

## ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ СВЧ-УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ УГЛЕВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

© 2014 Е.И. Бахонина, Н.С. Шулаев, А.В. Бахонин

Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
филиал в г. Стерлитамаке

Поступила в редакцию 24.10.2013

В представленной работе приводится метод расчета температурных режимов при переработке углеводородсодержащих отходов с использованием электромагнитного излучения СВЧ диапазона. Метод расчета позволяет при заданном составе отходов и их физико-химических свойств определять мощность излучения, время обработки и суммарные энергозатраты.

*Ключевые слова:* углеводороды, теплоемкость, электромагнитное излучение, температура.

Существует широкий спектр методов переработки отходов промышленного производства, в том числе и углеводородсодержащих [1-8]. Однако, учитывая, что ни один из видов отходов не отнесен к категории товарной продукции соответствующей отрасли, а предприятия не полностью контролируют состав и другие параметры отходов, то остается актуальным решение проблемы их эффективной утилизации и переработки. Таким образом, необходима технология, позволяющая перерабатывать практически любой спектр углеводородсодержащих отходов, в том числе и с твердыми включениями при значительных изменениях состава отхода. Несомненно, что промышленность заинтересована в технологиях, адаптирующихся к изменению состава отходов [1]. Оптимальным решением по углеводородсодержащим отходам является возврат углеводородного составляющего в технологические циклы и использование остатка в долгоживущих сооружениях, например, в дорожном строительстве. Известные методы воздействия на углеводородсодержащие отходы с целью их утилизации и обезвреживания (термические, химические, биологические и т.д.) не позволяют ввиду наличия целого ряда ограничений адаптироваться к изменению физико-химических свойств отхода.

Значительный потенциал заложен в использовании для обработки различных сред явления нагрева веществ под действием электромагнитного излучения СВЧ-диапазона. В этом случае трансформация электромагнитной энергии в тепловую происходит за счет возбуждения СВЧ-

полем колебаний молекул технологической среды, что значительно интенсифицирует энергообмен, исключая теплопередачу через стенку и объем вещества, обеспечивая высокий КПД использования энергии. При этом наличие механических включений не является препятствием для проведения процесса переработки такого вида отходов [2].

Используя в качестве энергоносителя СВЧ-излучение, можно осуществлять ступенчатое превращение и утилизацию отходов. Такая технология переработки отходов позволяет разделять фракции, создавая возможность использования их в виде сырья и полупродуктов производства.

Остаток, который после испарения углеводородсодержащей составляющей будет содержать большее, чем в исходном отходе количество неорганических включений, наиболее эффективно направить на компаундирование в асфальтовую смесь для дорожного строительства [1, 3].

Как в случае захоронения отходов в необорудованные хранилища, так и в специально спроектированных полигонах при извлечении отходов на переработку будет наблюдаться изменение состава каждой выгрузки как в части углеводородной составляющей, так и неорганической.

Для создания технологических установок по переработке углеводородсодержащих отходов, использующих в качестве энергоносителя электромагнитное излучение СВЧ диапазона, необходима разработка методов расчета связывающих объем и химический состав отходов, мощность электромагнитного излучения и температуру переработки и теплообмен с окружающей средой. Данная работа посвящена решению этой проблемы.

Изменение температуры перерабатываемых отходов при поглощении энергии электромагнитного поля определяется уравнением теплопроводности:

*Бахонина Елена Игоревна, кандидат технических наук, доцент кафедры экологии и рационального природопользования. E-mail: helenabaho@mail.ru*

*Шулаев Николай Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информатики, математики и физики. E-mail: nshulayev@rambler.ru*

*Бахонин Алексей Васильевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой технической механики. E-mail: bahonin@mail.ru*

$$c\rho \frac{dT}{dt} = \text{div}(\lambda \text{grad}T) + I_q, \quad (1)$$

где  $c$  – усредненная удельная теплоемкость смеси;

$\rho$  – плотность;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемой среды;

$I_q$  – объемная плотность источников тепла, возникающих при поглощении электромагнитного излучения и потерь за счет теплообмена с окружающей средой;

$\text{div}$ ,  $\text{grad}$  – дифференциальные операторы.

Учитывая особенности нагрева СВЧ-излучением, при котором достигается однородность распределения температуры во всем объеме

$$\text{div}(\lambda \text{grad}T) \ll I_q$$

уравнение (1) принимает вид:

$$c\rho \frac{dT}{dt} = I_q - \alpha ST, \quad (2)$$

$$I_q = P/V,$$

где  $P$  – мощность СВЧ-излучения (мощность магнетрона), Вт;

$V$  – объем обрабатываемой среды, м<sup>3</sup>;

$\alpha$  – объемный коэффициент теплообмена со

стенками реактора,  $\left(\frac{Вт}{м^2 К}\right) / М^3$ ;

$S$  – площадь поверхности контакта обрабатываемого вещества со стенками реактора.

Решение уравнения (2) можно представить в виде

$$T(t) = \frac{I_q}{\alpha S} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\alpha S}{c\rho} t}\right), \quad (3)$$

где  $T_b(t)$  – температура обрабатываемого вещества;

$T_c$  – температура окружающей среды.

Если обрабатываемая среда состоит из смеси жидких компонентов и “сухого” остатка, то кинетика нагрева определяется следующими соотношениями.

На первом этапе нагревается вся среда до температуры кипения компонента, имеющего самое низкое значение этой величины  $T_1$ . Мощность излучения, необходимая для достижения этого значения температуры, определяется по формуле

$$P_1 = T_1 \alpha S V, \quad (4)$$

а время нагрева

$$t_1 = 5 \frac{c\rho}{\alpha S}. \quad (5)$$

Для испарения этого компонента при температуре  $T_1$  потребуется дополнительно энергия СВЧ-излучения

$$Q_1 = \lambda_1 \cdot m_1, \quad (6)$$

где  $\lambda_1$  – удельная теплота испарения данного вещества;

$m_1$  – его масса.

А время испарения определяется по формуле:

$$t_1' = \frac{\lambda_1 m_1}{P_1}. \quad (7)$$

Суммарное время отгонки 1-ого компонента

$$t_1 = 5 \frac{c\rho}{\alpha S} + \frac{\lambda_1 m_1}{P_1}. \quad (8)$$

На втором этапе оставшаяся часть смеси массой  $(m - m_1)$ , плотностью  $\rho_1$ , объемом  $V_1$ , площадью поверхности обрабатываемой среды, соприкасающейся со стенками реактора, нагревается до температуры кипения  $T_2$  следующего компонента

$$T_2 - T_1 = \Delta T_2 = \frac{P_2}{\alpha S_1 V_1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\alpha S_1}{c_1 \rho_1} t}\right) \quad (9)$$

при этом мощность излучения и время обработки до полной отгонки 2-ого компонента определяется следующими соотношениями

$$P_2 = \Delta T_2 \alpha S_1 V_1, \quad (10)$$

$$t_2 = 5 \frac{c_1 \rho_1}{\alpha S_1} + \frac{\lambda_2 m_2}{P_2}, \quad (11)$$

где  $m_2$ ,  $\lambda_2$  – масса и удельная теплота испарения 2-ого компонента.

Аналогично для  $i$ -ого компонента

$$P_i = \Delta T_i \alpha S_{i-1} V_{i-1}, \quad (12)$$

$$t_i = 5 \frac{c_{i-1} \rho_{i-1}}{\alpha S_{i-1}} + \frac{\lambda_i m_i}{P_i}, \quad (13)$$

$$T_i - T_{i-1} = \Delta T_i = \frac{P_i}{\alpha S_{i-1} V_{i-1}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\alpha S_{i-1}}{c_{i-1} \rho_{i-1}} t}\right). \quad (14)$$

На последнем этапе (“сухой” остаток) темп возрастания температуры определится по формуле:

$$T_c = T_i + \Delta T = \Delta T_c = \frac{P_c}{\alpha S_c V_c} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\alpha S_c}{c_c \rho_c} t}\right). \quad (15)$$

При заданной температуре  $T_c$  время обработки на последнем этапе равно:

$$t_c = \frac{c_c m_c (T_c - T_i)}{P_c}, \quad (16)$$

где  $c_c, m_c$  – теплоемкость и масса “сухого” остатка;

$P_c$  – мощность излучения на финишной стадии обработки.

Таким образом, полное время обработки

$$t = \sum_{i=1}^n t_i + t_c, \quad (17)$$

а удельные энергозатраты (Дж/кг) составляют

$$W_{y\partial} = \left( \sum_{i=1}^h P_i t_i + P_c t_c \right) / m. \quad (18)$$

Полученные соотношения позволяют при заданном составе обрабатываемых отходов и их свойствах определять мощность излучения, время обработки на каждом этапе, а также суммарные энергозатраты, в зависимости от теплообмена с окружающей средой, определяемой конструктивными параметрами реакционного устройства.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бахонина Е.И.* Разработка адаптивной технологии переработки углеводородсодержащих отходов нефтехимии с использованием электромагнитного излучения СВЧ-диапазона: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Уфа, 2008. 24 с.
2. Микроволновое излучение и интенсификация химических процессов / *Д.Л. Рахманкулов, И.Х. Бикбулатов, Н.С. Шулаев, С.Ю. Шавишкова*. М.: Химия, 2003. 220 с.
3. *Бахонина Е.И.* Подготовка к утилизации углеводородсодержащих отходов с применением микроволн // Башкирский химический журнал. 2006. Т.13. №3. 70-72 с.
4. *Васильев А.В.* Экологический мониторинг физических загрязнений на территории Самарской области. Снижение воздействия источников загрязнений: монография. Самара, 2009.
5. *Васильев А.В.* Перспективы и проблемы создания химических парков: пути снижения негативного экологического воздействия (на примере ЗАО "Тольяттисинтез") // В сборнике: ELPIT-2013. Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов. Сборник трудов IV международного экологического конгресса (VI Международной научно-технической конференции, научный редактор: А.В. Васильев. 2013. С. 41-45.
6. *Васильев А.В., Васильева Л.А.* Основы кластерного подхода. Кластер вторичных ресурсов Самарской области. В сборнике: ELPIT-2013. Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов // Сборник трудов IV международного экологического конгресса (VI Международной научно-технической конференции. Научный редактор: А.В. Васильев. 2013. С. 34-40.
7. *Васильев А.В.* Исследование токсичности органических отходов на территории бывшего ОАО "Фосфор". В сборнике: ELPIT-2013. Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов // Сборник трудов IV международного экологического конгресса (VI Международной научно-технической конференции. Научный редактор: А.В. Васильев. 2013. С. 46-51.
8. *Дегтерёва М.С., Васильев А.В.* Мониторинг влажности биохимических процессов при компостировании органических отходов с помощью использования нейросетевого адаптированного сенсора влажности // В сборнике: ELPIT-2013. Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов: сборник трудов IV Международного экологического конгресса (VI Международной научно-технической конференции). Научный редактор: А.В. Васильев. 2013. Т. 4. С. 77-82.

### THERMAL DESIGN OF MICROWAVE DEVICES FOR HYDROCARBON WASTE TREATMENT

© 2014 E.I. Bakhonina, N.S.Shulaev, A.V. Bakhonin

Branch of Ufa State Oil Technical University in Sterlitamak

In the presented work a method over of calculation of temperature conditions is brought at processing of wastes, containing hydrocarbon, with the use of electromagnetic radiation of microwave range. The method of calculation allows at the set composition of wastes and their physical and chemical properties to determine power of radiation, time of treatment and total energy.

Keywords: hydrocarbons, heat capacity, electromagnetic radiation, temperature.

*Elena Bakhonina, Candidate of Technics, Associate Professor at the Ecology and Rational Environmental Management.*

*E-mail: helenabaho@mail.ru*

*Nikolay Shulaev, Doctor of Technics, Head at the Informatics, Mathematics, Physics Department.*

*E-mail: nshulayev@rambler.ru*

*Aleksey Bakhonin, Candidate of Technics, Head at the Technical Mechanics Department. E-mail: bahonin@mail.ru*