

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

АЛМАТЫ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ
АЛМАТИНСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ALMATY TECHNOLOGICAL UNIVERSITY

ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ТОҢАЗЫТУ АКАДЕМИЯСЫ
МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ХОЛОДА
INTERNATIONAL ACADEMY OF REFRIGERATION



VII ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ҚАЗАҚСТАН-ТОҢАЗЫТУ 2017»

VII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«КАЗАХСТАН-ХОЛОД 2017»

VII INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE
«KAZAKHSTAN-REFRIGERATION 2017»

Конференция баяндамаларының жинағы
15-16 наурыз, 2017 ж.

Сборник докладов конференции
15-16 марта 2017 г.

Proceedings of the Conference
March 15-16, 2017

Алматы, 2017

УДК 621.56/59(063)

ББК 31.392

К14

Сборник докладов подготовлен под редакцией
доктора технических наук, академика **Кулажанова Т.К.**

Редакционная коллегия:

Цой А.П., Бараненко А.В., Кантарбаев Р.А.,
Шлейкин А.Г., Андреева В.И. (ответ.секретарь)

К14 Казахстан-Холод 2017: Сб. докл. межд.науч.-техн. конф. (15-16 марта
2017 г.) – Алматы: АТУ, 2017. – 285 с.

ISBN 978-601-263-389-4

В докладах представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в Казахстане, Германии, России, Японии и Украине по следующим направлениям: холодильная техника и компрессоростроение, теплохладоснабжение, системы кондиционирования воздуха и жизнеобеспечения, экология в холодильной промышленности, холодильная и пищевая технология. Сборник рассчитан на специалистов и ученых, работающих в областях холодильной, пищевой, химической, нефтеперерабатывающей промышленности, а также на специалистов по системам кондиционирования воздуха и жизнеобеспечения жилых, коммерческих зданий и спортивных комплексов.

УДК 621.56/59(063)

ББК 31.392

ISBN 978-601-263-389-4

© АТУ, 2017

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МИКРОВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ ГЛИНЫ ДЛЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

*Лукьянова А.С., ассистент., Колесниченко Н.А., аспирант
Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина
E-mail: albireo@ukr.net, kolesnychenko.natalia@yandex.ua*

В технологии производства керамических изделий из глины перед обжигом их требуется просушить в течение 2 – 7 дней в зависимости от величины изделия. Обжиг глины (керамической массы) преследует цели: а) сушку (удаление гигроскопически связанной влаги), б) спекание материала. Правильный подбор режимов сушки во многом определяет качество конечного изделия. При сушке глины происходит не только снижение влажности, но и изменение ее физико-механических свойств. Пересушенная до потери химически связанной воды глина теряет связующую способность. Неравномерная влажность вызывает растрескивание. Скрытые дефекты формования (например, свиль) могут быть причиной трещин, а пересушенные изделия не выдерживают легких ударов из-за хрупкости. Существенную роль в процессе микроволнового нагрева играют теплофизические свойства обрабатываемого образца, поскольку эффективность и равномерность нагрева зависит не только от диэлектрических свойств образца, но и от его способности распределять выделившуюся теплоту по своему объему.

Целью работы является оценка энергетической эффективности применения микроволнового нагрева при производстве керамических изделий на примере глины и получение эмпирических зависимостей для определения основных тепловых характеристик нагрева в микроволновом поле.

Для исследований была использована предварительно подготовленная и увлажненная глина. Методика эксперимента состояла в следующем:

- 1) из влажной глины формируются пластины заданной толщины;
- 3) вспомогательным трафаретом вырезаются образцы равной площади;
- 4) полученный образец взвешивается;

5) глиняный образец помещается в МВ установку, где он выдерживается под действием МВ поля определенный промежуток времени Δt ;

6) через время Δt образец извлекается из рабочей камеры, после чего на протяжении короткого промежутка времени проводятся измерения температуры на поверхности образца, в него центре и края, а так же массу керамического изделия.

Для измерения температуры применяется цифровой мультиметр М 4581Ц с диапазоном измерения $-40 \div +1500^{\circ}\text{C}$ и границей погрешности, которая допускает $\pm(0,01a+30\text{C})$, где a - измеренное значение;

7) процедура обработки с дальнейшими измерениями температуры и массы повторяется до тех пор, пока его масса не стабилизировалась.

Поскольку непосредственно во время опытов измерять температуру и массу невозможно, каждый последующий образец выдерживался в камере на выбранный шаг времени Δt больше предыдущего, а по результатам измерения температуры и массы, полученным во время выемки очередного образца, получались данные для МВ нагрева единичной пластины. Погрешность не увеличилась при использовании одного образца, если измерения проводить в течение короткого промежутка времени, при этом образец практически не остывал. Начальная толщина образца составляла (6,9 – 7) мм. По результатам экспериментов проводились тепловые расчеты и определялись оптимальные режимы.

Результаты исследований, полученные на глиняных образцах, и проводимые в идентичных условия, за исключением выходной мощности магнетрона, представлены в табл. 1 – 3.

Таблица 1 – Экспериментальное исследование нагрева глиняной пластины в МВ поле. Выходная мощность магнетрона 80 Вт.

$\tau, \text{с}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$t_{\text{нов}}^{\circ}\text{C}$	21	80	67	78	103	137	115	117	113
$t_{\text{цен}}^{\circ}\text{C}$	21	83	75	109	152	175	147	151	141
$t_{\text{кр}}^{\circ}\text{C}$	21	63	54	70	96	110	108	100	106
$m, \text{кг}$	0,064	0,056	0,050	0,046	0,045	0,044	0,044	0,044	0,044

Таблица 2 – Экспериментальное исследование нагрева глиняной пластины в МВ поле. Выходная мощность магнетрона 180 Вт.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$\tau, \text{с}$	0	30	60	90	120	150	180	210	240
$t_{\text{пов.}}^{\circ} \text{С}$	21	85	89	84	85	125	134	123	127
$t_{\text{цен.}}^{\circ} \text{С}$	21	87	93	98	96	186	159	164	152
$t_{\text{кр.}}^{\circ} \text{С}$	21	75	87	85	86	119	130	116	127
$m, \text{кг}$	0,064	0,051	0,049	0,045	0,045	0,044	0,044	0,044	0,044

При большей мощности магнетрона (табл. 3) влага интенсивнее удаляется из материала: так, при $\tau=90$ с масса образца приняла значение, соответствующее сухому материалу.

Таблица 3 – Экспериментальное исследование нагрева глиняной пластины в МВ поле. Выходная мощность магнетрона 240 Вт.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$\tau, \text{с}$	0	30	60	90	120	150	180	210	240
$t_{\text{пов.}}^{\circ} \text{С}$	21	97	151	163	154	147	139	127	119
$t_{\text{цен.}}^{\circ} \text{С}$	21	103	165	165	156	148	136	129	121
$t_{\text{кр.}}^{\circ} \text{С}$	21	92	146	159	153	144	137	128	118
$m, \text{кг}$	0,066	0,049	0,047	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045

Средний темп нагрева материала в последнем эксперименте составлял 1,03 К/с (61,6 К/мин), что выше значений, полученных для микроволнового нагрева, и существенно превышает величину, рекомендуемого для конвективного нагрева [5] (на уровне 0,5 К/с). При этом не наблюдалось образования трещин и деформации образца. Это связано с непрерывным увлажнением поверхности влагой, которая под действием МВ поля выходила на поверхность, благодаря чему она не пересыхала и механические напряжения не возникали. Наивысшая скорость сушки наблюдалась в первые 30 с, после чего наблюдалось ее падение. Наивысшая скорость нагрева была в этом же периоде и составляла $\frac{\Delta t}{\tau} = 2,07$ К/с, затем температура падает вследствие испарения влаги, после чего снова

начинает повышаться. В интервале 90-120 с скорость нагрева также была высокой, однако, вследствие значительной потери влаги, ее значение было ниже первоначального: $\frac{\Delta t}{\tau} = 1,43$ К/с. Далее

темп нагрева снижается, а после 150 с температура образца начинает падать. На этом же участке, как отмечено выше, испарение влаги прекратилось. Отсутствие нагрева можно объяснить снижением диэлектрических характеристик материала – тангенса угла потерь и диэлектрической проницаемости, вследствие чего количество микроволновой энергии, преобразованной материалом во внутреннюю энергию, резко снижается, и образец начинает остывать, не воспринимая падающую на него энергию микроволнового поля. Следовательно, сам материал не является полярным диэлектриком, и дальнейшая его обработка в МВ камере нецелесообразна. Таким образом, микроволновой нагрев следует осуществлять только на этапе сушки глиняных изделий, а в дальнейшем обжиг проводить с использованием традиционных методов. При производстве технической керамики возможен обжиг в микроволновой печи, если химический состав материала для ее изготовления позволяет интенсивно преобразовывать энергию микроволнового поля во внутреннюю.

Определение рациональных режимов сушки глиняных образцов проводилась на основании тепловых расчетов. Показателями, характеризующими режимы работы МВ-аппаратов, являются эффективность использования электроэнергии и мощность Q_n , которая расходуется на повышение температуры образца и испарение влаги. Эти показатели определяют коэффициенты полезного действия магнетрона η_m , камеры η_k и коэффициент использования тепловой энергии η_M . КПД магнетрона определяется следующим соотношением:

$$\eta_m = P_{\text{вых}} / P_c, \quad (1)$$

где η_m – КПД магнетрона, который определяется его техническими характеристиками (паспортные данные), P_c – мощность, потребляемая от сети.

Для определения перечисленных параметров необходимо знать тепловую энергию $Q_{обр}$, ее долю на нагрев самого образца $Q_{обр}$, полезно используемую теплоту $Q_{пол}$, а также потери в окружающую среду Q_n за счет лучистого $Q_{луч}$ и конвективного $Q_{кон}$ теплообмена, потери на нагрев диэлектрической ячейки $Q_я$ и на испарение $Q_{исп}$:

$$Q_{пол} = Q_{кон} + Q_{луч} + Q_я + Q_{исп}. \quad (2)$$

При диэлектрическом нагреве под действием электромагнитного поля контейнеры, воздух и стенки рабочей камеры практически не нагреваются. Но возникают тепловые потери Q_n в связи с возникновением в результате нагрева перепада температур между обрабатываемым изделием и окружающей средой. Следовательно, тепловую энергию, генерируемую в образце, можно определить как сумму ее составляющих:

$$Q_{обр} = Q_{пол} + Q_n \quad (3)$$

Коэффициент полезного действия камеры определяется следующим образом:

$$\eta_k = Q_{пол} / P_{вых}. \quad (4)$$

С увеличением потерь теплоты снижается коэффициент использования тепловой энергии η_T , который определяется следующим соотношением:

$$\eta_T = Q_{пол} / Q_n \quad (5)$$

Потери в окружающую среду за счет конвективного теплообмена:

$$Q_{кон} = \alpha \cdot \Delta t \cdot F \quad (6)$$

где α – коэффициент теплоотдачи; Δt – разность температур поверхности тела и окружающей среды, F – площадь теплопередающей поверхности.

Коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции рассчитывается по известным критериальным уравнениям [6]. Потери в окружающую среду за счет лучистого теплообмена $Q_{луч}$:

$$Q_{луч} = \varepsilon \cdot C_o \cdot \left[\left(\frac{T_u}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{о.с.}}{100} \right)^4 \right] \cdot \varphi_{1-2} \cdot F \quad (7)$$

где ε – степень черноты, $\varepsilon = 0,932$; C_o – постоянная излучения абсолютно черного тела, $C_o = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$; φ_{1-2} – средний угловой коэффициент поверхности F_1 относительно поверхности F_2 , $\varphi_{1-2} = 1$.

Теплота, расходуемая на испарение:

$$Q_{исп} = \frac{m_{вод} \cdot r}{\tau}, \quad (8)$$

где $m_{вод}$ – масса испарившейся воды, кг; r – теплота парообразования; τ – время нагрева, с.

По результатам обработки экспериментальных данных получена эмпирическая зависимость для КПД камеры. При изменении массы глиняного образца от 0,06 кг до 0,9 кг и изменении относительного объема $V_{обр} / V_k$ от 0,003 до 0,09 КПД камеры при толщине слоя $7 < l < 30$ мм описывается с погрешностью $\pm 14\%$ соотношением:

$$\eta_k = 0,72 \cdot \left(1 - e^{-203 \cdot (V_{обр} / V_k)} \right) \cdot \left(\frac{u}{0,46} \right)^{0,35} \quad (9)$$

Зависимость отражает тот факт, то уменьшение массы загрузки и снижение влагосодержания u образца приводит к снижению КПД камеры.

Для оценки теплоты, преобразованной в материале при взаимодействии микроволнового поля, можно применить следующую зависимость [7]:

$$q = \frac{P_{вых} \cdot \eta_k}{V}, \text{ Вт}/\text{м}^3, \quad (10)$$

Здесь V – объем, занимаемый материалом. Для проведения расчетов следует располагать зависимостями по КПД камеры, в которых должны учитываться объем материала, его толщина (высота) и площадь открытой поверхности, на которую падает электромагнитное поле.

Аналитические расчеты локальных температур по имеющейся зависимости [5], полученной для условий нагрева материала при действии внутренних источников теплоты, для глины с начальным влагосодержанием $u=46\%$ приводят к большой погрешности, поскольку не учитывается влияние потока испарившейся влаги на теплообмен. Для получения информации о распределении температур в глине при сушке можно применять зависимость, представленную в [8]. В эту зависимость входит скорость сушки, определяемая эмпирической формулой. Для глины на основании обобщения экспериментальных данных скорость сушки в первом периоде получена следующая зависимость:

$$N = 5,23 \cdot 10^{-3} (q_m)^{0,214} \cdot (\delta/\delta_0)^{1,16}, \quad (11)$$

где δ - начальная толщина слоя, δ_0 - реперное значение, принятое при выводе этой зависимости $\delta_0 = 7 \cdot 10^{-3}$ м. Значение удельного теплового потока q_m (в расчете на кг массы материала) определялось с учетом КПД микроволновой камеры, которое при массе $m = 0,065$ кг и для начального влагосодержания $u = 0,455$ составляло $\eta = 0,26$. Так, при $P_{вых} = 80$ Вт:

$$q_m = 3,37 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^3, \text{ при } P_{вых} = 180 \text{ Вт: } q_m = 9,83 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^3.$$

Анализ результатов экспериментов показывает, что существует возможность при правильно подобранных технологических режимах существенно снизить затраты энергии на сушку глины в микроволновом поле. Значения потребляемой энергии на МВ нагрев могут быть также уменьшены за счет снижения тепловых потерь.

Глина для производства керамики способна интенсивно нагреваться в микроволновом поле в период сушки. После испарения всей влаги температура материала снижается, что свидетельствует о невозможности осуществления процессов спекания керамики на основе глины в МВ поле.

Экономически целесообразно увеличивать загрузку камеры, а для обеспечения высокой производительности микроволновой установки следует устанавливать максимально возможную мощность магнетрона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sheppard, L. M. Manufacturing ceramics with microwave: the potential for economical production [Text] / L.M. Sheppard // Am. Ceram. Soc. Bull, 1988.– Vol. 67. – P. 3041-3086.
2. Fabrication of Metal-Ceramic Functionally Graded Materials by Microwave Sintering [Text] / Yu. V. Bykov, S. V. Egorov, A. G. Eremeev etc. // Inorganic Materials: Applied Research, 2012. –Vol. 3, № 3.– P. 261-269
3. Bykov, Yu.V. High-temperature microwave processing of materials [Text] / Yu.V. Bykov, K.I. Rybakov, V.E. Semenov // J. Phys. D: Appl. Phys., 2001. – Vol. 34. – P. 55-75.
4. Zhang, S.-L. Rapid thermal processing with microwave heating [Text] / S.-L. Zhang, R. Buchta, D.Sigurd //Thin Solid Films, 1994. – V. 246. – No. 1/2. – P. 151-157.
5. Kolesnychenko N. Analytical study of the processes of thermal conductivity at high intensity heating [Text] / N. Kolesnychenko, N. Volgusheva, I. Boshkova. // East-European J. of Enterprise Technology: Energy-saving technologies and equipment, 2016. – V. 5. – N. 8 (83). – P. 26-31.
6. Исаченко В.П. Теплопередача. Учебник для вузов. / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 221 с.
7. Бошкова И.Л. Оценка теплового эффекта взаимодействия материала с микроволновым электромагнитным полем [Текст] / И.Л. Бошкова, Н.А. Колесниченко// Наукові праці ОНАХТ, 2014. – Вип. 45. – Т.1. – С. 22-28.
8. Дементьева, Т.Ю. Интенсификация процессов теплообмена при сушке зернового материала с применением микроволнового электромагнитного поля.: дисс... канд. техн. наук : 05.14.05 / Т.Ю. Дементьева. – 2013. – 137 с.