

## **ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ОБОЖЖЕННОГО МАТЕРИАЛА В КАМЕРЕ ТОМЛЕНИЯ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ДВУХСТАДИЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ ГИПСА**

*У статті наведені основні принципи створення обладнання для реалізації двостадійної технології теплової обробки гіпсового в'язучого. На першій стадії проводиться випал подрібненого гіпсового каменя в турбулентному двофазному потоці. На другій стадії теплообробки проводиться вирівнювання температури часток гіпсу в камері томління для отримання  $\alpha$ -напівгідрата сульфату кальцію. Особлива увага присвячена руху часток матеріалу в циліндричній та розвантажувальній частині камери томління. Знайдені умови вільного та рівномірного виток матеріалу по всьому перерізу камери, що забезпечує його рух близький до моделі ідеального витиснення.*

*Ключові слова: теплова обробка, гіпс, камера томління, реактор-конус.*

*В статье приведены основные принципы создания оборудования для реализации двухстадийной технологии тепловой обработки гипсового вяжущего. На первой стадии проводится выпал размельченного гипсового камня в турбулентном двухфазном потоке. На второй стадии теплообработки проводится выравнивание температуры частиц гипса в камере томления для получения  $\alpha$ -полугидрата сульфата кальция. Особенное внимание уделяется движению частиц материала в цилиндрической и разгрузочной части камеры томления. Найдены условия свободного и равномерного вытока материала по всему сечению камеры, что обеспечивает его движение близкое к модели идеального вытеснения.*

*Ключевые слова: тепловая обработка, гипс, камера томления, реактор-конус.*

*The basic principles of development of the equipment for realisation of two-stage technology of thermal treatment of the gypsum bonding material are given in the article. Calcination of the crushed gypsum stones in the turbulent two-phase flow at the first stage is carried out. The temperature equalization of the gypsum particles in soaking chamber for reception of  $\alpha$ -semihydrate of calcium sulfate is carried out during the second stage of thermal treatment. Special consideration is given to the material particles movement in the cylindrical and unloading part of the soaking chamber. Conditions of free and*

*uniform outflow of material throughout all section of the chamber providing its movement close to the model of ideal displacement are found.*

*Key words: thermal treatment, gypsum, soaking chamber, reactor-cone.*

**Постановка проблемы.** Из всех видов гипсовых вяжущих материалов наибольший интерес вызывает  $\alpha$ -форма строительного гипса, так как он при достаточно высокой прочности относится к наименее энергозатратным видам вяжущих.

Получение  $\alpha$ -полуводного гипса при обжиге гипса в потоке газообразного теплоносителя возможно за счет создания необходимого давления в обжиговом аппарате. Давление, при котором температура кипения воды будет выше температуры дегидратации двуводного гипса, создаст условия для образования  $\alpha$ -полуводного гипса, т.к. при этом вода выделяется в капельножидком состоянии.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Авторами разработана установка для реализации двухстадийной технологии тепловой обработки гипса в потоке газообразного теплоносителя с реактором-конусом и камерой томления [1].

Отличием разработанной установки от существующих [2] (и труба-сушилка фирмы «Бабкок – БШХ»)[3], в которых гипс обжигают горячими газами в цилиндрической трубе, является конструкция обжигового реактора и наличие второго реактора – камеры томления.

Обжиг в реакторе цилиндрической формы приводит к неравномерному распределению тепла в сырье из-за большого различия скоростей движения теплоносителя по поперечному сечению. При попадании частицы на стенку трубы или разрушении вихря на ней, материал «проваливается» на дно реактора, что приводит к получению многофазового материала, причем  $\alpha$ -гипса практически не наблюдается.

**Формулирование целей статьи.** За счет конусообразной конструкции обжигового реактора удастся предотвратить «провал» материала, повысить давление в реакторе и обеспечить более равномерную тепловую обработку гипса.

**Основные результаты.** Необходимость второго реактора – камеры томления, вызвана тем, что при любом нагревании (кроме печей СВЧ) всегда создается температурный градиент. В частности, при обжиге частиц гипса наблюдается неравномерное распределение температур по их глубине, в результате чего образуется многофазная структура:

- наружный слой состоящий из растворимого ангидрита;
- промежуточный слой – полуводный гипс;
- центральная часть – двуводный гипс.

Причем, соотношение объемов наружного слоя и центральной части должно быть таково, что после выравнивания температур частица должна состоять из монофазы – полуводного гипса.

Разработана математическая модель выравнивания температурного поля в частице гипса при ее пребывании в камере томления как суперпозиция трех задач:

- продолжающийся нагрев и дегидратация шаровидной зоны в центре частицы для двуводного гипса (с переходом его в полуводный);
- остывание наружного слоя безводного гипса (ангидрита) и насыщения его молекулами воды с образованием полуводного гипса;
- остывание слоя полуводного гипса.

Задачи решаются на базе краевой задачи в сферических координатах об остывании шара радиуса  $r_0$ .

Начальная температура шара равна:

$$u|_{t=0} = f(r, \theta, \varphi), \quad 0 \leq r < r_0, \quad 0 \leq \theta \leq \pi, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi.$$

Решение краевой задачи в общем виде:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial u}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} \right), \quad (1)$$

$$\left[ \frac{\partial u}{\partial r} + hu \right]_{r=r_0} = t_0,$$

$$u|_{t=0} = f(r, \theta, \varphi).$$

Является:

$$u(r, \theta, \varphi, t) = \sum_{m,n=0}^{+\infty} \sum_{k=0}^n e^{-\left(\frac{a\mu_m^{(n)}}{r_0}\right)^2 t} \frac{J_{n+\frac{1}{2}}\left(\frac{\mu_m^{(n)} r}{r_0}\right)}{\sqrt{r}} P_{n,k}(\cos \theta) \{A_{m,n,k} \cos k\varphi + B_{m,n,k} \sin k\varphi\},$$

где  $\mu_m^{(n)}$  – положительные корни уравнения

$$\mu_m^{(n)} J_{n+\frac{1}{2}}(\mu_m^{(n)}) + \left(r_0 h - \frac{1}{2}\right) J_{n+\frac{1}{2}}(\mu_m^{(n)}) = 0,$$

$$A_{m,n,k} = \frac{\int_0^{r_0} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} f(r, \theta, \varphi) r^{\frac{3}{2}} J_{n+\frac{1}{2}}\left(\frac{\mu_m^{(n)} r}{r_0}\right) \sin \theta P_{n,k}(\cos \theta) \cos k\varphi dr d\theta d\varphi}{\varepsilon_k \frac{\pi r_0^2 (n+k)!}{(2n+1)(n-k)!} \left[ 1 + \frac{(r_0 h + n)(r_0 h - n - 1)}{(\mu_m^{(n)})^2} \right] J_{n+\frac{1}{2}}^2(\mu_m^{(n)})},$$

$$\varepsilon_k = \begin{cases} 2 & \text{при } k=0 \\ 1 & \text{при } k \neq 0 \end{cases},$$

$$B_{m,n,k} = \frac{\int_0^{r_0} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} f(r, \theta, \varphi) r^{\frac{3}{2}} J_{n+\frac{1}{2}}\left(\frac{\mu_m^{(n)} r}{r_0}\right) \sin \theta P_{n,k}(\cos \theta) \sin k\varphi dr d\theta d\varphi}{\frac{\pi r_0^2 (n+k)!}{(2n+1)(n-k)!} \left[ 1 + \frac{(r_0 h + n)(r_0 h - n - 1)}{(\mu_m^{(n)})^2} \right] J_{n+\frac{1}{2}}^2(\mu_m^{(n)})},$$

где  $J_{n+\frac{1}{2}}\left(\frac{\mu_m^{(n)}r}{r_0}\right)$  – функции Бесселя,

$P_{n,k}(\cos\theta)$  – присоединенные функции полиномов Лежандра.

Камера томления должна обеспечить выравнивание температурного поля в частицах, т.е. нахождение частицы заданное время при соответствующих температурных режимах. Необходимо обеспечить равномерное движение материала в камере томления, для чего требуется исключить воронкообразование, т.е. необходима конструкция камеры томления, максимально приближенная к модели идеального вытеснения.

Многочисленные исследования подтверждают, что характер истечения различных материалов разнообразен и находится в зависимости от целого ряда причин. Движение частиц носит характер сложной структурной деформации. Ряд исследователей развивают гипотезу саморазгружающегося свода. Сущность гипотезы состоит в том, что при истечении сыпучих материалов из емкостей над отверстием, расположенным в дне сосуда, образуется своеобразная структура – мгновенно разрушающийся динамический свод.

Проходя через динамический свод, частицы материала выпадают в отверстие в соответствии с законом свободного падения твердых тел. Согласно этой теории скорость истечения зависит от высоты свода (пропорционального диаметру отверстия) и не зависит от высоты столба сыпучего материала в емкости. Таким образом, основными параметрами уравнения расхода являются размер и форма выпускного отверстия.

Для создания режима близкого к идеальному вытеснению материала принимаем конструкцию камеры томления в виде цилиндра и разгрузочной частью. Разгрузочная часть обеспечивает истечение материала по гидравлической форме, т. е. в цилиндрической части бункера материал движется равномерно как сплошное тело.

Итак, конструкция камеры томления должна обеспечивать равномерное распределение температуры по всему объему частицы, то есть частицы должны находиться в равных условиях, для этого истечение обязано быть равномерным по всему объему емкости, необходимо избежать явление сегрегации, налипания частиц, сводообразования.

Сводообразование в мелкофракционных связных материалах еще не изучено в полной мере. Сводообразование во многом зависит от формы и размера выпускного отверстия. Образование статического свода в связных мелкофракционных материалах можно объяснить тем, что по линии свода возникают напряжения сжатия (с конечным значением  $\sigma_n$ ) в направлении касательной к линии свода, в то время как в направлении нормали к линии свода напряжения равны нулю.

Для образования статического свода необходимо, чтобы вертикальная касательная сила, действующая по периметру выпускного отверстия, могла выдержать массу материала над отверстием.

Очертания свода обычно совпадают с траекториями главных наибольших напряжений. Напряжение сжатия  $\sigma_n$  достигает максимального значения у основания свода. Напряжение тем выше, чем больше выпускное отверстие. Максимально допустимая величина этого напряжения  $\sigma_{max}$ , отвечающая равновесному состоянию данного материала, определяется кругом напряжений, касательным одновременно оси  $\tau$  и линии предельных касательных напряжений. Такое напряженное состояние может возникать только при определенном размере выпускного отверстия (сводообразующего). Если размер выпускного отверстия превышает размеры сводообразующего, напряжение сжатия превысит величину  $\sigma_{max}$ . При этом в материале произойдут пластические деформации, равновесие свода нарушится и начнется беспрепятственное истечение материала. Основными параметрами, характеризующими статический свод, является форма кривой свода, максимальная высота и предельное сводообразующее отверстие.

На рис. 1 показана схема образования свода над круглым отверстием. Выделим элементарный объем  $abba$  в толще сыпучей массы, образующей свод, при помощи вертикальной цилиндрической поверхности с образующей  $ab$  и поверхностями главных напряжений  $aa$  и  $bb$ .

Определим вес выделенного элемента:  $G = \frac{\pi d^2}{4} \Delta h \gamma$ ,

где  $\gamma$  – удельный вес материала ( $\text{Н/м}^3$ ).

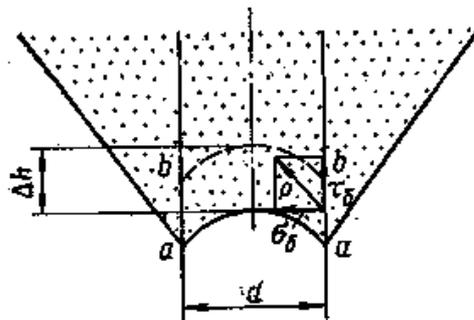


Рисунок 1 – Схема образования свода над круглым отверстием

Условие равновесия выражается зависимостью:

$$G = \tau_{\sigma} \pi d \Delta h. \quad (2)$$

Приравняв правые части обоих равенств, получим:

$$d = \frac{4\tau_{\sigma}}{\gamma}.$$

Подставив предельное значение  $\tau_{\sigma}$ , получим необходимый диаметр отверстия, выраженный через параметры сыпучего материала:

$$d = \frac{4\tau_0(1 + \sin \varphi)}{\gamma}. \quad (3)$$

### **Выводы и перспективы дальнейших исследований.**

Разработанная математическая модель выравнивания температурного поля в частице гипса позволяет определить необходимое время пребывания ее в камере томления.

Найдены условия свободного и равномерного истечения материала по всему поперечному сечению камеры, которые обеспечивают движение материала близкое к модели идеального вытеснения.

Определены диаметры отверстий, предотвращающих образование свода над круглыми отверстиями в днище камеры томления.

### *ЛИТЕРАТУРА*

1. Пат. № 31289, Україна. Спосіб випалу гіпсу у завислому стані при підвищеному тиску / О.В. Кондращенко, В.І. Бабушкін, А.М. Баранов, А.А. Баранова. – Опубл. 10.04.08р., Бюл. № 7.

2. Деклараційний патент № 49134 А, Україна. Установка для виробництва гіпсу / М.С. Болотських, В.І. Бабушкін, В.І. Вінниченко, О.В. Кондращенко, А.А. Мамедав. – Опубл. 16.09.02р., Бюл. № 9.

3. Ферронская А.В. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение): справочник / А.В. Ферронская. – М., 2004. – 485 с.