

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗОЛЬНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ В СХЕМАХ КОМПЛЕКСНОЙ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ СЕРНИСТЫХ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ

А.А. МОРЕВ, А.Н. МРАКИН, А.А. СЕЛИВАНОВ

Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.

Обосновано применение рекуперативного теплообменника с движущимся плотным слоем твердого теплоносителя для утилизации теплоты зольных продуктов термопереработки сернистых горючих сланцев. Представлена методика гидравлического и теплового расчета рекуперативного теплообменника с движущимся плотным слоем, учитывающая теплофизические характеристики зольного остатка.

Ключевые слова: горючий сланец, зольный теплообменник, полукоксование, псевдооживленный слой, утилизация теплоты.

Российская Федерация занимает третье место в мире по запасам горючих сланцев. Крупнейшие месторождения сланцев расположены на территории Волжского сланцевого бассейна. Отличительной особенностью волжских сланцев является высокое содержание серы в составе органического вещества, что препятствует использованию сернистых сланцев в качестве топлива. Термическая обработка сернистого сланца позволяет перевести большую часть органического вещества в смолу с содержанием серы до 7-8%. Данный продукт является сырьем для получения ценных сераорганических соединений тиофенового ряда; тиофен, 2-метилтиофен, 2-5-диметилтиофен, тиофено-ароматический концентрат. Указанные продукты применяются в медицине, фармацевтике, производстве полимеров и других отраслях промышленности. В России сераорганические соединения тиофенового ряда в данный момент не производятся.

В результате проведенных ранее экспериментальных исследований [1] было установлено, что процесс полукоксования сернистых горючих сланцев может быть реализован не только в широко применяемых в Прибалтике установках с твердым теплоносителем (УТТ), но и в реакторах с псевдооживленным слоем.

На рис. 1 показана принципиальная технологическая схема реакторного блока полукоксования сернистого горючего сланца в псевдооживленном слое. Согласно схеме получаемый в реакторе псевдооживленного слоя полукокк направляется в циклонную топку. В результате дожигания полукокса образуется значительное (до 60-80% на сухой сланец) количество сланцевой золы с температурой 800-1000 °С. Поэтому важной задачей является вопрос утилизации физической теплоты сланцевой золы: выбор конструкции устройства для утилизации и методики его расчета с учетом теплофизических характеристик зольного остатка.

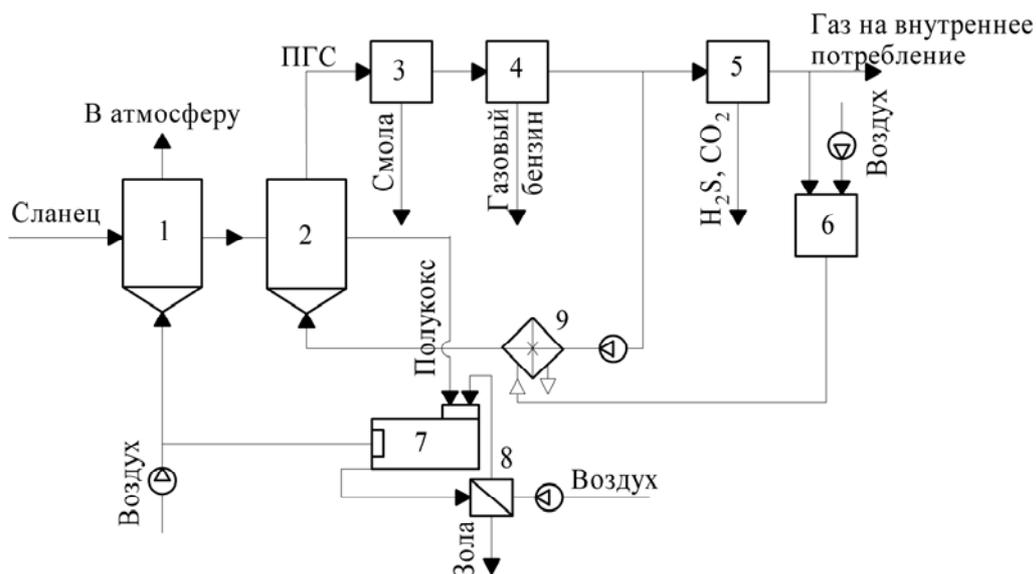


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема реакторного блока полукоксования сернистого горючего сланца в псевдоожиженном слое: 1 – сушилка; 2 – реактор псевдоожиженного слоя; 3 – система конденсации смолы; 4 – блок выделения газового бензина; 5 – блок сероочистки; 6 – топка сжигания сланцевого газа; 7 – циклонная топка; 8 – зольный теплообменник; 9 – теплообменник нагрева газа псевдоожижения

В предлагаемой схеме реакторного блока полукоксования сернистого сланца в псевдоожиженном слое зола используется для нагрева воздуха, поступающего в циклонную топку. Передача теплоты от золы к воздуху происходит в зольном теплообменнике.

Теплообменные аппараты с дисперсными теплоносителями можно разделить на две группы: регенеративные и рекуперативные. Применение регенеративных устройств для передачи теплоты от частиц сланцевой золы к атмосферному воздуху сопряжено с некоторыми трудностями. В первую очередь это связано с тем, что зола, образующаяся в результате дожига сланцевого полукокса в циклонной топке, имеет широкий гранулометрический состав, включающий в себя как фракции пылевидного сланца, так и фракции с относительно крупным размером частиц (вплоть до 10 мм). Использование подобной смеси твердых частиц в аппаратах с продуваемым плотным или псевдоожиженным слоем будет неизбежно сопровождаться уносом большого числа мелких частиц золы из слоя. Для передачи теплоты от зольного остатка к воздуху целесообразно использовать рекуперативные теплообменники.

Рекуперативные теплообменники с движущимся плотным слоем применяются во многих технологических процессах и энергетических установках. Известны различные конфигурации поверхностей нагрева рекуперативных теплообменников: трубчатые, пластинчатые, неоребранные, ребристые. Применение пластинчатых теплообменников ограничивается относительно низкими температурами теплоносителей и давлением газов, близким к атмосферному. Кроме того, применение двустороннего оребрения может привести к забиванию щелевых каналов мелкими частицами золы, что создаст дополнительные трудности для движения зольного теплоносителя. Поэтому мы считаем, что для нагрева воздуха зольным теплоносителем логично использование шахтного аппарата с гладкотрубным шахматным пучком, поперечно омываемым средой (рис. 2). Имеется успешный опыт применения подобных аппаратов в процессах

охлаждения мелкодисперсного полукокса в схемах энерготехнологической переработки твердых топлив, а также в процессах охлаждения полидисперсного (0-9 мм) слоя графитовых частиц электродной засыпки. Подобные аппараты могут быть использованы и для охлаждения золы, получаемой при энерготехнологической переработке сланцев, как в реакторах с псевдоожиженным слоем, так и в установках с твердым теплоносителем.

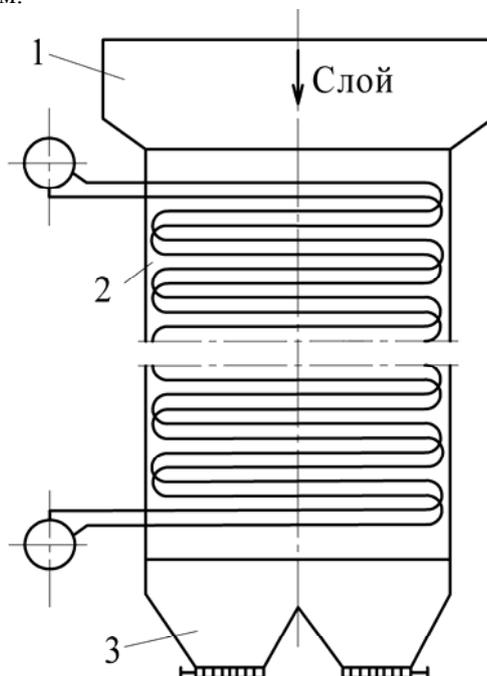


Рис. 2. Схема зольного теплообменника с гладкотрубным шахматным пучком, поперечно омываемым средой: 1 – верхний бункер; 2 – теплообменный участок; 3 – выпускное устройство

При гидравлическом расчете рекуперативных аппаратов с плотным движущимся слоем должны быть учтены особенности движения слоя в межтрубном пространстве теплообменника. Для обеспечения связанного движения в аппаратах с плотным слоем скорость не должна превышать значений, определяемых критическим значением числа Фруда. При превышении критической скорости происходит переход к несвязанному движению, разрыв слоя, сопровождающийся значительным увеличением его порозности (с 0,34-0,4 до 0,7-0,8). Это приводит к резкому падению эффективной теплопроводности и интенсивности теплообмена слоя. Для вертикальных трубчатых и кольцевых каналов, независимо от размера частиц, $Fr_{кр1} = 1,5 - 5$, откуда критическая скорость [2]

$$w_{кр} = (1,4 - 2,6) \cdot D_3^{0,5}, \quad (1)$$

где D_3 – эквивалентный диаметр канала, м.

Значение критического числа Фруда, при котором происходит разрыв слоя при поперечном омывании, не установлено. Найдено лишь значение «переходного» числа Фруда, при котором наступает локальное разрыхление слоя у поперечно омываемых цилиндров, и, как следствие, уменьшение степени зависимости коэффициента

теплоотдачи от скорости. Скорость переходного режима определяется из справедливого при $13 \leq D/d_3 \leq 147$ выражения [2]:

$$w_{\text{п}} = 0,032 \cdot \sqrt{D_3 \cdot (1 + 0,0363 \cdot \frac{D}{d_3})}, \quad (2)$$

где D – диаметр оmyваемого цилиндра, м; d_3 – эквивалентный диаметр твердых частиц, м.

Увеличение скорости сверх $w_{\text{п}}$ нецелесообразно, так как не приводит к улучшению теплоотдачи. В области $w < w_{\text{п}}$ ($w < w_{\text{кр}}$) повышение скорости интенсифицирует теплообмен и, следовательно, позволяет уменьшить поверхность [2]. Таким образом, рациональной с точки зрения теплообмена скоростью движения зольного теплоносителя является скорость переходного режима, определяемая по выражению (2).

Тепловой расчет рекуперативных теплообменников с движущимся плотным слоем (как и в случае обычных теплообменников) основывается на уравнениях теплового баланса и теплопередачи.

Важным вопросом является выбор критериального уравнения и определение коэффициента теплоотдачи зольного теплоносителя к теплообменной поверхности шахматного пучка труб. Большинство приведенных для поперечного оmyвания зависимостей [2, 3] получены для узких фракций и смесей с размерами частиц 0-3 мм, при преобладании в смесях мелочи. Для более крупных фракций, а также смесей со значительной полидисперсностью эти зависимости неприменимы в связи с изменением характера поперечного оmyвания цилиндрических поверхностей. При движении таких материалов отсутствует застойная зона в лобовой части цилиндра, возрастают размеры зоны отрыва в кормовой части. Время контакта слоя с цилиндром, определяющее теплоотдачу мелкодисперсных сред, сказывается значительно слабее. Для теплообмена материалов со значительной степенью полидисперсности с шахматными пучками труб рекомендуется [2] следующая зависимость:

$$\text{Nu} = 0,187 \cdot \text{Pe}^{0,24} \cdot \left(\frac{D}{d_3}\right)^{0,9} \cdot \left(\frac{s_1}{D}\right)^{-0,59}. \quad (3)$$

Она справедлива с погрешностью $\pm 10\%$ при $100 \leq \text{Pe} \leq 1100$; $10 \leq D/d_3 \leq 32$; $1,57 \leq s_1/D \leq 2,66$; $0,9 \leq s_2/D \leq 2,0$ для смесей частиц 0-9 мм, среднегармоническим размером $d_3 = 1,92 - 3,42$ мм.

Входящее в критериальное уравнение (3) число Пекле определяется значением эффективной температуропроводности (теплопроводности) плотного слоя и зависит от его порозности. Так как радиационный теплообмен не оказывает существенного влияния на эффективную теплопроводность плотного слоя из-за малых температурных напоров в ячейках слоя и незначительности их размеров [3], для определения значения эффективной теплопроводности плотного слоя можно воспользоваться приведенной в [4] полуэмпирической формулой, полученной без учета переноса теплоты излучением:

$$\lg \lambda_{\text{эф}} / \lambda_{\text{гс}} = (0,28 - 0,757 \cdot \lg \varepsilon - 0,057 \cdot \lg \frac{\lambda_{\text{зл}}}{\lambda_{\text{гс}}}) \cdot \lg \frac{\lambda_{\text{зл}}}{\lambda_{\text{гс}}}, \quad (4)$$

где $\lambda_{\text{эф}}$ – эффективная теплопроводность плотного слоя, Вт/м·°C; $\lambda_{\text{зл}}$ – теплопроводность зольных частиц, Вт/м·°C; $\lambda_{\text{гс}}$ – теплопроводность газовой среды, заполняющей пространство плотного слоя, Вт/м·°C; ε – порозность плотного слоя.

Согласно [5] теплопроводность сланцевой золы $\lambda_{зл}$, Вт/м·°С, с точностью $\pm 10\%$ может рассчитываться по следующему эмпирическому выражению:

$$\lambda_{зл} = 0,64 \cdot (1 - \Pi) \cdot \left[1 + 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_d \cdot \Pi \right], \quad (5)$$

где Π – средняя пористость частиц сланцевой золы в долях единицы; ρ_d – действительная плотность частиц сланцевой золы, кг/м³.

Теплоемкость плотного слоя является аддитивной величиной и зависит от теплоемкости твердого компонента и окружающей его газовой среды. Согласно [5] среднее (интегральное) значение теплоемкости частиц сланцевой золы $c_{зл}$, кДж/кг·°С, в интервале температур от 273 до T , К, определяется эмпирическим выражением:

$$c_{зл} = 0,88 + 0,000103 \cdot T - \frac{1,22 \cdot 10^4}{T^2}. \quad (6)$$

Используя значение эффективной теплопроводности, объемной плотности и теплоемкости плотного слоя, можно определить значение коэффициента эффективной теплопроводности слоя.

При компоновке поверхностей нагрева рекуперативного теплообменника с поперечно омываемым шахтным пучком необходимо обеспечить нестесненное движение материала в межтрубном пространстве, имеющее место при $(s_1 - D)/d_3 > (20 - 30)$. Для крупнозернистых материалов при поперечном омывании диаметр цилиндров, с целью интенсификации теплообмена, следует принимать равным 50–70 мм. При выборе продольного и поперечного шага необходимо учитывать, что в большинстве случаев целесообразно принимать $s_1/D = 1,36 - 2,5$, $s_2/D = 1,8 - 3$, однако для предотвращения заклинивания частиц минимальные зазоры в свету между трубами должны быть не менее $10 \cdot d_3$ [2].

Таким образом, приведенные выше зависимости являются основой методики расчета зольного теплообменника, конструктивно выполненного в виде шахтного аппарата с гладкотрубным шахматным пучком, поперечно омываемым зольным теплоносителем.

Выводы

1. Для утилизации теплоты зольных продуктов комплексной энерготехнологической переработки сернистых горючих сланцев обосновано применение рекуперативного теплообменника с движущимся плотным слоем твердого теплоносителя, выполненного в виде шахтного аппарата с гладкотрубным шахматным пучком, поперечно омываемым средой.

2. Представлена методика гидравлического и теплового расчета рекуперативного теплообменника с движущимся плотным слоем твердого теплоносителя, учитывающая теплофизические характеристики зольного остатка термической переработки сернистых горючих сланцев.

Summary

The application of the regenerative heat exchanger with a moving dense layer of solid heat carrier for heat recovery ash products conversion sulfur shale. The technique of hydraulic and thermal calculation of the regenerative heat exchanger with a moving dense layer, taking into account the thermal characteristics of bottom ash.

Keywords: oil shale, ash heat exchanger, carbonization, fluidized bed, heat recovery.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта №15-48-02313 «р_поволжье_a»

Литература

1. Опытная переработка мелкозернистого волжского сланца на установке с псевдоожиженным слоем: отчет о НИР / С.К. Дойлов Кохтла-Ярве: НИИСланцев, 1991. 16 с.
2. Горбис З.Р. Теплообменники с проточными дисперсными теплоносителями / З.Р. Горбис, В.А. Календерьян. М.: Энергия, 1975. 296 с.
3. Горбис З.Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков / З.Р. Горбис. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1970. 424 с.
4. Аэров М.Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы / М.Э. Аэров, О.М. Тодес, Д.А. Наринский. Л.: Химия, 1979. 176 с.
5. Печенегов Ю.Я. Теплообмен и теплоносители в процессах термической обработки измельченного твердого топлива: монография / Ю.Я. Печенегов. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1983. 116 с.

Поступила в редакцию

29 мая 2015 г.

Морев Александр Александрович – канд. техн. наук, ассистент Саратовского государственного технического университета (СГТУ) имени Гагарина Ю.А. Тел: 8(845)299-87-49, 8(845)354-56-55, 8(927)1151529.
E-mail: aamorev@gmail.com.

Мракин Антон Николаевич – канд. техн. наук, доцент Саратовского государственного технического университета (СГТУ) имени Гагарина Ю.А. Тел: 8(845)299-87-49, 8(987)322-76-56.
E-mail: anton1987.87@mail.ru.

Селиванов Алексей Александрович – ассистент Саратовского государственного технического университета (СГТУ) имени Гагарина Ю.А. Тел: 8(845)299-87-49, 8(917)217-70-70.
E-mail: selivanych-86@mail.ru.