

## НАГРЕВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ЛУЧОМ

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)  
Московский пр., 26, Санкт-Петербург, 190013, Россия*

### **Введение**

СВЧ–нагрев позволяет по-новому решать проблемы термической обработки и сушки материалов, а в ряде случаев – реализовать на практике новые технологические процессы и операции. К ним относится СВЧ–термообработка, цель которой – уничтожение вредителей (грибков, жучков, термитов) в материалах строительных конструкций. Хотя принцип действия лучевых СВЧ–камер известен [1, 2], технология указанного назначения не разработана. Во-первых, к числу причин такого состояния вопроса следует отнести прежде всего ограниченность имеющихся сведений об электрофизических свойствах влажных строительных материалов в диапазоне СВЧ [2–5]. Во-вторых, материалы в строительных конструкциях (стены, перегородки, перекрытия, полы), как правило, являются неоднородными (двуслойными), что существенно усложняет теоретическое рассмотрение задачи об их СВЧ–нагреве. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию распределения температуры в толще однослойных и двуслойных влажных строительных материалов при одностороннем СВЧ–облучении.

### **Методика эксперимента**

Экспериментальная установка (рис. 1) представляет собой СВЧ–генератор (выходная мощность  $P_0 = 750$  Вт, частота электромагнитного поля  $f = 2,45$  ГГц) с рупорным излучателем (рупорной антенной), опущенным внутрь технологического устройства. Исследуемый образец размещается на приспособлении, конструкция которого позволяет изменять расстояние до излучателя. Образцы материалов во всех случаях по площади в 1,5–2 раза больше площади раскрытия рупора ( $S_{\text{руп}} = 150 \times 150$  мм) и составляют для гипсовой штукатурки  $230 \times 190 \times 30$  (46) мм, древесины (ель) –  $330 \times 200 \times 220$  мм, кирпичной кладки (кирпич красный) –  $250 \times 180 \times 120$  мм. Двуслойные структуры получали наложением соответствующих материалов друг на друга. Температуры в толще измерялись по окончании каждого эксперимента с помощью термопар, введившихся в заранее просверленные отверстия в центральном сечении образца. Температуры лицевой и обратной поверхностей образца измеряли дистанционно с помощью ИК–термометра модели М8866. Начальное влагосодержание образцов контролировали с помощью кондуктометрического (древесина) и диэлькометрического (кирпич) влагомеров, а также весовым методом. Результаты экспериментов приведены на рис. 2–7.

### **Обсуждение результатов**

Гипсовая штукатурка даже в сухом состоянии (рис. 2) представляет собой непрозрачный для данной частоты материал и активно нагревается. Низковлажный материал закономерно прогревается до заданной глубины быстрее, чем сухой (рис. 3, кривые 2, 3). Однако за одно и то же время поверхность материала с влагосодержанием 4,5% (рис. 3, кривая 3) нагревается до более высокой температуры, чем поверхность материала с влагосодержанием 8% (рис. 3, кривая 4). По-видимому, это связано с влиянием начальной температуры  $T_n$ , к которой штукатурка (материал небольшой толщины) оказывается очень чувствительной при СВЧ–облучении.

Сравнительно более прозрачным материалом, чем штукатурка, является кирпичная кладка (рис. 4). Влияние малых влагосодержаний для кирпичной кладки оказалось несущественным в отношении скорости нагревания. Влияние же средних влагосодержаний проявляется более контрастно. Так, из сопоставления кривых 3 и 4 (рис. 4) следует, что СВЧ–нагрев кирпичной кладки с влагосодержанием 10% в глубине происходит интенсивнее, чем того же материала с влагосодержанием 17% (за одно и то же время на глубине  $x = 40$  мм достигается большая температура). Это можно объяснить

превалирующим для данной области изменения влагосодержаний ростом теплоемкости кирпичной кладки и одновременно – коэффициента отражения при увеличении влагосодержания над тенденцией роста фактора диэлектрических потерь (коэффициента затухания). Аналогичная тенденция наблюдается и для древесины (рис. 5, кривые 1, 2).

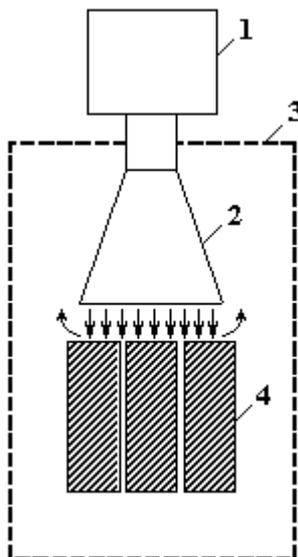


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – СВЧ-генератор, 2 – рупорная антенна, 3 – технологическое устройство, 4 – исследуемый материал

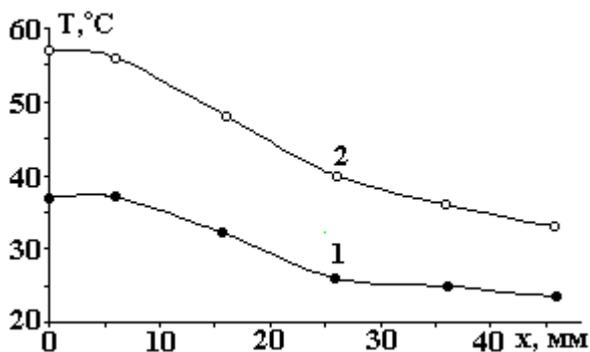


Рис. 2. СВЧ-нагрев гипсовой штукатурки (равновесно-сухая),  $T_n = 20^\circ\text{C}$ ,  $\tau$ , с: 1 – 30; 2 – 60

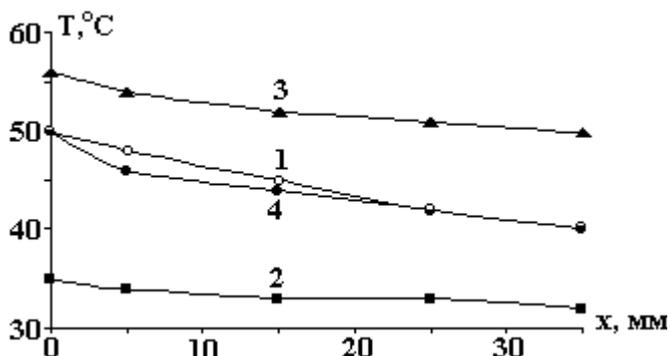


Рис. 3. СВЧ-нагрев гипсовой штукатурки: 1 –  $W_n = 10,37\%$ ,  $T_n = 17^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 60$  с; 2 –  $W_n = 0$ ,  $T_n = 16^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 90$  с; 3 –  $W_n = 4,52\%$ ,  $T_n = 23^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 90$  с; 4 –  $W_n = 8\%$ ,  $T_n = 17^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 90$  с

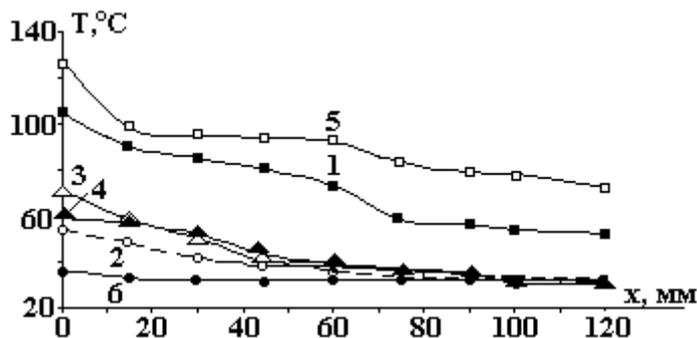


Рис. 4. СВЧ-нагрев кирпичной кладки: 1 –  $W_n = 0,1\%$ ,  $T_n = 20^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 300$  с; 2 –  $W_n = 7\%$ ,  $T_n = 19^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 120$  с; 3 –  $W_n = 17\%$ ,  $T_n = 19^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 120$  с; 4 –  $W_n = 10,1\%$ ,  $T_n = 19^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 120$  с; 5 –  $W_n = 7\%$ ,  $T_n = 19^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 480$  с; 6 –  $W_n = 1\%$ ,  $T_n = 19^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 120$  с

Отличие характера некоторых зависимостей от экспоненциального (согласно теории [5], электромагнитная волна в диэлектрике затухает по экспоненте), по всей вероятности, вызвано неодно-

родным распределением влагосодержания по толщине (кривые 1, 5 рис. 4; кривые 3, 6 рис. 5; кривая 2 рис. 6). В ряде случаев кривые распределения температуры имеют весьма сложный характер. Так, в древесине (кривая 5 на рис. 5) в поверхностных слоях идет сушка при температуре, близкой к  $100^{\circ}\text{C}$ . В более глубоких слоях происходит затухание электромагнитной волны и, как следствие, имеет место резко спадающая температурная характеристика. В противовес этому, при сравнительно низких температурах влияние сушки незначительно, и ход температурных кривых монотонно убывающий (кривые 1, 4 рис. 5; кривая 1 рис. 6; кривые 1, 2 рис. 7). В составной структуре штукатурка–древесина (рис. 6, кривая 3) происходит сквозной прогрев штукатурки с одновременной ее подсушкой. В точке перехода к древесине температура резко меняется, что обусловлено различием электрофизических (ЭФ) свойств влажной штукатурки и влажной древесины. То же наблюдается и для составной структуры штукатурка–кирпичная кладка (рис. 7), причем даже с течением времени (при большой экспозиции – кривая 4 рис. 7) различие ЭФ-свойств материала все продолжает сказываться.

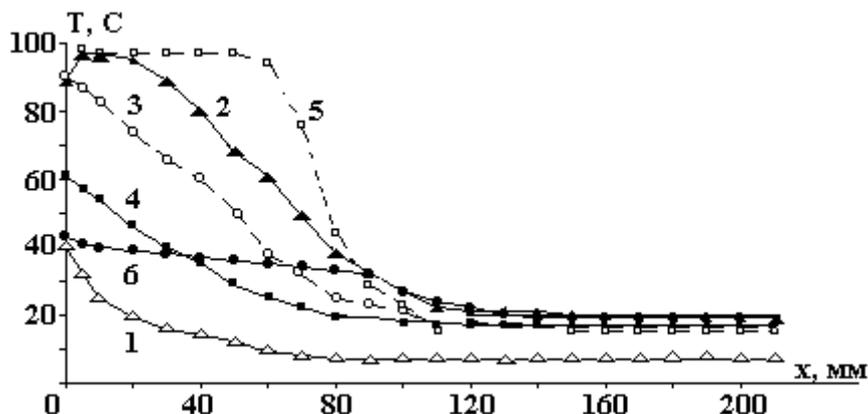


Рис. 5. СВЧ–нагрев древесины (ель): 1 –  $W_n \geq 70\%$ ,  $T_n, ^{\circ}\text{C}$ : 13, 12, 11, 10, 9, 8, 7, 7, 7... (по слоям),  $\tau = 30$  с; 2 –  $W_n = 25\%$ ,  $T_n = 17^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 30$  с; 3 –  $W_n \geq 70\%$ ,  $T_n = 16^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 120$  с; 4 –  $W_n = 20\%$ ,  $T_n = 19^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 90$  с; 5 –  $W_n = 25\%$ ,  $T_n = 15^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 300$  с; 6 –  $W_n = 8\%$ ,  $T_n = 17^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 30$  с

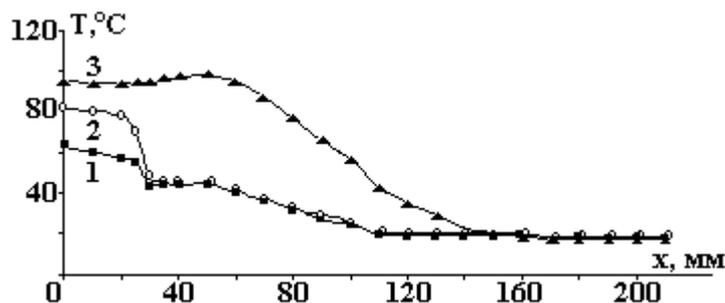


Рис. 6. СВЧ–нагрев составной структуры гипсовая штукатурка – дерево (ель): 1 –  $W_{шт} = 15\%$ ,  $W_{дер} = 25\text{--}40\%$  (по слоям),  $T_n = 18^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 90$  с; 2 –  $W_{шт} = 15\%$ ,  $W_{дер} = 25\text{--}40\%$  (по слоям),  $T_n = 18^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 120$  с; 3 –  $W_{шт} = 15\%$ ,  $W_{дер} = 25\text{--}40\%$  (по слоям),  $T_n = 18^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 240$  с

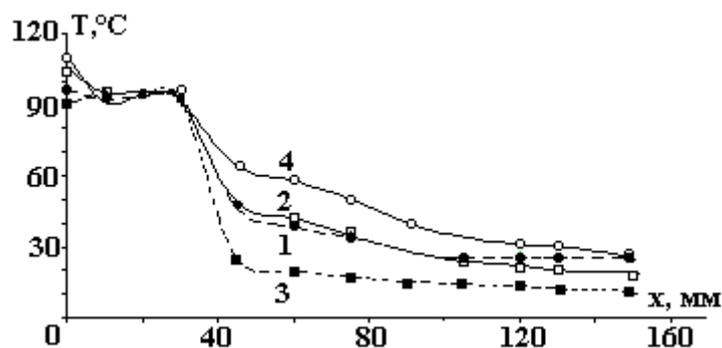


Рис. 7. СВЧ–нагрев составной структуры гипсовая штукатурка – кирпичная кладка: 1 –  $W_{шт} = 5\%$ ,  $W_{кир} = 4\%$ ,  $T_n = 16^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 240$  с; 2 –  $W_{шт} = 14\%$ ,  $W_{кир} = 10,1\%$ ,  $T_n = 10^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 180$  с; 3 –  $W_{шт} = 15\%$ ,  $W_{кир} = 10,1\%$ ,  $T_n = 18^{\circ}\text{C}$  (штукатурка),  $T_n = 14^{\circ}\text{C}$  (кирпич),  $\tau = 90$  с, 4 –  $W_{шт} = 15\%$ ,  $W_{кир} = 10,1\%$ ,  $T_n = 13^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 15$  мин

В целом картина температурного распределения с учетом влияния сушки соответствует известному в СВЧ-энергетике эффекту самовыравнивания влажностей [1, 6]. Наиболее влажные слои материала всегда нагреваются быстрее, но быстрее и сохнут. При длительном СВЧ-нагреве поверхностные слои высыхают и их дальнейший разогрев затрудняется (кривая 4 рис. 7). Вместе с тем глубинные слои по-прежнему продолжают интенсивно выделять СВЧ-энергию и поэтому разогреваются иногда в большей степени, чем поверхностные (кривая 5 рис. 4, кривая 3 рис. 6). Об эффекте самовыравнивания влажностей при СВЧ-энергоподводе косвенно свидетельствуют и данные рис. 4, 5. Так, кривая 4 рис. 5 (древесина  $W_n = 20\%$ ) носит гладкий характер, поскольку данный эксперимент проводился после снятия кривых 1, 2, 5 (рис. 5), то есть на одном и том же образце. Иначе говоря, перед постановкой эксперимента № 4 (кривая 4 рис. 5) образец уже претерпел СВЧ-высушивание, и распределение его влагосодержания по толщине стало более однородным. Эффектом самовыравнивания влажностей объясняется и гладкий характер кривой 2 рис. 4 (кирпичная кладка,  $W_n = 7\%$ ).

### Результаты

В целом полученные результаты дают возможность задать временные режимы процесса СВЧ-термообработки строительных материалов, обеспечивающие уничтожение вредителей. Согласно [1, 7], для уничтожения домового гриба в толще древесины и кирпичной кладки требуется осуществить подъем температуры до  $40^\circ\text{C}$  и далее выдержать материал при этой температуре в течение 10 мин. Для уничтожения жучка-точильщика температура в толще древесины должна быть доведена до  $65^\circ\text{C}$ , а выдержка составлять 3–4 мин. Задавшись глубиной прогрева кирпичной кладки 30 мм при стандартной толщине слоя штукатурки (30 мм), из приведенных экспериментальных данных находим требуемое время СВЧ-термообработки структуры гипсовая штукатурка–кирпичная кладка, необходимое для уничтожения домового гриба:  $\tau_{\text{нагр}} = 3\text{--}4$  мин при  $T_n = 16\text{--}18^\circ\text{C}$ ,  $W_{\text{шт}} = 5\text{--}15\%$ ,  $W_{\text{кир}} = 4\text{--}10\%$ . Время СВЧ-термообработки, необходимое для уничтожения жучка-точильщика в слое штукатурки и в толще древесины (на глубине вплоть до 60 мм), в структуре гипсовая штукатурка – древесина составит (при толщине штукатурки 30 мм):  $\tau_{\text{нагр}} = 4$  мин при  $T_n = 18^\circ\text{C}$ ,  $W_{\text{шт}} = 15\%$ ,  $W_{\text{дер}} = 25\text{--}40\%$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. СВЧ-энергетика / Под ред. Э. Окресса. Т. 2. М., 1971.
2. *Архангельский Ю.С.* СВЧ-электротермия. Саратов, 1998.
3. *Tinga W.R., Nilson S.O.* Dielectric properties of materials for Microwave procesing – tabulated // J. of Microwave Power. 1973. V. 8. № 1. P. 27–33.
4. *Hasted J.B., Shan M.A.* Microwave absorption by water in building materials // Brit. J. Appl. Phys., 1964. № 5. P. 825–836.
5. *Диденко А.Н., Зверев Б.В.* СВЧ-энергетика. М., 2000.
6. *Williams N.H.* Moisture leveling in paper, wood, textiles and other mixed dielectric sheets // J. of Microwave Power. 1966. V.1. P. 73–80.
7. *Bletchly J.D.* Very high frequency radio waves and wood boring insect control // *Holzforschung*, 1965. V.19. P. 47–52.

Поступила 20.05.04

### Summary

In regard to boring insect neutralization process temperature distributions in moist building materials being heated with the help of microwave apparatus are investigated and discussed. The objects of investigation were as follows: gypsum plaster, wood, red brick and also their compositions: gypsum – wood, gypsum plaster – red brick. Under the results of experimental research work there're proposed the time regimes to microwave heating process as applied to domestic mushroom, and Anobiidae beetle neutralization.