

Особенности сушки окисленного графита в фонтанирующем слое

Стративнов Е.В., Кожан А.П., Москалик Л.Д., Рябчук В.С.

Институт газа НАН Украины, Киев

Приведены результаты исследований по сушке порошка окисленного графита в аппарате фонтанирующего слоя. Гидродинамические и термические особенности непрерывного процесса сушки исследовались на холодных и горячих моделях. Описаны основные конструктивные решения и геометрические параметры аппарата для сушки окисленного графита.

Ключевые слова: терморасширенный графит, окисленный графит, кипящий слой, псевдооживление, фонтанирующий слой.

Наведено результати досліджень щодо сушіння порошку окисленого графіту в апараті фонтануючого шару. Гідродинамічні та термічні особливості безперервного процесу сушіння досліджувалися на холодних та гарячих моделях. Описано основні конструктивні рішення та геометричні параметри апарату для сушіння окисненого графіта.

Ключові слова: терморозширений графіт, окиснений графіт, киплячий шар, псевдозрідження, фонтануючий шар.

Отсутствие на территории Украины сырьевых ресурсов асбеста и меди, а также производственных мощностей по выпуску паронитов и фторопластов привело к появлению на отечественном рынке дефицита листовых прокладочных материалов. Создавшаяся ситуация вынуждает разрабатывать новые материалы на базе отечественных ресурсов сырья. Одним из таких материалов является терморасширенный графит (ТРГ), получаемый в основном из производимого в Украине природного кристаллического графита. На одном из отечественных предприятий при участии Института газа НАНУ и Института проблем материаловедения НАНУ для этих целей освоено участие, где имеются две печи терморасширения производительностью по 20 кг/ч, узел сухого компактирования ТРГ, прокатный стан для изготовления графитового армированного картона, вырубочные прессы, а также просечной пресс для изготовления армирующей стальной фольги.

ТРГ получают из химически обработанного природного кристаллического графита, который после обработки в реакторе промывают водой в вакуум-фильтре для удаления избыточного содержания серной кислоты и в дальнейшем сушат [1, 2].

Сушка окисленного графита является технологически сложным процессом, так как перегрев частиц графита во время сушки может привести к термическому разложению некоторой части материала либо к частичной потере

химически связанной серной кислоты, что является негативным фактором при последующей технологии термовспучивания [1, 3]. Технология сушки в непрерывно вращающейся барабанной печи не отвечает указанным требованиям, поскольку при достижении требуемой средней конечной влажности всего материала часть его пересушивается или частично вспучивается.

Нами была предпринята попытка усовершенствовать технологию сушки окисленного графита, применив принципиально новый подход к проблеме: осуществить сушку окисленного графита в аппарате фонтанирующего слоя. При этом руководствовались следующими соображениями: 1) аппарат фонтанирующего слоя при его оптимальных геометрических параметрах гарантирует интенсивную циркуляцию труднооживаемых материалов (паст, чешуйчатых частиц и т.д.). К таким материалам относятся и влажный окисленный графит; 2) во время сушки в фонтанирующем слое при интенсивной циркуляции материала исключается перегрев его отдельных частиц, что нежелательно; 3) температура слоя не должна превышать предельную температуру термической устойчивости продукта (в нашем случае 150 °С).

При реализации процесса сушки в фонтанирующем слое приходится учитывать также индивидуальные гидродинамические свойства окисленного графита. Выбранный объектом наших исследований окисленный графит представляет собой смесь тонких чешуйчатых час-

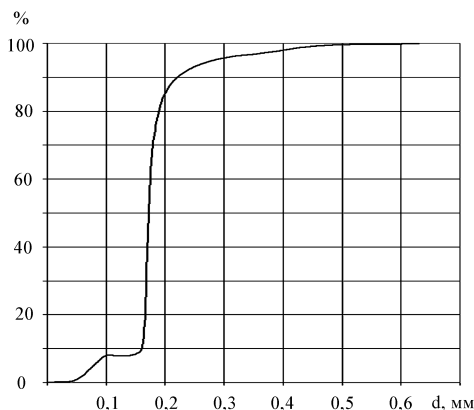


Рис.1. Интегральный график распределения дисперсного состава частиц окисленного графита.

тиц широкого фракционного состава. При этом размеры отдельной частицы вдоль кристаллических осей А и В превышают размер вдоль оси С в десятки раз. На рис.1 приведены данные по дисперсному составу частиц графита. Псевдооживление такого материала обычно сопровождается технологическими трудностями: каналобразованием, поршневым режимом, повышенным уносом и др.

Для исследования гидродинамических особенностей псевдооживления окисленного графита были проведены эксперименты на лабораторной установке, представляющей собой стеклянную трубу длиной 2 м и диаметром 50 мм с газораспределительной решеткой. График зависимости перепада давления от скорости псевдооживающего воздуха представлен на рис.2.

Опыты проводились при разных высотах слоя. При плавном повышении скорости воздуха каналобразование начиналось при скорости 0,02 м/с, псевдооживление наблюдалось в интервале скоростей 0,04–0,1 м/с. Режим уноса

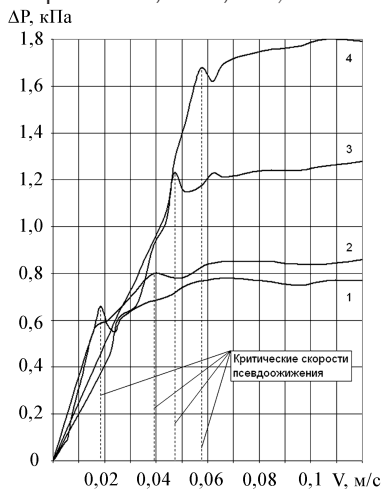


Рис.2. Псевдооживление графита при разных высотах слоя, мм: 1 – 135; 2 – 140; 3 – 200; 4 – 300.

мелких частиц с переходом в режим пневмотранспорта, сопровождающийся полным уносом, зафиксирован при скоростях 0,30–0,98 м/с. Скорости начала псевдооживления и начала уноса, рассчитанные для данных частиц по формулам Аэрова и Тодеса [4], оказались равными соответственно 0,105 и 2,94 м/с, что значительно отличается от экспериментальных значений. Указанные расхождения объясняются формой частиц, которая весьма далека от сферической. Для частиц чешуйчатой формы применение расчетной формулы вычисления эквивалентного диаметра d_3 , видимо, не вполне корректно.

Эквивалентный диаметр определяется как $d_3 = [6 m / (\pi \gamma)]^{1/3}$.

Критерии для расчета:

Рейнольдса	$Re = (W d_3) / \nu$
Рейнольдса (критический)	$Re_{кр} = Ar / (1400 + 5,22 Ar^{1/2})$
Рейнольдса (уноса)	$Re_y = Ar / (18 + 0,61 Ar^{1/2})$
Архимеда	$Ar = [(g d_3^3) / \nu^2] [(\gamma_T - \gamma_B) / \gamma_B]$

Здесь g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м}^2/\text{с}^2$; ν – кинематическая вязкость воздуха при 10 °С, $\nu = 14,25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; γ_T – плотность окисленного графита, $\gamma_T = 2000 \text{ кг}/\text{м}^3$; γ_B – плотность воздуха при 10 °С, $\gamma_B = 1,34 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Критическая скорость псевдооживления $W_{кр} = (Ar / (1400 + 5,22 Ar^{1/2})) (\nu / d_3)$.

Для определения эквивалентного диаметра частиц окисленного графита принимаем: навеска графита $M = 0,0237 \text{ г}$; количество частиц $N = 290$ шт.; масса одной частицы $m = M / N = 8,17 \cdot 10^{-8}$. Тогда $d_3 = [6 \cdot 8,17 \cdot 10^{-8} / (3,14 \cdot 2000)]^{1/3} = 0,000427$.

Для достижения оптимального режима фонтанирования сухого материала были проведены исследования в аппаратах фонтанирующего слоя с разными углами раскрытия их стенок (рис.3). Холодный воздух подавался из коллектора через беспровальные колпачки. В случае угла раскрытия 60° режим фонтанирования крайне неустойчив. При любой высоте слоя в этом случае процесс фонтанирования ограничи-

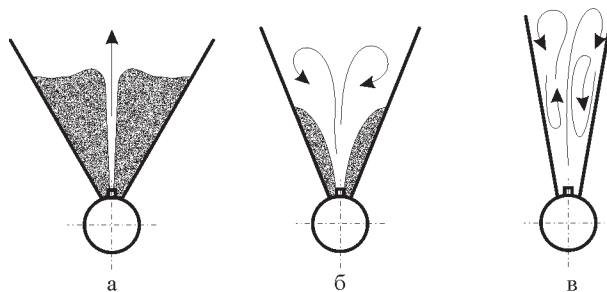


Рис.3. Режимы фонтанирования при разных углах раскрытия: а – 60°; б – 45°, в – 20°.

вается образованием свищей-каналов, через которые проходил воздух, оставляя в покое весь остальной материал. При угле раскрытия 45° наблюдалось достаточно устойчивое фонтанирование, однако вблизи стенок аппарата имелись застойные зоны с неподвижным материалом. Угол раскрытия 20° оказался оптимальным для обеспечения эффективной циркуляции материала по всему объему аппарата. Дальнейшее уменьшение угла раскрытия привело бы к уменьшению производительности аппарата вследствие уменьшения его рабочего объема.

Для проведения исследований по сушке была изготовлена горячая модель сушильного аппарата, представляющая собой продолговатый бункер с наклонными стенками (20°), геометрические параметры которого рассчитаны исходя из вышеизложенных результатов и данных гидродинамических исследований. Устройство экспериментальной сушилки и принцип ее работы показаны на рис.4.

Воздух от воздуходувки через измеритель расхода 9 и регулирующую аппаратуру 10 подается в электрический нагреватель 8. Из него через коллектор 1 подогретый воздух поступает на форсунки 7. В аппарат 3, где материал находится в режиме фонтанирования, непрерывно подают влажный материал с помощью шнекового питателя 4 из бункера-накопителя 5. Для вращения шнека питателя и ворошителя (на схеме не показан) используется привод 6. По мере высушивания материала происходит его непрерывная выгрузка с помощью выгрузочного устройства 2, которое может перемещаться для достижения требуемой высоты слоя. Учитывая термическую нестабильность материала решено было температуру теплоносителя принять равной 200°C . При начальной влажности 40 % и требуемой конечной влажности 1–3 %, количество необходимого воздуха для сушки 5 кг/ч по сухому материалу определяли по следующей формуле [3]:

$$L = [r G (U_1 - U_2) + G C_m (\theta_2 - \theta_1)] / [C_r (t_1 - t_2)],$$

где r — тепло для испарения 1 кг воды, $r = 2260$ кДж/кг; C_m , C_r — теплоемкость материала и газа (воздуха), $C_m = 1,3$; $C_r = 1,01$ кДж/(кг·град); G — производительность по сухому материалу, $G = 5$ кг/ч; U_1 , U_2 — начальная и конечная влажность материала, $U_1 = 0,4$, $U_2 = 0,03$ кг/кг; θ_1 , θ_2 — начальная и конечная температура материала; $\theta_1 = 50^\circ\text{C}$, $\theta_2 = 10^\circ\text{C}$; t_1 , t_2 — начальная и конечная температура воздуха; $t_1 = 200$, $t_2 = 70^\circ\text{C}$.

Массовый расход воздуха составил $L = [2260 \cdot 5 \cdot (0,4 - 0,03) + 5 \cdot 1,3 \cdot (50 - 10)] / [1,01 \times (200 - 70)] = 33,82$ кг/ч.

Объемный расход воздуха определяется как $L_v = 0,7996 L = 27,05$ м³/ч.

Исходя из полученного объемного расхода воздуха, необходимого для сушки, были определены размеры аппарата в соответствии с экспериментально определенными критическими скоростями и скоростями уноса. Скорости воздуха в верхней части аппарата при этом должны быть ниже скоростей уноса для частиц, составляющих основную массу материала.

Загрузка окисленного графита в аппарат сопровождалась определенными трудностями, так как материал влажностью 40 % представляет собой вязкую пастообразную массу. Стабильную загрузку материала удалось достичь благодаря специально разработанному для этого загрузочному устройству.

Загрузочное устройство представляет собой шнековый питатель с переменным шагом, обеспечивающий производительность по влажному материалу 8–10 кг/ч. Материал продавливается шнеком через перфорированный диск, благодаря которому его загрузка производится в виде небольших комков (5×10) мм, что препятствует его конгломерации в аппарате.

Бункер питателя выполнен из нержавеющей стали и представляет собой короб с гладкими вертикальными стенками для уменьшения вероятности зависания в нем материала. Однако практика показала, что материал не опускается под действием собственной силы тяжести на шнек. Поэтому в загрузочном бункере над шнеком был дополнительно установлен ворошитель. В сушилке была предусмотрена сепарационная зона высотой 500 мм для уменьшения пылеуноса. При работе аппарата на сухом материале обнаружено, что при подаче 30 м³/ч воздуха с температурой 200°C температура в слое не поднималась выше 70°C , что свидетельствует о значительной потере тепла через стенки аппарата. С целью снижения тепловых потерь коллектор и боковые стенки аппарата были теплоизолированы. В процессе подачи влажного

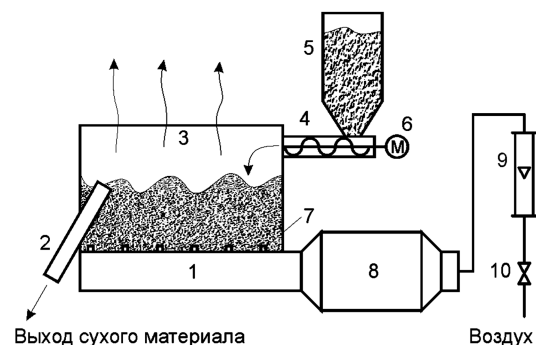


Рис.4. Схема сушильной установки фонтанирующего слоя.

материала в сушильный аппарат при том же расходе горячего воздуха наблюдалось значительное понижение температуры в слое. При изменении скорости загрузки влажного материала от 3 до 9 кг/ч температура в слое понижалась от 80 до 50 °С. При этом влажность выгружаемого материала изменялась соответственно от 0,4 до 1,8 %, что удовлетворяет техническим требованиям (максимально допустимая конечная влажность высушенного материала 3 %).

В процессе приближения к установившемуся режиму сушки наблюдалось скопление влажного материала в месте его загрузки, что приводило к прекращению фонтанирования и в конечном итоге к аварийной остановке аппарата. Для устранения этого явления было увеличено отверстие в беспровальных колпачках, находящихся в этой зоне, и тем самым увеличена там подача воздуха. Устойчивый режим работы сушилки достигнут благодаря необходимому количеству поступающего воздуха и его температуре, оптимальной производительности по загружаемому материалу, оптимальной высоте слоя.

При установившемся режиме аппарата с высотой статичного слоя 300 мм температура выгружаемого материала составляла 40 °С, а температура отходящих газов 44 °С. Удельный расход теплоносителя составил $l_{уд} = 12,71$ кг воздуха/кг влаги [3].

Тепловой КПД аппарата, характеризующий степень использования сушильного агента, рассчитывали как отношение теплоты парообразования воды и теплоты, расходуемой на нагрев воздуха, отнесенных к 1 кг испаренной влаги [3]:

$$\eta = (r/q) \cdot 100 \%,$$

где q — удельный расход тепла, $q = Q/W$, кДж/кг влаги; Q — необходимое тепло, расходуемое на нагрев воздуха, кДж/ч, $Q = L C_T (t_2 - t_1)$.

Тепловой КПД составляет 97 %, что значительно превышает показатели, достигаемые при сушке аналогичных материалов [3].

На основе вышеприведенных данных, полученных на горячей модели для одного из украинских предприятий (Завальевский графитовый комбинат), изготовлена и внедрена промышленная установка.

Выводы

Определены параметры процесса, влияющие на стабильность работы аппарата для сушки окисленного графита: начальная влажность материала, угол раскрытия форсунки, производительность по материалу и воздуху. Для обеспечения устойчивого псевдоожижения применяются специально изготовлены форсунки для подачи горячего воздуха.

Сформулированы рекомендации для изготовления аппаратов такого типа: требования к материалам, контактирующим с окисленным графитом, охране окружающей среды, технике безопасности.

На основе приведенных данных и приобретенного опыта, полученного на горячей модели для одного из украинских предприятий (Завальевский графитовый комбинат), изготовлена и внедрена промышленная установка, производительностью по сухому материалу 15 кг/ч.

Список литературы

1. Шапранов В.В., Ярошенко А.П., Кучеренко В.А., Шабловский В.А. Получение вермикулярного графита // Химия твердого топлива. — 1989. — № 1. — С. 126–130.
2. Черныш И.Г., Карпов И.И., Приходько Г.П., Шай В.М. Физико-химические свойства графита и его соединений. — Киев : Наук. думка, 1990. — 200 с.
3. Романков П.Г., Рашковская Н.Б. Сушка во взвешенном состоянии. — Л. : Химия, 1968. — 357 с.
4. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. — М. : Химия, 1968. — 512 с.

Поступила в редакцию 11.02.11

The Features of Oxidized Graphite Drying in Gushing Bed

Stratynov E.V., Kozhan A.P, Moskalik L.D., Ryabchuk V.S.

The Gas Institute of NASU, Kiev

The results of researches of oxidized graphite powder drying in gushing layer unit of spouted bed are presented. The hydrodynamic and thermal features of continuous process of drying are investigated by cold and hot models. The main design solutions and geometrical parameters for oxidized graphite apparatus dehumidification are described.

Key words: thermal expanded graphite, oxidized graphite, fluidized bed, fluidization, gushing bed.

Received February 11, 2011