2. *Севостьянов, Б.А.* Курс теории вероятности и математической статистики / Б.А. Севостьянов. – М.; Ижевск, 2004.

3. *Юдин, Д.Б.* Линейное программирование (теория, методы и приложения) / Е.Г. Гольштейн, Д.Б. Юдин. – М., 1969.

УДК 536.2

К.В. Кутовой, Ю.Р. Осипов

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТЕПЛО - И МАССООБМЕНА В ПРОЦЕССЕ КОМБИНИРОВАННОЙ СУШКИ

В статье приводится описание методики проведенного экспериментального исследования процесса сушки дисперсного материала комбинированным СВЧ-конвекционным методом. Также указаны основные экспериментальные зависимости конечного влагосодержания высушиваемого материала от расхода и температуры ожижающего агента и от плотности потока электромагнитной энергии.

Теплоомен, массообмен, сушка, дисперсный, СВЧ, псевдоожижение.

The article describes the methodology of experimental study of the drying process of dispersed material using the combined microwave-convection method. The main experimental dependence of the final moisture content of dried material from the flow and temperature of the fluidizing agent and the flux density of electromagnetic energy is specified in the paper.

Heat transfer, mass transfer, drying, dispersed, microwave, fluidization.

В химической промышленности сушка наряду с выпариванием и обжигом, как правило, определяет технико-экономические показатели всего производства в целом, что связано со значительными затратами тепловой энергии для проведения данных процессов. Для сушки дисперсных материалов успешно используются сушилки с псевдоожиженным слоем, неоспоримым преимуществом которых по сравнению с другими сушилками является развитая поверхность контакта между частицами и сушильным агентом и интенсивное испарение влаги из материала [5, с. 56]. Наблюдаемая при этом значительная неравномерность сушки обусловленная тем, что при интенсивном перемешивании в слое время пребывания отдельных частиц существенно отличается от его средней величины. Это может быть устранено путем применения тепловой энергии, выделяемой в высушиваемом материале при поглощении электромагнитных полей сверхвысокой частоты (СВЧ) [1, с. 103]. Создание и внедрение в промышленное производство аппаратов такой конструкции, позволяющих повысить эффективность процесса сушки и снизить удельные затраты тепловой энергии на единицу выпускаемой продукции, является актуальной задачей.

С этой целью была разработана конструкция комбинированного аппарата для сушки дисперсного материала [4, с. 244]. Опыты проводились на экспериментальной лабораторной установке с регулируемой мощностью от 0 до 50 кВт [4, с. 76]. Исследуемый материал: древесные опилки хвойных пород (сосна, ель) с размером основной фракции от 2 до 5 мм, что составляет около 63 % от общей массы производимых в деревоперерабатывающей промышленности древесных опилок. Эквивалентный диаметр равен 3,16 мм. Испытуемый образец представляет собой паковку исследуемого материала размерами 400 мм х 400 мм и толщиной от 10 до 50 мм. Начальная влажность испытуемого образца от 90 до 110 % – свежесрубленная древесина [2, с. 216]. Параметры ожижающего агента (воздуха): расход – от 0,1 до 0,5 $м^3/с$, температура – от 40 до 80 °С. Параметры электромагнитного поля: частота – 2,47 ГГц, средняя плотность потока – от 15 до 64 $кВт/м^2$.

В процессе сушки необходимо знать мощность СВЧ поля или напряженность. Мощность электромагнитного поля, генерируемая магнетроном, регулируется на пульте управления силой тока. Мощность СВЧ поля в зависимости от тока магнетрона определялась по разности температур воды на входе и выходе из оконечной нагрузки. Температура в образцах измерялась с помощью хромелькопелевых термопар и автоматических электронных потенциометров КСУ-2. Температура на поверхности образца измерялась с помощью инфракрасного пирометра. Для определения влажности образцов использовали лабораторные весы и электровлагометр.

В процессе сушки в волноводной камере образец помещался в центр волновода, где напряженность поля имеет максимум. Включалась подача нагретого воздуха и СВЧ энергии. Через каждые 3 мин отключали подачу СВЧ энергии и определяли температуру на поверхности, внутри образца и вес образца. Процесс сушки продолжался до достижения влажности 8 – 10 %. После термообработки образцы помещали в сушильный шкаф для достижения ими абсолютно сухого состояния. Через 30 с записывали разность температур в оконечной нагрузке для определения проходящей энергии.

На рис. 1 – 3 приведены экспериментально найденные зависимости изменения конечного значения влагосодержания древесных опилок от расхода, температуры сушильного агента и от средних плотностей потока СВЧ излучения.

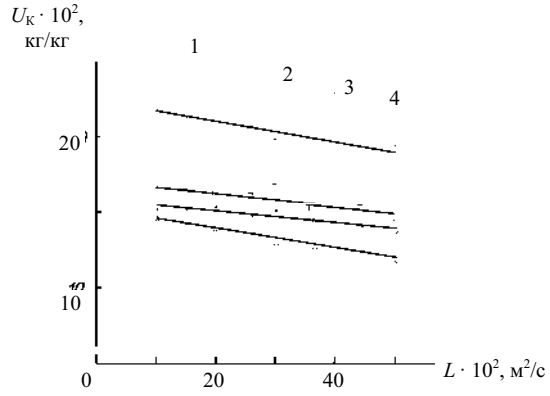

Рис. 1. Зависимости изменения конечного влагосодержания древесных опилок от расхода сушильного агента на входе в сушилку при температуре ожижающего агента $t_Г$ = 70 °С, р, кВт/м^2: 1 – 15, 2 – 29, 3 – 46, 4 – 64

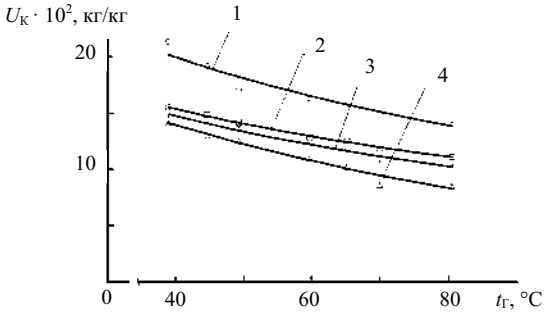

Рис. 2. Зависимости изменения конечного влагосодержания древесных опилок от температуры сушильного агента на входе в сушильную камеру при величине расхода ожижающего агента L = 0,07 м^3/с, p, кВт/м^2: 1 – 15, 2 – 29, 3 – 46, 4 – 64

Как видно из рис. 1 – 2, зависимости конечного влагосодержания древесных опилок от расхода и от температуры сушильного агента очень похожи между собой. Из данных зависимостей следует, что при увеличении плотности потока электромагнитного поля до 30 кВт/м^2 наблюдается значительная интенсификация процесса сушки дисперсного материала. Дальнейшее увеличение плотности потока СВЧ оказывает меньшее влияние на интенсификацию процесса сушки, и в последствии становится нецелесообразным с экономической точки зрения.

Линейный характер зависимости конечного влагосодержания от расхода ожижающего агента, изображенной на рис. 1, объясняется тем, что изменение расхода осуществлялось в диапазоне от величины, соответствующей началу процесса псевдоожижения, до начала витания частиц высушиваемого материала, «кипения». Таким образом, величина расхода в проведенных исследованиях влияла только на отвод отработанного влажного воздуха из слоя материала.

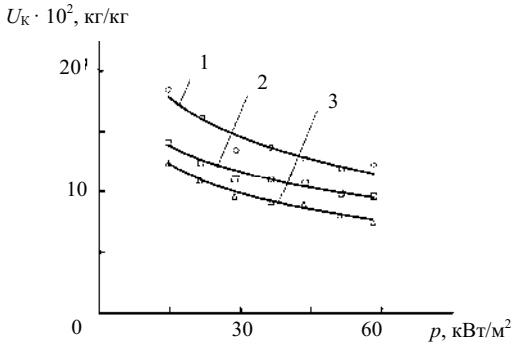

Рис. 3. Зависимости изменения конечного влагосодержания древесных опилок от средних плотностей потока СВЧ излучения при величине расхода ожижающего агента L = 0,07 м^3/с, $t_Г$, °С: 1 – 40, 2 – 60, 3 – 80

Из рис. 3 видно, что при температуре ожижающего агента $t_Г$ = 40 °С имеется более резкая зависимость конечного влагосодержания от средней плотности потока, по сравнению с более высокими температурами. Это можно объяснить большой разницей температуры внутри частицы и на ее поверхности. При повышении температуры ожижающего агента происходит выравнивание температурных полей внутри частиц, и графики становятся более пологими.

Анализ данных кривых показывает, что с увеличением расхода ожижающего агента, его температуры и плотности потока электромагнитного излучения, конечная влажность высушиваемого материала уменьшается. Но, ввиду нелинейности указаных зависимостей, необходимо определить пороговые значения параметров сушки для каждого вида дисперсных материалов, при которых процесс сушки является экономически целесообразным.

Литература

1. *Диденко, А.Н.* СВЧ-энергетика: Теория и практика / А.Н. Диденко. – М., 2003.

2. *Кречетов, И.В.* Сушка древесины / И.В. Кречетов. – М., 1980.

3. *Кутовой, К.В.* Решение проблемы энергосбережения при сушке сыпучего диэлектрического материала с использованием СВЧ-полей / К.В. Кутовой, Ю.Р. Осипов, С.М. Щекин // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Материалы четвертой международной научно-технической конференции. – Вологда, 2008. – Т. 1. – С. 244 – 246.

4. *Кутовой, К.В.* Технологические проблемы повышения эффективности тепломассобменных процессов при термообработке дисперсного материала / К.В. Кутовой, С.Ю. Осипов, Ю.Р. Осипов // Вестник ЧГУ. – Череповец. – 2010. – № 4 (27). – С. 76 – 78.

5. *Муштаев, В.И.* Сушка дисперсных материалов / В.И. Муштаев, В.М. Ульянов. – М., 1988.