

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ  
ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ СУШКИ МАТЕРИАЛА В  
КОНВЕКТИВНОЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ» ПО КУРСУ  
«ТЕОРИЯ СУШКИ И СУШИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ»**

**для студентов специальности 7.0905.10 «Теплоэнергетика»**

**Утверждено  
редакционно-издательским  
советом университета,  
протокол № 2 от 05.04.2001**

**Харьков НТУ «ХПИ» 2001**

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи «Експериментальні дослідження кінетики сушки матеріалу у конвективній сушарці» за курсом «Теорія сушки та сушильні установки» для студентів спеціальності 7.0905.10 «Теплоенергетика» /Уклад. О.Р. Пересьолков. – Харків: НТУ«ХП», 2000. – 16 с. – Рос. мовою

Укладач О.Р. Пересьолков

Рецензент

Кафедра теплотехніки

## 1. Цель работы

Углубление знаний по курсу «Сушильные установки», получение практических навыков проведения теплотехнического эксперимента и обработки опытных данных.

## 2. Задание

1. Экспериментально определить, как в процессе сушки изменяются масса влажного материала, и значения температуры материала и сушильного агента.

2. На основании опытных данных определить изменение во времени следующих параметров, характеризующих процесс сушки: влажности материала  $\omega_c$ , скорости сушки  $V$ , коэффициента полезного действия сушильной установки  $\eta$ , температуры сушильного агента  $t_2$  и материала  $\theta$ .

3. Представить в виде графиков изменение во времени следующих параметров, которые характеризуют кинетику сушки материала:  $\omega_c$ ,  $V$ ,  $\eta$ ,  $t_2$ ,  $\theta$

## 3. Описание лабораторной установки

Экспериментальная установка – это конвективная сушилка, в конструкции которой предусмотрена возможность периодически изменять массу высушиваемого материала и значение температуры материала и сушильного агента. Схема установки представлена на рис.1.

Сушильным агентом является воздух, нагреваемый в электрическом калорифере. Движение воздуха через сушилку осуществляется

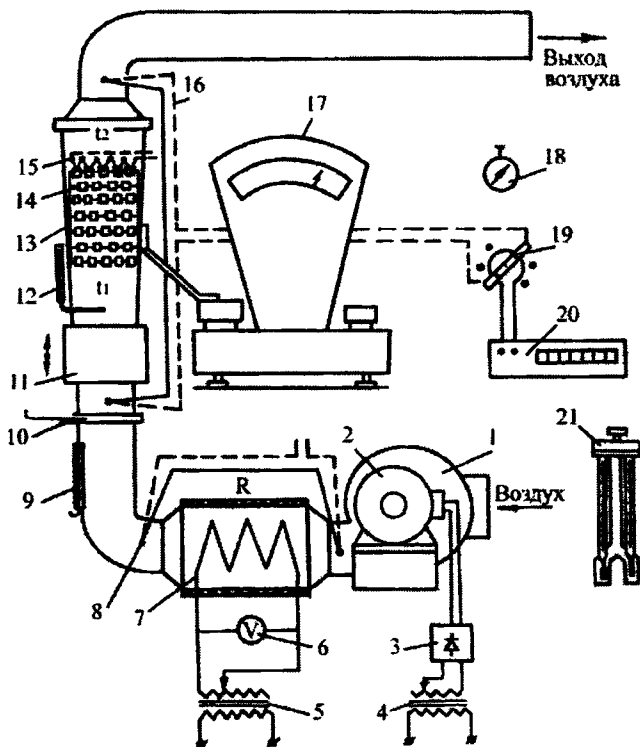


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки:

1 – вентилятор; 2 – электродвигатель; 3 – выпрямитель; 4, 5 – трансформаторы; 6 – вольтметр; 7 – электрический воздухоподогреватель; 8 – дифференциальная термопара; 9, 10 – задвижки; 11 – уплотнительная гайка; 12 – термометр; 13 – сушильная камера; 14 – кусочки войлока; 15, 16 – дифференциальные термопары; 17 – весы; 18 – секундомер; 19 – переключатель термопар; 20 – милливольтметр; 21 – психрометр

центробежным вентилятором. Режимные условия опыта задаются расходом сушильного агента и его температурой на входе в сушильную камеру  $t_1$ . Их можно установить изменением числа оборотов электродвигателя вентилятора и мощностью электрического калорифера. Затем до конца опыта режимные параметры остаются постоянными.

Сушке подвергаются смоченные кубические кусочки войлока,

равномерно распределенные на арматуре в рабочем пространстве сушильной камеры.

Уменьшение массы влажного материала в процессе сушки измеряется путем взвешивания всей сушильной камеры через определенные промежутки времени. Для этого уплотнительную гайку откручивают вниз и сушильная камера повисает на кронштейне, соединенном с весами. При взвешивании отсекают поступление воздуха в сушильную камеру задвижкой и одновременно, не выключая электрокалорифер, открывают окно на боковой поверхности газохода. Размеры этого окна подобраны так, чтобы расход воздуха через электрокалорифер не изменялся, а соответственно при постоянной электрической нагрузке не изменялась и температура нагреваемого воздуха. Такая методика позволяет после взвешивания продолжить процесс сушки при тех же параметрах сушильного агента.

Параметры воздуха, забираемого вентилятором из помещения, определяются на основании измеренных психрометром значений температуры по сухому и мокрому термометру ( $t$  и  $t_m$ ).

Подогрев воздуха в калорифере ( $t_1 - t_0$ ) определяется с помощью дифференциальной термопары, спаи которой установлены до и после воздухоподогревателя. Термопара генерирует термо-э.д.с.  $E(t_1, t_0)$ .

На входе в сушильную камеру установлен также жидкостный стеклянный термометр расширения, который используется при регулировании параметров режима работы сушильной установки.

Понижение температуры сушильного агента при прохождении через сушильную камеру ( $t_1 - t_2$ ) измеряется с помощью дифференциальной термобатареи из пяти термопар. Э.д.с. батареи –  $5E(t_1, t_2)$ .

Температура материала  $\Theta$  определяется на основании измерения разности температур ( $t_2 - \Theta$ ) с помощью дифференциальной термопары из пяти термопар, «холодные» спаи которых закреплены в кусочках материала, а «горячие» обдуваются воздухом. Термо-э.д.с. этой батареи термопар –  $5E(t_2, \Theta)$ .

Термопарные провода выведены через переключатель к электронному милливольтметру.

#### 4. Пояснения к проведению эксперимента

При проведении опыта необходимо соблюдать следующую последовательность операций, выполняемых совместно с преподавателем.

4.1. Записать показание весов ( $N_{\text{сух}}$ ), соответствующее равновесной влажности материала, т.е. при практически сухом материале.

4.2. Включить установку и отрегулировать ее на заданные режимные параметры сушки.

4.3. Записать в таблицу 1 параметры опыта.

Таблица 1 – Параметры опыта

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Масса абсолютно сухого материала, $M_{\text{сух}}$ , дел.	
2	Показания весов при взвешивании камеры с абсолютно сухим материалом $N_{\text{сух}}$	
3	Показания психрометра по сухому термометру $t_0$ , °C по мокрому термометру $t_{\text{м}0}$ , °C	
4	Омическое сопротивление электрического воздухоподогревателя $R$ , Ом	
5	Падение напряжения на клеммах электрического воздухоподогревателя $U$ , В.	

4.4. Увлажнить материал и записать показания весов ( $N$ ) перед началом сушки, т.е. при  $\tau = 0$ . При взвешивании необходимо вынимать из гнезда штекер разъема подключения термопары, провода которой за счет упругости изменяют показания весов.

4.5. Начать процесс сушки, направив нагретый воздух в сушильную камеру и включив секундомер. Отсчет времени сушки вести только при продувании воздухом сушильной камеры. Когда нагретый воздух не проходит через сушильную камеру, интенсивность сушки материала существенно меньше, чем при обдуве материала. Поэтому при отсчете времени сушки необходимо исключить паузы на взвешивание, т.е. секундомер следует останавливать каждый раз при отключении поступления воздуха в сушильную камеру. После окончания взвешивания и герметизации воздухопровода сушильный агент направляется в камеру и секундомер следует вновь включить.

4.6. Каждый раз перед отключением подачи воздуха в сушильную камеру измеряют термо-э.д.с. всех установленных термопар, поочередно включая их переключателем. При  $\tau = 0$  температурные измерения не производятся.

4.7. Первое взвешивание проводят через 50 – 60 сек. По мере снижения интенсивности сушки интервалы времени между взвешиваниями увеличивают до 200 – 300 сек.

4.8. Записать в таблицу 2 показания весов  $N$  и значения термо-э.д.с. термопар для соответствующих значений продолжительности сушки  $\tau_i$ .

4.9. Когда при взвешивании показания весов приближаются к значениям, соответствующим равновесной влажности материала, можно прекратить измерения, отключить электрокалорифер, потенциометр и в

последнюю очередь – вентилятор.

Таблица 2 – Опытные данные

$\tau, \text{с}$	$N_i, \text{дел}$	$E(t_1, t_0), \text{мВ}$	$5E(t_1, t_2), \text{мВ}$	$5E(t_2, \theta), \text{мВ}$
Всего 15 строк				

## 5. Обработка экспериментальных данных

Необходимо определить значения параметров и построить графики, характеризующие кинетику сушки материала.

5.1. Рассмотрим, как изменяется влажность материала в процессе сушки. В каждый момент времени  $\tau_i$  масса материала, подвергающегося сушке, составляет  $M_i$ , причем масса сухого материала  $M_{\text{сух}}$  – неизменна (табл.1), а масса влаги  $M_{\text{вл}_i}$ , находящейся в материале, постепенно уменьшается, т.е.  $M_i = M_{\text{сух}} + M_{\text{вл}_i}$ . Изменение показания весов на 10 единиц соответствует уменьшению массы влажного материала на 1 г.

Воспользовавшись результатами взвешивания, определим (в граммах):

$$M_{\text{вл}_i} = 0,1(N_i - N_{\text{сух}}).$$

Здесь  $N_i$  – показания в делениях по шкале весов при продолжительности сушки  $\tau_i$ ;

$N_{\text{сух}}$  – показания весов при взвешивании сушильной камеры с абсолютно сухим материалом.

Влажность материала

$$\omega_i^c = \frac{M_{\text{вл}_i}}{M_{\text{сух}}} 100\%.$$

Значения  $\omega_i^c$ , определенные по результатам каждого взвешивания, заносим в табл. 3. Также необходимо построить график изменения влажности материала  $\omega^c(\tau)$ , как, например, показано на рис.2. На графике можно выделить первый период сушки, соответствующий линейной зависимости изменения влажности материала. Соответственно,  $\tau_0$  – время прогрева материала и начало первого периода сушки;  $\tau_1$  – время окончания первого и начало второго периода сушки. Это состояние материала соответствует критической влажности, т.е. когда поверхность образцов стала сухой и зона испарения начинает перемещаться вглубь материала. Время окончания сушки –  $\tau_p$ . При этом влажность материала достигает значения равновесной  $\omega_p^c$ .

5.2. Проанализируем изменение скорости сушки. Интервал времени между соседними взвешиваниями составляет:

$$\Delta\tau_i = \tau_i - \tau_{i-1}.$$

В результате сушки за время  $\Delta\tau_i$  влажность материала уменьшается на величину  $\Delta\omega_i^c = \omega_{i-1}^c - \omega_i^c$ .

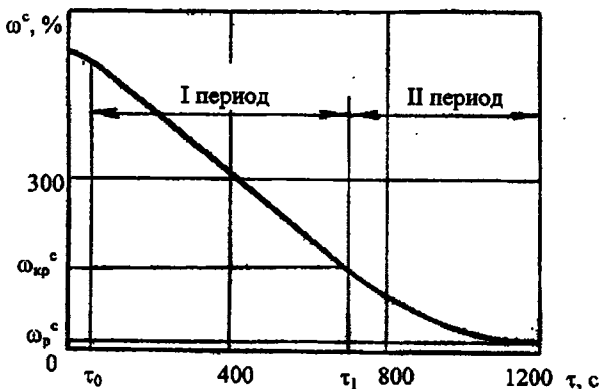


Рисунок 2 – Изменение влажности материала

Средняя скорость сушки  $\vartheta_i, \text{с}^{-1}$  для интервала времени  $\Delta\tau_i$  составляет:

$$\vartheta_i = \frac{\Delta\omega_i^c}{100 \cdot \Delta\tau_i}, \text{с}^{-1}.$$

В первый период скорость сушки постоянна, поэтому ее значение можно вычислить для всего интервала времени от  $\tau_0$  до  $\tau_1$ . Значения  $\vartheta_i$  заносим в табл.3, а зависимость  $\vartheta(\tau)$  представляем в виде гистограммы и графика усредненных значений, как показано на рис.3.

В первый период скорость сушки наибольшая и постоянная, так как все тепло, подводимое от сушильного агента, полностью расходуется на испарение влаги с поверхности материала.

Во второй период сушки толщина слоя высушенного материала постепенно увеличивается, т.е. растет его термическое сопротивление. Соответственно уменьшается количество подводимого тепла в зону испарения, перемещающуюся вглубь материала, а значит уменьшается количество испаряющейся влаги и скорость сушки.

5.3. Коэффициент полезного действия сушилки показывает, какая часть тепловой нагрузки воздухоподогревателя  $Q_k$  используется

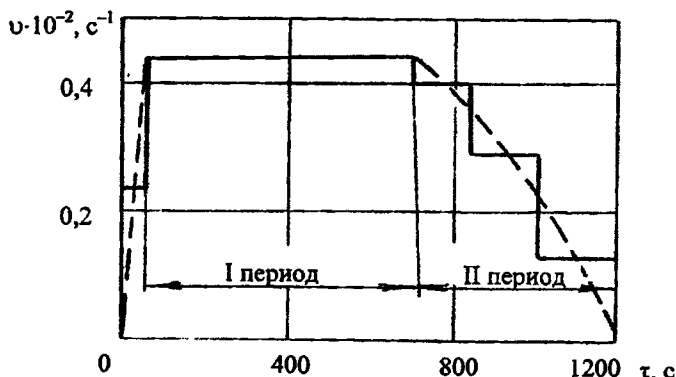


Рисунок 3 – Гистограмма и график средних значений скорости сушки

Таблица 3 – Результаты обработки опытных данных

$M_{\text{вл},i}^c$	$\omega_i^c, \%$	$\bar{v}_i, \text{с}^{-1}$	$\bar{\eta}_i, \%$	$t_{1i}, ^\circ\text{C}$	$t_{2i}, ^\circ\text{C}$	$\theta_i, ^\circ\text{C}$
Всего 15 строк						

непосредственно на испарение влаги из материала  $Q_{\text{н}}$ , т.е.  $\eta = Q_{\text{н}}/Q_{\text{к}}$ .

Мощность электрического калорифера во время опыта не изменяется, Вт:

$$Q_{\text{к}} = \frac{U^2}{R},$$

где  $U$  – падение напряжения на нагревателе, В;  $R$  – омическое сопротивление, Ом (см. табл. 1).

За интервал времени  $\Delta\tau_i$  из материала испаряется

$$\Delta M_{\text{вл},i} = M_{\text{вл},i-1} - M_{\text{вл},i}.$$

Среднее за время  $\Delta\tau_i$  значение расхода испаряемой влаги, кг/с:

$$W_i = \frac{\Delta M_{\text{вл},i}}{\Delta\tau_i \cdot 10^3}.$$

Здесь  $\Delta M_{\text{вл},i}$  подставляется в граммах.

Тепловая нагрузка, расходуемая на испарение влаги, Вт:

$$Q_{\text{н}i} = W_i r.$$

Здесь теплота парообразования  $r = 2500 \cdot 10^3$  Дж/кг [2].

Среднее значение КПД сушилки в интервале времени  $\Delta\tau_i$ :

$$\eta_i = \frac{Q_{\text{н}i}}{Q_{\text{к}}} 100\%.$$

Необходимо значения  $\eta_i$  занести в табл.3, а также построить гистограмму и график усредненных значений зависимости  $\eta(\tau)$ , как,

например, показано на рис.4.

Как видно, КПД сушилки периодического действия в первом периоде максимальный и постоянный, а во втором периоде уменьшается от максимума до нуля. Это означает, что тепло, затрачиваемое на нагрев сушильного агента, используется все менее эффективно. С этой точки зрения более экономичными являются сушилки непрерывного действия.

5.4. Значения температуры сушильного агента и материала – важные технологические параметры процесса, которые влияют на качество высушенного материала.

Температура воздуха на входе в установку из помещения  $t_0$  практически не изменяется (табл.1).

Температура воздуха после калорифера, т.е. на входе в сушильную камеру:

$$t_1 = t_0 + \Delta t_{0-1}.$$

Здесь нагрев воздуха в калорифере  $\Delta t_{0-1}$  определяется с помощью дифференциальной термопары:

$$\Delta t_{0-1} = \frac{E(t_1, t_0)}{K}.$$

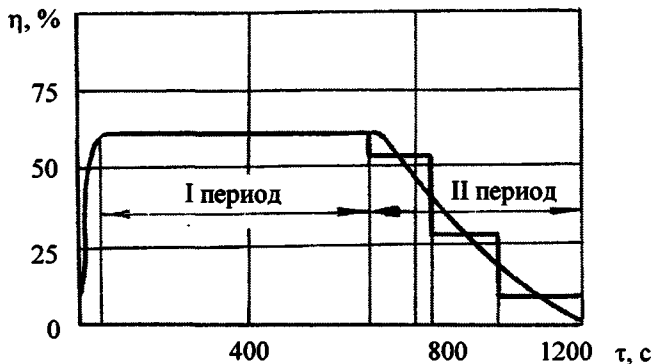


Рисунок 4 – Гистограмма и график средних значений КПД сушилки

Коэффициент преобразования термопары типа ХК в диапазоне температур 20–50 °С и  $K = 0,0683$  МВ/град [3]. Значения  $t_1$  заносим в табл.3.

Понижение температуры воздуха при прохождении через сушильную камеру  $\Delta t_{1-2}$ , °С определяем с помощью дифференциальной термобатареи из пяти термопар, термо-э.д.с. которых равна  $5E(t_1, t_2)$ .

Тогда

$$\Delta t_{1-2} = \frac{5E(t_1, t_2)}{5 \cdot 0,0683}.$$

Температура воздуха на выходе из сушильной камеры в конце каждого интервала времени  $\Delta \tau_i$

$$t_{2i} = t_1 - \Delta t_{1-2}.$$

Температура материала  $\Theta_i$ , °С, также определяется с помощью дифференциальной термобатареи из пяти термопар:

$$\Theta_i = t_{2i} - \frac{5E(t_2, \Theta)}{5 \cdot 0,0683}.$$

Значения температур  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $\Theta_i$  заносим в табл.3 и строим графики зависимостей  $t_1(\tau)$ ,  $t_2(\tau)$ ,  $\Theta(\tau)$ , как показано на рис.5.

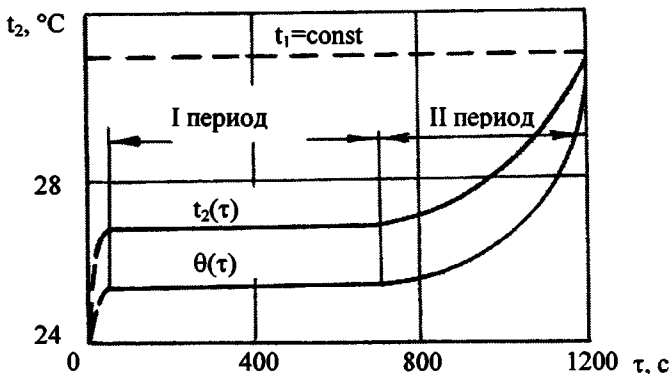


Рисунок 5 – Изменение температуры сушильного агента и материала

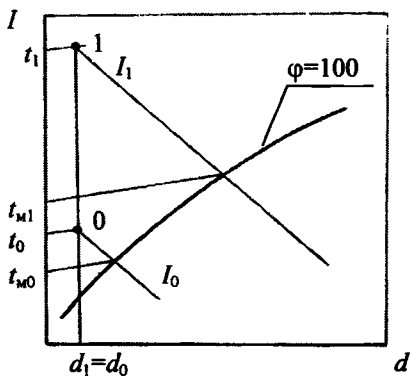


Рисунок 6 – Определение  $t_{m1}$

В первый период сушки температура сушильного агента  $t_2$  и материала  $\Theta$  не изменяются, так как все тепло идет на испарение влаги с поверхности материала. Для интенсивного, «жесткого» режима сушки  $\Theta$  может немного увеличиваться.

Целесообразно сравнить для первого периода значения температуры материала  $\Theta$  с температурой по мокрому термометру воздуха на входе в сушильную камеру –  $t_{m1}$ . Для этого необходимо найти точки «0» и «1» на  $I$ - $d$ -диаграмме, как показано на рис.6. Точку «0» находят по значениям температур  $t_0$  и  $t_{m0}$ , измеренным с помощью психрометра (табл.2). Процесс нагрева воздуха в калорифере 0 – 1 происходит при постоянном влагосодержании  $d_1 = d_0$  до температуры  $t_1$ . Температуру по мокрому термометру  $t_{m1}$  находим на пересечении изоэнтальпии  $I_1$  с линией относительной влажности  $\varphi = 100\%$ .

Во второй период сушки количество тепла, отдаваемое сушильным агентом уменьшается, т.е. он выходит из сушильной камеры все с большей температурой  $t_2$ . Материал также постепенно нагревается, и значит,  $\Theta$  увеличивается. При окончании сушки значения температур  $t_2$  и  $\Theta$  могут возрасти до температуры воздуха на входе в сушильную камеру  $t_1$ .

На практике сушку ведут до конечной влажности материала, заданной технологическими условиями.

## 6. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе составляется каждым студентом индивидуально и должен содержать:

- 1) схему установки;
- 2) таблицы опытных данных;
- 3) таблицы результатов обработки опытных данных;
- 4) графики экспериментальных зависимостей  $\omega(\tau)$ ,  $\vartheta(\tau)$ ,  $\eta(\tau)$ ,  $t_1(\tau)$ ,  $t_2(\tau)$ ,  $\Theta(\tau)$ ;
- 5) анализ результатов работы.

### Контрольные вопросы

1. Как изменяются параметры, характеризующие работу сушильной установки, в первый и во второй периоды сушки?
2. Дать определения начальной, критической, конечной и равновесной влажности материала.
3. Почему предпочтителен прямочный характер движения материала и сушильного агента в сушилках непрерывного действия?
4. Как можно интенсифицировать процесс сушки в конвективной сушилке?
5. Особенности сушки материалов, склонных к трещинообразованию.

### Литература

1. Бакластов А.М. Промышленные теплообменные аппараты и установки. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике. – М.: Машиностроение, 1973.
3. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Энергия, 1978.

Навчальне видання

## МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторної роботи «Експериментальне дослідження кінетики сушки матеріалу в конвективній сушильній установці» по курсу «Теорія сушки і сушильні установки»

для студентів спеціальності 7.0905.10 «Теплоенергетика»

Укладач ПЕРЕСЬОЛКОВ Олександр Романович

Відповідальний за випуск В.Г. Павловський

Роботу до друку рекомендував

Редактор Л.А. Конієвська

Свідоцтво про реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.

План 2001, п. 64

Підп. до друку                      Формат 60×84 1/16. Папір            Друк - ризографія.

Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 0,5. Обл. -вид.арк. 0,6. Тираж 50 прим.

Зам. №                                  Ціна договірна

---

Видавничий центр НТУ «ХП» 61002 Харків, вул. Фрунзе, 21.

Друкарня НТУ «ХП»