

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МИКРОВОЛНОВОЙ, КОНВЕКТИВНОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ СУШКИ ЗЕРНА

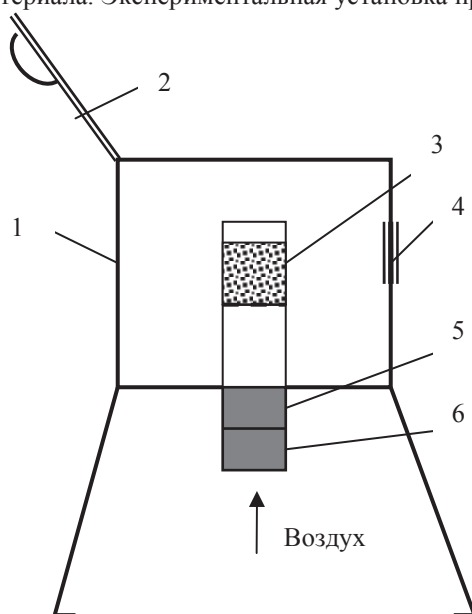
Дементьева Т.Ю., аспирантка
Одесская государственная академия холода, г. Одесса

Исследовалось влияние скорости фильтрации воздуха и его температуры на скорость сушки и удельные затраты энергии при конвективной сушке плотного слоя зернового материала (овес). При аналогичных начальных условиях (масса материала, толщина слоя, начальное влагосодержание и температуры) проведено исследование микроволновой сушки. Получено, что удельные затраты энергии при конвективной сушке практически во всех случаях выше, чем при микроволновой.

Influence of speed of a filtration of air and its temperature for speed of drying and specific expenses of energy was investigated at to convection drying of a dense bed of a grain material (oats). At analogical entry conditions (weight of a material, a thickness of a layer, an initial moisture content and temperatures) research of microwave drying is carried out. It is received that specific expenses of energy at to convection drying practically in all cases above, than at the microwave.

Ключевые слова: сушка, микроволновая, конвективная, эффективность, удельные затраты энергии.

Целью работы являлось определение энергетической эффективности конвективной, микроволновой и комбинированной сушки зерна. Подобный сравнительный анализ проводился и ранее, однако данные при различных способах теплоподвода были получены в различных условиях, на разных установках и формах ячеек [1,2]. Поэтому для получения исходных данных для сравнения и ответов на вопросы, действительно ли применение микроволнового нагрева рационально, когда и в каком соотношении целесообразно подводить микроволновую энергию, были проведены эксперименты в идентичных условиях и с одинаковой массой материала. Экспериментальная установка представлена на рис. 1.



1 – рабочая камера, 2 – дверца, 3 – экспериментальная ячейка с материалом для исследований, 4 – область ввода в камеру микроволновой энергии, 5 – нагреватель, 6 – вентилятор

Рис. 1 – Схема установки для исследования кинетики сушки зерновых материалов при микроволновом и конвективном нагреве

В качестве материала для исследований был выбран овес. Во всех опытах его масса составляла 100 г, а начальное влагосодержание $u_0 = idem = 0,2$. Установка позволяла регулировать температуру воз-

духа при помощи нагревателя 5 и расход с помощью шибера, установленного перед вентилятором 6. Для исследования конвективной сушки были проведены три серии экспериментов. Это позволило определить оптимальные условия для конвективной сушки и по ним проводить сравнение. В первой серии исследовалось влияние температуры воздуха на интенсивность сушки и удельные (в расчете на единицу испаренной влаги) энергозатраты при постоянном расходе $G_{возд} = idem$ и при одинаковой длительности $\tau = idem = 180$ с. По истечении заданного времени ячейка быстро изымалась, взвешивалась, и термопарами измерялась температура слоя в трех точках, которые затем усреднялись. По полученным данным рассчитывалось конечное влагосодержание u_k , средняя скорость сушки N и удельные энергозатраты Q по зависимости

$$Q = (P_{нагр} + P_{вент}) / \Delta m \quad (1)$$

Здесь: $P_{нагр} = Gc_p \Delta t$ - мощность нагревателя, Вт; G - расход воздуха, c_p - его теплоемкость, $\Delta t = t_k - t_o$ - изменение температуры воздуха от начальной t_o до конечной t_k , $P_{вент}$ - мощность вентилятора, m - масса испарившейся влаги.

Для расчета мощности вентилятора используется зависимость

$$N_{пол} = \frac{G \cdot \Delta P}{\rho \cdot \eta_6 \cdot \eta_{двиг}} \quad (2)$$

Аэродинамическое сопротивление слоя ΔP можно рассчитать по формуле:

$$\Delta p = f_3 \frac{\rho_z w_\phi^2}{2} \frac{a_{y\phi}}{\epsilon^3} \delta \text{ Па} \quad (3)$$

где w_ϕ - скорость фильтрации, f_3 - эквивалентный коэффициент сопротивления слоя

$$f_3 = \frac{8}{Re_3} \alpha + \alpha_{ин}$$

Коэффициенты частиц можно считать равными $\alpha = 4,55$; $\alpha_{ин} = 0,45$, а эквивалентное число Рейнольдса

$$Re_3 = \frac{4w_\phi}{a_{y\phi} \nu_2}$$

Для анализа результатов также имеет значение величина полезных затрат, рассчитываемая по зависимости

$$Q_n = (\bar{M}c_p \Delta t + \Delta m \cdot r) / (\tau \cdot \Delta m) \quad (4)$$

Здесь: \bar{M} - средняя (по начальным и конечным значениям) масса зерна, c_p - его теплоемкость, $\Delta t = t_{кз} - t_{оз}$ - изменение температуры зерна от начальной $t_{оз}$ до конечной $t_{кз}$.

Полученные результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Исследование влияния температуры воздуха на скорость сушки и удельные энергозатраты

(масса материала $m = 100$ г; расход $G_{возд} = 0,0118$ кг/с; время сушки $\tau = 180$ с; средняя скорость воздуха $w = 1,5$ м/с; начальная температура зерна $t_o = 20$ °С)

	$t_{во:}$	m_k , г	Δm , г	u_k	N , с ⁻¹	$\bar{t}_{зерна}$	Q , Дж/кг
1	120	93,83	6,17	0,126	0,00041	77	$3.482 \cdot 10^7$
2	100	96,1	3,9	0,153	0,00026	51	$4.414 \cdot 10^7$
3	70	96,77	3,23	0,161	0,00022	47	$3.347 \cdot 10^7$
4	64	96,8	3,2	0,1616	0,00021	46	$2.978 \cdot 10^7$
5	50	97,49	2,51	0,17	0,00017	37	$2.606 \cdot 10^7$

Рост температуры воздуха приводит к заметному росту скорости сушки. Удельные затраты энергии имеют максимум при температуре воздуха 100 °С. Минимальное значение было получено для 50 °С, что объясняется меньшими затратами энергии на нагрев зерна. Однако при этом скорость сушки была самая низкая в этой серии опытов.

Во второй серии опытов расход воздуха был переменным $G_{возд} = var$, его температура была постоянной $t_{возд} = idem = 70$. Длительность сушки, как и в первой серии, оставляла 180 с. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Исследование влияния расхода воздуха на скорость сушки и удельные энергозатраты
(масса материала $m = 100$ г; начальная температура зерна $t_o = 20$ °C;
1 – скорость воздуха в воздуховоде 1,5 м/с, 2 – 1 м/с, 3 – 0,3 м/с)

	$G_{возд}$, кг/с	m_k , г	Δm , г	u_k	N , с ⁻¹	$\bar{t}_{зерна}$	Q , Дж	Q_n , Дж
1	0,0118	96,69	3,31	0,16	0,00022	47	$3.266 \cdot 10^7$	$4.175 \cdot 10^6$
2	0,00785	97,32	2,68	0,169	0,00017	48	$2.666 \cdot 10^7$	$4.678 \cdot 10^6$
3	0,002355	97,63	2,37	0,172	0,000155	48	$8.996 \cdot 10^6$	$4.979 \cdot 10^6$

Обращает на себя внимание то, что удельные затраты энергии растут с увеличением расхода (более чем в три раза), а удельные полезные затраты изменяются мало. При этом скорость сушки при увеличении расхода от 0,002355 кг/с до 0,0118 кг/с увеличилась в 1,4 раза. Снижение расхода приводит к снижению скорости сушки. Кривые удельных затрат энергии и скорости сушки представлены на рис. 2.

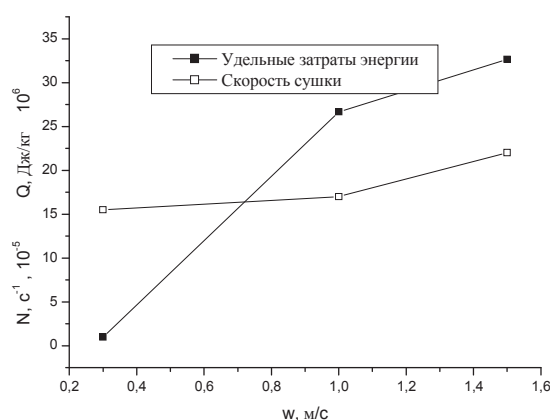


Рис. 2 – Зависимость скорости сушки и удельных затрат энергии от скорости фильтрации

Проводилось исследование кинетики сушки при продувке слоя (масса 100 г) воздухом со скоростью фильтрации 1 м/с и при разных температурах (70 и 50 °C). На рис 3 приведены зависимости удельных затрат энергии от длительности сушки при температуре воздуха 70 и 50 °C. Видно, что кривые затрат энергии при заданных температурах практически повторяют друг друга. Скорость сушки, рассчитанная по точкам с интервалом 60 с, меняется нерегулярно, при этом средняя за период при $t_{возд} = 70$ °C составляла $\bar{N} = 0,00021$ с⁻¹, а при $t_{возд} = 50$ °C составляла $\bar{N} = 0,00016$ с⁻¹.

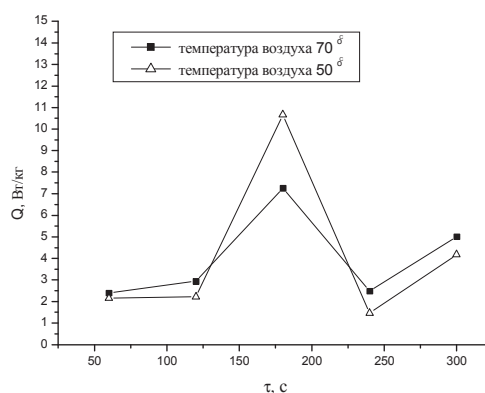


Рис. 3 – Зависимости удельных затрат энергии от времени сушки при различных температурах воздуха

Микроволновая сушка проводилась при мощности магнетрона 600 Вт. Длительность составляла 180 с. Результаты приведены в табл. 3. Как и в предыдущих экспериментах, исследовался овес массой 100 г и с начальным влагосодержанием $u_0 = 0,2$.

Таблица 3 – Сушка зерна овса в микроволновом поле.

τ , с	m_k , г	Δm , г	u_k	N , с ⁻¹	$t_{\text{зерна}}$	Q , Дж
60	98,12	1,88	0,177	0,00038	62	$7.295 \cdot 10^6$
120	94,52	5,48	0,134	0,00072	72	$8.935 \cdot 10^6$
180	91,21	8,72	0,095	0,00065	84	$1.198 \cdot 10^7$

Теперь можно сравнить микроволновую и конвективную сушку. Удельные затраты теплоты выше при микроволновой сушке, но при этом скорость сушки также намного выше. Так, при температуре воздуха 70 °С скорость сушки составляла $N = 0,00022$ с⁻¹, а средняя скорость сушки при микроволновом нагреве $N = 0,00058$ с⁻¹. При этом следует обратить внимание, что мощность нагревателя в этом случае была близка к мощности магнетрона. Следовательно, вследствие особенностей микроволнового нагрева подводимая энергия более полно расходуется непосредственно на сушку, что и отражается в значении скорости. Удельные затраты энергии при конвективной сушке практически во всех случаях выше, чем при микроволновой.

Недостатком микроволновой сушки является сложность регулирования температуры слоя. Зерно быстро разогревается до недопустимо высокой температуры. Вследствие этого чисто микроволновую сушку проводить не рекомендуется. Предыдущие исследования [3, 4] показывают, что целесообразно проводить циклическую сушку, совмещая конвективную и микроволновую.

В настоящее время нет подтвержденных данных, какой метод теплоподвода целесообразен на заключительной стадии. В [4] отмечается, что заключительной стадией должна быть микроволновая сушка. Однако в исследуемом диапазоне влагосодержаний такая рекомендация не может быть однозначной для всех видов материалов. Следующая серия экспериментов была направлена на решение этого вопроса. Начальные условия соответствовали приведенным выше. Зерно сушилось при конвективной передаче тепла, при этом работали нагреватель и вентилятор в течение трех минут, и микроволновом нагреве в течение 20 и 15 с. Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Конвективно-микроволновая сушка в условиях различной очередности способов подвода теплоты

	$G_{\text{возд}}$	m_k , г	Δm , г	u_k	N , с ⁻¹	$t_{\text{зерна}}$	Q , Дж
1	Конв. МВ-20 с	96,42	3,78	0,155	0,00025	73,3	$2.808 \cdot 10^7$
		95,87	4,13	0,15	0,0003		
2	нагр+вент МВ-15 с	96,57	3,43	0,159	0,00023	81,3	$2.817 \cdot 10^7$
		95,75	4,25	0,149	0,0005		
Очередность МВ и конвективной сушки меняется							
3	МВ-20 с нагр+вент	99,74	0,26	0,197	0,0002	50	$2.629 \cdot 10^7$
		95,92	4,08	0,151	0,00026		
4	МВ-15 с нагр+вент	99,46	0,53	0,194	0,0003	52,3	$2.852 \cdot 10^7$
		95,46	4,54	0,146	0,00027		

Конечное влагосодержание, как видно из таблицы, практически не зависит от очередности микроволнового и конвективного нагрева. Удельные энергозатраты в большей мере зависят от длительности микроволнового нагрева, а не от очередности его включения.

Литература

1. Календерьян В.А., Бошкова И.Л., Волгушева Н.В. Кинетика кондуктивной и кондуктивно-конвективной сушки гречихи// Наукові праці ОНАХТ. Одеса.- 2006. - № 29, т.2. – с. 17-20.
2. Волгушева Н.В. Сравнительный анализ процессов сушки при различных способах теплоподвода// Холодильная техника і технологія.-2005.-№3(95). - С.80-82.
3. Календерьян В.А., Бошкова И.Л., Волгушева Н.В. Влияние режимных параметров на распределение температур в движущемся плотном слое дисперсного материала при микроволново-конвективной сушке// Пром. теплотехника 2010, т.32, №1. – С. 37-43
4. Волгушева Н.В. Кинетика сушки плотного слоя дисперсного материала (на примере гречихи) при различных способах подвода теплоты. Автореферат канд. дисс. Одесса, 2005. – 12с.