

ИНДУКЦИОННАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СЫПУЧИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Е. Д. ЗАЙЦЕВ, А. И. СЛОСМАН, В. В. ХАРЧЕНКО

Известны трудности термической обработки мелкодисперсных и слипающихся материалов. Одним из способов обработки подобных веществ является их обработка в кипящем слое инертных частиц [1]. Однако для высокотемпературной обработки веществ, требующих особой чистоты, сбора продуктов разложения или очистки псевдоожигающего агента, он является малоэффективным.

Для термической обработки мелкодисперсных и слипающихся веществ возможно применение высокочастотного электрического поля. В случае обработки сыпучих веществ в электрическом поле высокочастотного конденсатора происходит непрерывное выделение тепла в объеме диэлектрика, вызванное токами проводимости и диэлектрическими потерями. Однако интенсивность нагрева и сушки при воздействии электрического поля на диэлектрик низка, если малы диэлектрические потери и слабы токи проводимости. Коэффициент полезного действия установок для нагрева диэлектриков токами высокой частоты не превышает 40—50 процентов [2]. Установки капризны в эксплуатации, затрудняют радиосвязь, требуют хорошей вентиляции конденсатора в случае сушки веществ с большой влажностью.

Романовский С. Г. применил индукционную сушку древесины токами промышленной частоты, которая оказалась в данном случае эффективной [3].

Нами исследовались нагрев и сушка сыпучих диэлектриков индукционным способом. Применение индукционного способа стало возможным в результате введения металлических частиц в обрабатываемый материал. Вводимые в сыпучий диэлектрик инертные металлические частицы являются постоянно действующими источниками тепла, равномерно распределенными в плотном слое материала. Тепло выделяется в инертных металлических частицах в результате наведения в них электромагнитным полем индуктора вихревых токов.

Процесс термообработки по данному способу может вестись непрерывно, время пребывания материала в зоне обработки легко регулируется; достигается большая производительность при малых размерах аппарата, однородная температурная обработка материала, возможность сушить мелкодисперсные материалы без пылеуноса и материалы с большой влажностью.

Интенсификация процесса термической обработки сыпучих диэлектриков происходит в результате большого тепловыделения в металличе-

ских частицах, тесного контакта с ними обрабатываемого материала, развитой поверхности теплообмена.

Кроме того, интенсивное нагревание окружающего частицы влажного материала приводит к потокам газа в слое, которые взрыхляют и перемешивают мелкодисперсный сыпучий диэлектрик.

Если использовать металлические частицы, у которых магнитная проницаемость $\mu \gg 1$, то они приходят в движение в результате взаимодействия частиц с электромагнитным полем индуктора, в результате чего смесь перемешивается и тем самым достигается равномерная термическая обработка.

Следует отметить, что на перенос влаги действует термодинамическая сила, представляемая произведением градиента индукции магнитного поля ∇B на вектор поляризации π_m [4].

I. Опыты на частоте 2500 гц

Установка состоит из генератора ПВ 50—2500, приборов измерения и управления, индуктора диаметром 180 мм, изготовленного из медной трубки диаметром 14 мм, имеющего 18 витков, и кварцевого аппарата, представляющего собой усеченный конус (большой диаметр — 130 мм, меньший диаметр — 100 мм, высота — 250 мм). Обрабатываемый материал смешивается с металлическими частицами (шары из стали ШХ15 диаметром 3,15 мм и 7,93 мм). Концентрация металлических частиц менялась от $1/3$ до $2/3$ по весу в пересчете на сухую смесь. Мощность, потребляемая в индукторе, менялась в опытах от 0,5 до 6 кВт.

В аппарат загружался 1 кг смеси с различной концентрацией шаров и различной влажностью материала и аппарат помещался в индуктор. Для исследования кинетики нагрева и сушки использовались типичные диэлектрики: корунд белый и кварцевый песок, гранулометрический состав которых приводится в табл. 1.

Таблица 1

Материал	-0,05	+0,05 -0,08	+0,08 -0,125	+0,125 -0,25	+0,25 -0,4	+0,4 -0,63
Кварцевый песок	0,026	0,54	8,8	78,3	6,7	5,6
Корунд белый	88,1	10,3	1,2	0,4	—	—

Изучение прогревания металлических шариков диаметром 3,15 мм показало, что слой высотой 100 мм прогревается относительно равномерно, наибольшее изменение температуры наблюдалось вдоль сосуда и составляет $\pm 50^\circ\text{C}$ при средней температуре шаров 700°C . Максимальные колебания температуры в поперечном сечении в середине аппарата составляют $\pm 26^\circ\text{C}$. Неравномерность нагрева может быть объяснена конвективным теплообменом на поверхности аппарата. Прогрев сухого и влажного сыпучего диэлектрика (корунда и кварцевого песка) не происходит без добавки металлических частиц.

Наибольшая разность температур по объему при нагревании смеси корунда и шаров диаметром 3,15 мм (при концентрации $1/2$ по весу) составляет $\pm 25^\circ\text{C}$ при средней температуре смеси 500°C , а 1 кг смеси прогревается в течение 10 минут до указанной выше температуры при мощности, потребляемой в индукторе 4 кВт.

Визуально наблюдалось движение шаров в аппарате, которые как бы медленно кипят (шевелиются), приподнимаются над дном аппарата

после подачи энергии от высокочастотного генератора на индуктор, после прекращения подачи энергии шары падают и лежат ровным слоем неподвижно, по достижении температуры 700°C шары перестают двигаться в поле индуктора и устанавливаются в цепочки вдоль линий силового поля.

Смесь шаров и сухого корунда также находится в движении и перемешивается.

При сушке смеси диэлектрика и шаров наблюдается вначале медленное перемешивание (прогрев до $95\text{--}99^{\circ}\text{C}$), а далее интенсивное перемешивание, которое продолжается до конца сушки.

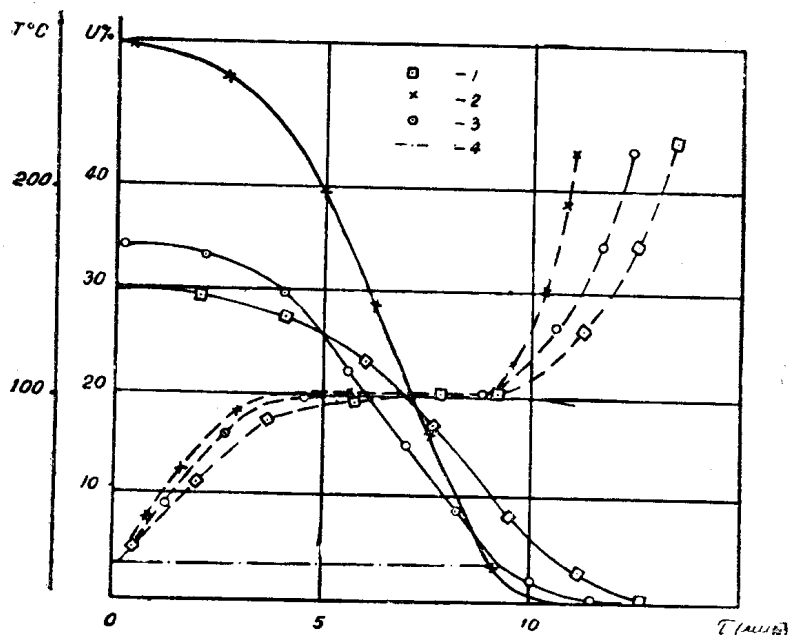


Рис. 1. Кривые сушки и температуры для корунда (сплошные линии кривые сушки, штриховые — температурные кривые): 1 — мощность, потребляемая в индукторе 3 кВт, концентрация металлических частиц 50 процентов, диаметр металлических частиц 3,15 мм; 2 — мощность — 3 кВт, концентрация — 70 процентов, диаметр — 3,15 мм; 3 — мощность — 1 кВт, концентрация — 70 процентов, диаметр — 3,15 мм; 4 — нагрев без добавки металлических частиц

Далее изучалась кинетика сушки путем отбора проб высушиваемого материала через минуту с последующей сушкой их в сушильном шкафу при температуре 250°C до постоянного веса.

В момент сушки замерялась температура термопарой хромель-копель, эдс от которой фиксировалась потенциометром типа ПП-63. (Опыты показали, что термопара хромель-копель не прогревается в поле индуктора, питаемого током частотой 2500 герц).

На рис. 1, 2, 3 показаны кривые температуры и сушки кварцевого песка и корунда без добавки и с добавкой металлических частиц. Прогрев и сушка корунда происходят быстрее, что связано, очевидно, с тем, что частицы корунда намного меньше, чем песка, поэтому они лучше перемешиваются токами газа и металлическими частицами.

Из рисунков видно, что оптимальной является для данных опытов концентрация металлических частиц $1/2$ по весу в пересчете на сухую смесь.

Повышение мощности, потребляемой индуктором, уменьшает время прогрева, так что оптимальными энергетическими характеристиками

работы индукционной сушилки будут номинальные для данного высоко-
частотного генератора.

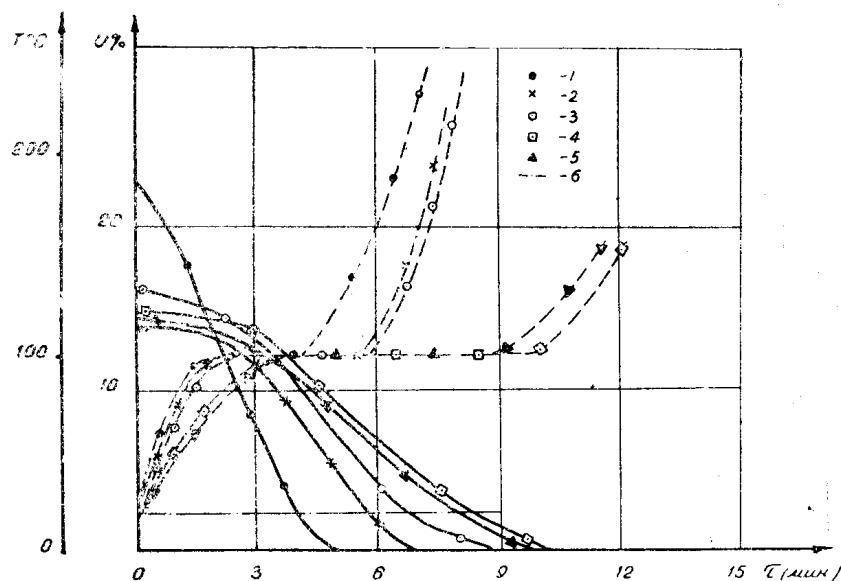


Рис. 2. Кривые сушки и температуры для кварцевого песка (сплошные линии кривые сушки, штриховые — температурные кривые): 1 — мощность, потребляемая в индукторе 3 кВт, концентрация металлических частиц 70 процентов; 2 — мощность — 2 кВт, концентрация — 70 процентов; 3 — мощность — 4 кВт, концентрация — 50 процентов; 4 — мощность — 2 кВт, концентрация — 50 процентов; 5 — мощность — 4 кВт, концентрация — 50 процентов; 6 — нагрев без добавки металлических частиц; кривые 1—4 — диаметр металлических частиц 3,15 мм; кривая 5 — диаметр металлических частиц 7,93 мм

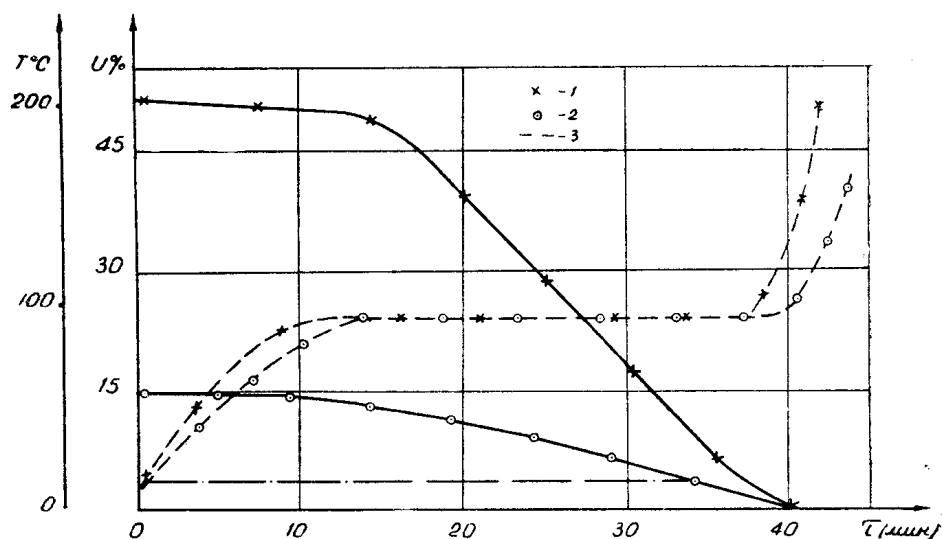


Рис. 3. Кривые сушки и температуры (сплошные линии кривые сушки, штриховые — температурные кривые): 1 — корунд, 50 процентов металлических частиц, мощность, потребляемая в индукторе 0,5 кВт; 2 — песок, 30 процентов металлических частиц, мощность 3 кВт; 3 — нагрев корунда и песка без добавки металлических частиц

Повышение диаметра частиц (который должен будет выбираться из условий оптимального тепловыделения и максимальной поверхности теплообмена металлических частиц) с 3,15 мм до 7,93 мм (кривая 5,

рис. 2) не уменьшает тепловыделения, но ухудшается равномерность прогрева и сушки материала в силу прекращения перемешивания и уменьшения поверхности теплообмена.

II. Опыты на частоте 200000 гц

Установка состоит из лампового генератора АЗ-43, приборов управления и контроля, индуктора диаметром 65 мм, состоящего из 4-х витков, изготовленных из трубки 6 мм и фарфорового тигля диаметром 60 мм, в который загружался кварцевый песок, размеры последнего приведены в табл. 1, в смеси с шарами из стали ШХ15 диаметрами 3,15 мм и 2 мм. Концентрация металлических частиц в обеих сериях опытов $1/2$ в пересчете на сухую смесь. Вес смеси, загружаемой в тигель, 200 г. Температура смеси измерялась термопарой ХК, которая помещалась в тигель после прекращения подачи тока на индуктор.

Результаты опытов сведены в табл. 2.

Таблица 2

Начальная вла. (абсолютная) в проц.	Вес смеси, г	Время сушки, сек	Температура смеси через 50 сек	Мощность, потребля- емая в ин- дукторе, квт	Концен- трация частиц	Диаметр частиц, мм	Конечная влажн. (абсолютная), %
10	200	30	380	2	$1/2$	3,15	0
10	200	30	380	2	$1/2$	3,15	0
10	200	30	470	2	$1/2$	2,0	0
10	200	25	410	2	$1/2$	2,0	0
10	200	300	80	2	—	—	9,2

Таким образом, опыты показали, что в случае термической обработки сыпучих диэлектрических материалов, особенно мелкодисперсных и слипающихся, применение индукционного нагрева может быть перспективным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. С. Аксельрод, Г. Б. Пантер. О рабочем режиме аппарата для сушки и прокаливания гидроокиси железа в псевдоожиженном слое инертного материала. «Химическое и нефтехимическое машиностроение», 1968, № 4, стр. 14.
2. А. В. Нетушил и др. Высокочастотный нагрев в электрическом поле. М., 1961.
3. С. Г. Романовский. Индукционная сушка токами промышленной частоты. Киев. Гостехиздат УССР, 1963.
4. А. В. Лыков. Теория сушки. Изд. «Энергия», 1968, стр. 531—534.