заполнения объема реактора твердой фазой наиболее просто достигается установкой подпорных колец на концах барабана. К подпорным кольцам привариваются патрубки, на которых устанавливаются концевые уплотнения специальной конструкции. Через эти патрубки проводятся загрузка и выгрузка твердой фазы. Движение сыпучего материала в осевом направлении происходит за счет разности высот слоя на входе в барабан и на выходе из него. Выход реактора по такой схеме выполнен с подпорным устройством, состоящим ИЗ кольца с диаметром отверстия D_2 , относительно малым по сравнению с диаметром реактора, и из цилиндрического патрубка длиной - *l*. Щель между наружной поверхностью вращающегося патрубка и неподвижной системой продувается паром для устранения попадания туда парогазовой смеси из реактора.

Вопросы для самоповторения

- > Описать схему материальных потоков отделения пиролиза УТТ.
- От каких расчётных параметров зависит выход продуктов термодеструкции сланца, температурный режим и время пребывания материала в реакторе.
- Упрощенный расчёт времени пребывания твёрдой фазы в реакторе пиролизёребарабанного типа.
- От каких факторов зависит скорость движения сыпучего материала в горизонтальном направлении и степень заполнения реактора.
- Уравнение, описывающее теплообмен между сферической частицей топлива и частицами засыпки.

 \triangleright

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимов Г. Я. Моделирование процесса пиролиза угольных частиц // Инж.-физ. журн. 1999. Т. 72, № 2. С. 253-259.

2. Баскаков А. П., Корочкина С. К. Изучение теплообмена между частицами твердого мелко-зернистого теплоносителя в засыпке / / Тепло- и массоперенос. Общие вопросы теплообмена. М.: Госэнергоиздат, 1963. С. 660-667.

13. Красновский Г. А. Исследование реакторов барабанного типа для термической переработки мелкозернистого сланца и методика их расчета: Дис. канд. техн. наук. М., 1970.