

*И.Ф. ДОМНИН*, д-р техн. наук, директор, Институт ионосферы,  
*М.М. РЕЗИНКИНА*, д-р техн. наук, гл.н.с., НТЦ МТО НАН Украины,  
*А.Е. ЧАГАН*, вед. инж. электронщик, Институт ионосферы, Харьков

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО НАГРЕВА ДЛЯ ОБРАБОТКИ СЛАБОПРОВОДЯЩИХ СРЕД (ОБЗОР)**

Проведений огляд літературних даних щодо використання високочастотного нагріву при обробці слабо провідних середовищ. Показано, що найбільш перспективним є застосування даного виду обробки при розплавленні асфальто-парафінових відкладень та зменшенні в'язкості нафти. Для вибору оптимальних режимів електромагнітного впливу на нафтопродукти пропонується використання математичного моделювання електротеплових процесів, що відбуваються.

Проведен обзор литературных данных относительно использования высокочастотного нагрева при обработке слабопроводящих сред. Показано, что наиболее перспективным является применение данного вида обработки при плавлении асфальто-парафиновых отложений и уменьшении вязкости нефти. Для выбора оптимальных режимов электромагнитного влияния на нефтепродукты предлагается использование математического моделирования происходящих электротепловых процессов.

The review of the literary sources on usage of the high frequency heating for weakly electrical conductive mediums processing has been carried out. It has shown that the most perspective spheres of this type of processing usage are melting of asphalt-paraffin depositions and petrol viscosity lessening. Elaboration of mathematical simulation tools for electrical heating processes description has been proposed for choice of optimum modes of electromagnetic influence upon petroleum products.

**Введение.** Согласно [1], области использования микроволновых электромагнитных полей (ЭМП) могут быть разделены на несколько категорий: 1) связь и передача информации; 2) обработка и производство; 3) диагностика и анализ; 4) медицина; 5) военная сфера. В настоящее время наиболее распространены две первые области применения. Основные преимущества использования микроволновых ЭМП для промышленной обработки - быстрая передача тепла к обрабатываемому материалу, объемный и местный нагрев, компактность оборудования, скорость включения и выключения, а также отсутствие загрязнения окружающей среды, т.к. нет продуктов сгорания [2].

В [3] указывается, что микроволновая обработка материалов является технологией, которая позволяет использовать методы по улучшению физических свойств сред; открывает возможности для воздействия на трудные в обработке материалы; уменьшает влияние технологических процессов на окружающую среду; обеспечивает ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами вследствие экономии энергии, уменьшения зоны, необходимой для проведения обработки, а также времени воздействия. Данная обработка открывает пути производства новых материалов и микроструктур, получение которых другими методами невозможно. В [3] отмечается, что данный вид воздействия связан с некоторыми трудностями. Дело в том, что из очевидной для всех легкости микроволновой обработки продуктов питания в получивших широчайшее распространение микроволновых печах отнюдь не следует, что другие

материалы могут быть подвергнуты подобному воздействию столь же легко. Эффективность микроволновой обработки пищи вызвана большим содержанием в ней воды, воздействие на которую микроволнового излучения весьма эффективно. Однако убеждение, что микроволновой обработке могут быть столь же легко подвергнуты другие среды, является ошибочным. Использование данной технологии требует выбора оптимальной частоты и мощности воздействующего излучения в зависимости от вида обрабатываемого материала.

Как отмечается в [3], к микроволновому излучению относятся электромагнитные волны частотой от 300 МГц до 300 ГГц. После успешного применения во время второй Мировой войны в радиолокационных системах, микроволновое излучение использовалось для нагрева материалов начиная с 1946 г. Первые бытовые микроволновые печи были представлены на рынке в 1952 г. В течение следующих лет микроволновые технологии получили повсеместное распространение. Обычно системы микроволновой обработки состоят из микроволнового источника, устройства, передающего мощность в образец, и системы управления нагревом. Наиболее распространенным источником при использовании микроволновых технологий является магнетрон; в качестве источников при микроволновой обработке используются также триоды, тетроды, пентоды, тиратроны, клистроны [3].

#### **Основные области промышленного применения микроволнового нагрева.**

*Производство керамики.* Возможность обработки керамики с помощью микроволнового излучения известна с 50-х годов 20-ого века. Последующие эксперименты в этой области показали, что при такой обработке керамику можно спекать при значительно более низких температурах, чем при электрическом резистивном нагреве. Этот феномен относят к так называемым микроволновым эффектам [1]. К таким эффектам относят также увеличение скорости активационных процессов, включающих процессы спекания, ионный обмен, химические реакции.

*Сушка древесины.* Одной из областей микроволнового нагрева является диэлектрическая сушка древесины. Данный процесс осуществляется на высоких и сверхвысоких частотах [4]. Для радиоэлектронных устройств, предназначенных для использования в промышленности и народном хозяйстве, выделены следующие диапазоны частот: ВЧ – 13 МГц, 26 МГц, 30 МГц; СВЧ – 433 МГц, 915 МГц, 2450 МГц [4]. При такой сушке древесины, СВЧ энергия в камеру с пиломатериалами подводится волноводными трактами, представляющими собой полые трубы прямоугольного или круглого сечения. Наибольшее распространение в качестве источника СВЧ энергии получили магнетроны. В данном случае нагрев производится путем передачи тепла снаружи внутрь за счет теплопроводности. При рациональном подборе частоты колебаний и параметров камер, где происходит преобразование СВЧ энергии в тепловую, можно получить относительно равномерное выделение тепла по объему обрабатываемого тела. В [4] отмечается, что эффективность

преобразования энергии электрического поля в тепло возрастает прямо пропорционально частоте колебаний и квадрату напряженности электрического поля. Однако с увеличением частоты электромагнитных колебаний уменьшается глубина их проникновения в обрабатываемый материал, поэтому для выбора оптимальных режимов требуются дополнительные исследования в зависимости от вида обрабатываемого изделия. В [4] отмечается также, что важным преимуществом СВЧ нагрева при обработке древесины является тепловая безинерционность процесса, т.е. возможность практически мгновенного включения и выключения теплового воздействия на обрабатываемый материал. В результате достигается высокая точность регулировки процесса нагрева и его воспроизводимость. Важным преимуществом СВЧ обработки древесины является также возможность осуществления и практического применения избирательного, равномерного, сверхчистого, саморегулирующегося нагрева [4]. Проведенные исследования [5] показывают, что при микроволновой сушке древесины снижается уровень так называемых летучих органических веществ, содержание которых в некоторых странах (например, США), строго контролируется. В [6] показано, что длительность микроволновой сушки древесины уменьшается более чем в 10 раз по сравнению с традиционной обработкой.

*Переработка отходов.* Еще одной перспективной областью использования микроволнового нагрева является переработка отходов и мусора, в частности шин и пластика [7]. Перспективным представляется также уничтожение инфекционных клинических отходов в медицинских учреждениях с помощью микроволновых технологий [8].

*Обработка нефти и нефтепродуктов.* К одной из наиболее перспективных областей применения микроволновой обработки относится добыча и отбор нефти и нефтепродуктов из скважин и резервуаров. При этом используются ЭМП микроволнового и радиочастотного диапазонов. В [9] описаны экспериментальные исследования по физическому моделированию процессов нагрева веществ различной вязкости, имитирующих нагрев нефтепродуктов.

Большой объем публикаций посвящен использованию технологий на основе микроволнового нагрева для добычи нефтепродуктов из нефтесодержащих шельфов [10-12].

Рассматриваются также схемы микроволнового разогрева нефтепродуктов в трубопроводах. Так, в [13] показана возможность применения ВЧ и СВЧ излучения для прогрева нефтепродуктов в скважинах и участках нефтепроводов, простаивающих из-за образования газогидратных и парафиновых пробок. При этом предлагается использовать введенную в трубопровод при его монтаже систему взаимодействия волн СВЧ диапазона с нефтепродуктами, связанную электрически с источником СВЧ энергии.

**Физические основы процесса микроволнового нагрева.** Известно, что омический нагрев проводников микроволнами неэффективен. Это связано с крайне малой величиной скин-слоя на микроволновых частотах даже для са-

мых плохо проводящих металлов. В то же время, весьма эффективным может оказаться микроволновой нагрев диэлектриков, который связан с изменением ориентации индуцированных или постоянных диполей в виде реакции на изменяющееся приложенное микроволновое ЭМП. В том случае, когда ЭМП изменяется с частотой, близкой к собственной частоте, с которой может происходить переориентация диполей данного вещества, имеет место максимум поглощения энергии, и нагрев оказывается наиболее эффективным. Согласно [3], для достижения оптимального нагрева необходимо обеспечение сбалансированного сочетания значений действительной части комплексной диэлектрической проницаемости обрабатываемого материала ( $\epsilon'$ ) для того, чтобы глубина проникновения в него электромагнитной волны была достаточной, и больших потерь за счет максимальных значений мнимой части  $\epsilon''$ . Еще одним условием для эффективной микроволновой обработки является высокая теплопроводность обрабатываемого материала, а значит быстрая диссипация тепла в обрабатываемом объеме.

Токи, приводящие к нагреву диэлектриков при воздействии на них микроволнового излучения, зависят от комплексной диэлектрической проницаемости материала [14]:

$$\epsilon \epsilon_0 = \epsilon_0 \cdot (\epsilon_r' - j\epsilon_r''),$$

где  $\epsilon_0 = 0,885 \cdot 10^{-11}$  Ф/м;  $\epsilon_r'$  - относительная диэлектрическая проницаемость;  $\epsilon_r''$  - мнимая часть диэлектрической проницаемости, называемая коэффициентом диссипации или коэффициентом потерь.

Потери в диэлектрике часто характеризуют  $\tan \delta = \epsilon_r'' / \epsilon_r'$  - тангенсом угла диэлектрических потерь.

Как отмечается в [14], основным фактором, определяющим диэлектрические потери на радиоволновых и микроволновых частотах, является так называемая “ориентационная поляризация”, которая имеет место в материалах, состоящих из молекул или частиц с постоянным дипольным моментом. Приложенное электрическое поле вызывает переориентацию диполей с частотой приложенного ЭМП в зависимости от направления вектора электрического поля. Инерционное сопротивление такому вращению вызывает механическое трение и термическое возбуждение. Таким образом, энергия электрического поля преобразуется в тепловую энергию, что и является основой для высококачественного нагрева диэлектриков.

Вращающаяся поляризация является не единственным механизмом диэлектрических потерь в высокочастотных ЭМП. Например, существуют потери за счет наличия проводящих включений, потери на границах раздела сред и др. Однако все эти диэлектрические потери могут быть описаны при помощи слагаемого  $\epsilon_r''$ . Следует отметить, что в отличие от джоулевых потерь, потери в диэлектриках являются частотно-зависимым и не могут присутствовать в статических полях.

В [15] приводится постановка задачи расчета возбуждения в диссипативной среде электромагнитного поля антеннами. Выполнены также приме-

ры численного моделирования поля полосковой антенны. Согласно большинству литературных источников (см. например, [10,16,17]), задача выбора параметров микроволнового электромагнитного воздействия на диссипативные среды должна содержать решение уравнения теплопроводности. Для того чтобы выбрать оптимальные режимы электромагнитного воздействия на нефтепродукты, целесообразным представляется использование математического моделирования происходящих электротепловых процессов. При этом необходимо учесть нелинейную зависимость проводимости нефтепродуктов от температуры их нагрева.

**Заключение.** Проведенный обзор литературных данных, касающихся использования высокочастотного нагрева для обработки слабопроводящих сред, показал, что наиболее перспективным представляется применение данного вида обработки при расплавлении асфальто-парафиновых отложений и уменьшении вязкости нефти. Для выбора оптимальных режимов электромагнитного воздействия на нефтепродукты может быть использовано математическое моделирование происходящих электротепловых процессов.

**Список литературы:** 1. Clark D.E., Folz D.C., McGee T.D. An introduction to ceramic engineering design. - American Ceramic Society, Westerville, Ohio, USA, 2002, 446 p. 2. <http://www.pueschner.com/downloads/MicrowaveHeating.pdf>. 3. Materials Research Advisory Board, Microwave Processing of Materials, National Research Council, Publication NMA4-473: National Academy Press, 1994, 164 p. 4. Гапеев Ф.Х. Сушка древесины электромагнитными волнами // Деревообрабатывающее оборудование (ЛПИИ). - 2004. - № 9 (22). - С. 74-78. 5. Wang S., Du G. Zhang Ya. Microwave wood drying: energy consumption, VOC emission and drying quality // Proc. of 3-d Inter-American Drying Conference. - 2005. - Paper III-4. - 10 p. 6. Bartholme M., Avramidis G., Viol W., Khazrapour A. Microwave drying of wet processed wood fibre insulating boards // Eur. J. Wood Prod. - 2009. - Vol. 67. - P. 357-360. 7. Appleton T.J., Collder R.L., Kingman S.W., et. al. Microwave technology for energy-efficient processing of waste // Applied Energy. - 2005. - N 81. - P. 85-113. 8. Treatment Alternatives for Medical Waste Disposal // Program for Appropriate Technology in Health Seattle (USA). - 2005. - 18 p. ([http://www.path.org/files/TS\\_trt\\_alt\\_med\\_wst\\_disp.pdf](http://www.path.org/files/TS_trt_alt_med_wst_disp.pdf)). 9. Kashif M., Yahya N., Zaid H.M., et. al. Oil recovery by using electromagnetic waves // Journal of Applied Sciences. - 2011. - N 8. - P. 366-1370. 10. Балакирев В.А., Сотников Г.В., Ткач Ю.В. Микроволновые методы интенсификации добычи нефти (Обзор) // Электромагнитные явления. - 2001. - Т. 2, № 2(6). - С. 255-288. 11. Sahni A., Kumar M., Knapp R.B. Electromagnetic heating methods for heavy oil reservoirs // Proc. of Society of Petroleum Engineers SPE/AAPG Western Regional Meeting, Long Beach (CA) 62550. - 2000. - 12 p. 12. Bridges J.E., Krstansky J.J., Taflove A., et. al. The ITRI in-situ RF fuel recovery process // J. of Microwave Power. - 1983. - V. 18, N 1. - P. 3-14. 13. Морозов Н.Н., Каукаченко Г.В. Микроволновый разогрев нефтепродуктов в трубопроводах // Вестник Мурманского Государственного Технического Университета. - 2010. - Том 13, вып. 4. - С. 974-976. 14. Mehdizadeh M. Microwave/RF applicators and probes for material heating, sensing and plasma generation. A design guide. - San Diego (CA), USA: Elsevier, 2010, 389 p. 15. Домнин И.Ф., Поспелов Л.А., Андреев А.Е. и др. Электромагнитные технологии модификации свойств диссипативных сред углеводородов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: «Радиофизика и ионосфера». - Харків: НТУ «ХПИ». - 2010. - № 48. - С. 120-137. 16. Балакирев В.А., Сотников Г.В., Ткач Ю.В., Яценко Т.Ю. Разрушение асфальто-парафиновых отложений в нефтяных трубопроводах движущимся источником высокочастотного электромагнитного излучения // Журнал технической физики. - 2001. - Т. 71, вып. 9. - С. 1-8. 17. Alpert Y., Je, rby E. Coupled thermal-electromagnetic model for microwave heating of temperature-dependent dielectric media // IEEE Transactions on Plasma Science. - 1999 - Vol. 27, No. 2. - P. 555-562.

Поступила в редколлегию 07.10.2011