

УДК 665.765.035

УДЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ВЕЩЕСТВА, СИНТЕЗИРОВАННОГО С ПОМОЩЬЮ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ

У. Юсупалиев, Ю. М. Егоров

Исследован процесс образования вещества из смеси базовой диэлектрической жидкости и присадок, синтезируемого воздействием СВЧ излучения. Из рассмотрения баланса энергии такого процесса найдена удельная энергия образования синтезируемого вещества. Проведено сравнение термического способа синтеза вещества с предложенным методом и показана экономическая выгода последнего.

В последнее время для получения из смеси диэлектрической жидкости и присадок вещества с заданными физико-химическими свойствами стали использовать воздействие СВЧ излучения на исходные составляющие [1]. При этом, естественно, возникает необходимость определения удельной энергии, затраченной на образование единицы массы данного вещества из его исходных составляющих. Традиционно удельная теплота образования определяется с помощью специальных калориметров, в которых для получения вещества используется обычный тепловой нагрев [2, 3]. Применительно к нашей задаче такие калориметры для определения удельной энергии синтеза не годятся потому, что для синтеза вещества используется СВЧ излучение, а не тепловая энергия. Кроме того, выяснилось, что для ввода энергии в такие калориметры от СВЧ-генератора необходимо практически полностью изменить их конструкцию. В связи с этим в данной работе были проведены исследования с целью определения удельной энергии образования вещества, синтезируемого посредством воздействия СВЧ излучения на его исходные составляющие.

Экспериментальная установка. Для проведения исследования была создана установка, состоящая из магнетрона мощностью ~ 1 кВт, рабочей камеры – резонатора, согласованного с нагрузкой излучателя, трубопровода, насоса, датчиков температуры,

системы регистрации и обработки данных. Рабочая камера объемом 100 л была изготовлена из листовой нержавеющей стали толщиной 2 мм. Ввод СВЧ излучения от магнетрона в камеру осуществлялся через ее верхнюю крышку с помощью согласованного излучателя. Для этого на крышке было проделано отверстие, а два боковых отверстия камеры были предназначены для осуществления механического перемешивания базовой диэлектрической жидкости и необходимых присадок. К этим двум отверстиям подварены трубы диаметром 20 мм, другие концы которых соединены с насосом. Поскольку для синтеза вещества сначала необходимо создать однородную смесь базовой диэлектрической жидкости и присадок путем механического перемешивания, то эту функцию и выполнял насос производительностью 1.1 л/с.

Датчики температуры предназначены для измерения как температуры жидкости внутри камеры, так и температуры на внешней поверхности камеры, а также распределения температуры воздуха по мере удаления от камеры. С помощью системы регистрации и обработки данных осуществлялись сбор информации, ее хранение и обработка по определенному алгоритму.

Точность измерения мощности СВЧ излучения магнетрона составляла порядка (1.5 – 2.0)%, т.е. $\pm(10 - 15) \text{ Вт}$, а точность измерения температуры – $\pm 0.3^\circ\text{C}$. Проверка соответствия свойств синтезированного вещества определенным стандартам по ГОСТу проводилась в специализированных лабораториях, имеющих лицензию на право проведения таких работ.

Для нахождения удельной энергии образования вещества использовался метод энергетического баланса процесса синтеза, для чего одновременно проводились измерения вводимой в рабочую камеру мощности СВЧ-генератора, температуры синтезируемого вещества, температуры внешней поверхности рабочей камеры и температуры окружающего воздуха в трех точках по мере удаления от наружной поверхности рабочей камеры.

Баланс энергии процесса синтеза. Энергия магнетрона $E_{\text{СВЧ}}$ расходуется на нагрев синтезируемого вещества $E_{\text{НАГР}}$ и непосредственно на синтез определенного количества вещества с требуемыми физико-химическими свойствами $E_{\text{СИНТЕЗ}}$. При этом происходит неизбежная потеря энергии с поверхности S рабочей камеры, заполненной синтезируемым веществом массой m , вследствие теплового излучения $E_{\text{Ч.Т.}}$, а также процесса теплопередачи и свободной конвекции $E_{\text{П.Т.}}$. Баланс энергий процесса синтеза имеет вид:

$$E_{СВЧ} = E_{НАГР} + E_{СИНТЕЗ} + E_{П.Т.} + E_{Ч.Т.} \quad (1)$$

В соотношении (1) все слагаемые кроме $E_{СИНТЕЗ}$ экспериментально определяются, если известна зависимость температуры нагрева от времени. Тогда можно найти и величину $E_{СИНТЕЗ}$. Измерения температуры нагрева синтезируемого вещества показали, что в пределах ошибки измерений зависимость температуры нагрева от времени практически является линейной. Тогда потери энергии $E_{П.Т.}$ и $E_{Ч.Т.}$ можно определить по следующим формулам [4, 5]:

$$E_{П.Т.} = \int_0^{\tau} \frac{S \cdot [T(t) - T_H]}{\left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}\right]} dt = 0.5 \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot S \cdot \tau, \quad (2)$$

$$E_{Ч.Т.} = \int_0^{\tau} \delta \cdot \sigma \cdot S \cdot [T^4(t) - T_H^4] dt = \delta \cdot \sigma \cdot S \cdot \tau \cdot \left[\frac{T_K^4 - T_H^5}{5 \cdot (T_K - T_H)} - T_H^4 \right], \quad (3)$$

где $\lambda = 45 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ – коэффициент теплопроводности материала рабочей камеры, $\alpha_1 = 1395 \text{ (Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – коэффициент теплоотдачи жидкого диэлектрика стенке рабочей камеры, α_2 – коэффициент теплоотдачи стенки рабочей камеры окружающему воздуху в $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $d = 2 \text{ мм}$ – толщина стенки рабочей камеры, $\delta = 0.25$ – излучательная способность материала стенки рабочей камеры, T_H и T_K – начальная и конечная температуры синтезируемого вещества, $S = 0.85 \text{ м}^2$ – площадь поверхности рабочей камеры, σ – постоянная Стефана–Больцмана, τ – длительность воздействия СВЧ излучения на синтезируемое вещество.

На самом деле температура окружающей среды отличается от начальной температуры смеси, подогретой в процессе перемешивания, однако эта разница не скажется на результатах вычислений.

Коэффициент α_2 теплоотдачи стенки рабочей камеры окружающему воздуху зависит от режима свободной конвекции и поэтому определяется числом Нуссельта Nu : $\alpha_2 = Nu \left(\frac{\theta}{h}\right)$, где $\theta = 2.96 \cdot 10^2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°С})$ – коэффициент теплопроводности воздуха, h – высота рабочей камеры (м). В свою очередь, число Nu найдем из уравнения, описывающего свободную конвекцию. При вертикальном и горизонтальном расположении поверхностей рабочей камеры в неограниченном пространстве теплоотдача при свободной конвекции определяется уравнением [4, 5]:

$$Nu = k \cdot (Gr \cdot Pr)^n, \quad (4)$$

где $Gr = \frac{h^3 \Delta T g}{T_{CP} \nu^2}$ – число Грасхофера, Pr – число Прандтля, $\nu = 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ – кинематическая вязкость воздуха, $g = 9.8 \text{ м}/\text{с}^2$ – ускорение свободного падения, $T_{CP} = 0.5 \cdot (T_K + T_H)$, $\Delta T = T_K - T_H$. Постоянные k и n в уравнении (4) зависят от режима свободной конвекции, а точнее – от безразмерного комплекса $(Gr \cdot Pr)$, и их значения приводятся в таблице [4, 5]:

$(Gr \cdot Pr)$	k	n
$10^{-2} - 5 \cdot 10^2$	1.18	1/8
$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0.54	1/4
$2 \cdot 10^7 - 10^{13}$	0.135	1/3

Для наших условий находим значение безразмерного комплекса $(Gr \cdot Pr) = 39.55 \cdot 10^9$. Этой величине комплекса в таблице соответствуют: $k = 0.135$ и $n = 1/3$. Подставляя эти значения в уравнение (4), находим $Nu = 0.135(Gr \cdot Pr)^{1/3}$, а затем определяем коэффициент теплоотдачи стенки рабочей камеры α_2 окружающему воздуху и далее энергию $E_{Т.П.}$, потерянную вследствие теплопередачи и свободной конвекции.

Длительность воздействия СВЧ излучения τ на синтезируемое вещество с массой $m = 63 \text{ кг}$ при одновременном механическом перемешивании составляла 780 с. За этот промежуток времени СВЧ-генератором была затрачена энергия $E_{СВЧ} = (780 \pm 7) \text{ кДж}$. При указанных параметрах СВЧ-генератора и синтезируемого вещества были получены заданные физико-химические свойства, соответствующие установленным стандартам ГОСТ. После установления необходимой мощности и длительности воздействия СВЧ излучения для синтеза вещества с массой $m = 63 \text{ кг}$ при тех же условиях, но без воздействия СВЧ излучения, была измерена его температура нагрева. Нагрев синтезируемого вещества за счет механического перемешивания составил 5 К. Знание нагрева за счет механического перемешивания позволило определить непосредственный нагрев синтезируемого вещества СВЧ излучением, который составил $\Delta T_{СВЧ} = 6 \text{ К}$. Это соответствует тепловой энергии, затраченной на нагрев синтезируемого вещества $E_{НАГР} = m \cdot C_p \cdot \Delta T \approx (718 \pm 10) \text{ кДж}$ (здесь $C_p \approx 1.9 \text{ кДж}/(\text{кгК})$ – теплоемкость синтезируемого вещества [6, 7]). При таком нагреве ($\Delta T_{СВЧ} = 6 \text{ К}$) вычисления по (2) – (4) для потерь за счет теплового излучения, процесса теплопроводности и свободной конвекции дают значения $E_{Ч.Т.} \approx 1.6 \text{ кДж}$, $E_{Т.П.} \approx (22 \pm 2) \text{ кДж}$.

Итак, из (1) следует, что доля энергии СВЧ-генератора, затраченная на синтез вещества массой $m = 63 \text{ кг}$, не превышает значения $E_{СИТЕЗ} \leq (40 \pm 5) \text{ кДж}$, т.е. удельная энергия образования синтезированного вещества не превышает $(0.63 \pm 0.08) \text{ кДж}/\text{кг}$.

Сравним энергетическую эффективность предлагаемого метода синтеза жидкого диэлектрика с традиционным (термическим) способом.

Суть термического способа синтеза состоит в следующем. В специальный бак (объемом от 300 до 500 л) наливают базовую диэлектрическую жидкость и повышают ее температуру до 60 °С с помощью газовых горелок [6, 7], добавляя затем в нагретую жидкость по очереди специальные присадки. После ввода каждой присадки проводится (обычно в течение 10 – 15 минут) тщательное размешивание до получения однородной смеси. Этот процесс осуществляется с помощью специального насоса. После добавления всех присадок температуру полученной однородной смеси выдерживает при 60 °С в течение 4 – 6 часов в зависимости от марки синтезируемого вещества [6, 7].

Величина энергии, затраченной при термическом способе получения вещества той же массы (63 кг), составляет 5.62 МДж: для нагрева синтезируемого вещества от 20 до 60 °С требуется 4.7 МДж, для поддержания этой температуры в течение 4 часов затрачивается энергия $E_{т.п.} + E_{ч.т.} \approx (0.4 + 0.52) \text{ МДж}$.

Итак, общие энергетические затраты при синтезе вещества на основе СВЧ технологии практически в 7 раз меньше, чем при термическом способе.

Исследование свойств синтезированного вещества показало, что предлагаемый способ синтеза вещества имеет и другие преимущества, кроме указанного. Так, вещества обладают лучшими физико-химическими характеристиками по сравнению с соответствующими характеристиками веществ, полученных термическим способом.

Из приведенных данных следует, что механизм образования вещества при воздействии СВЧ излучения отличается от термического механизма. При этом, оказывается, для синтеза заданного количества вещества требуется меньшая длительность воздействия и меньшая мощность СВЧ излучения по сравнению с термическим механизмом синтеза. Изучение влияния параметров СВЧ излучения на скорость агрегативных и химических процессов представляет важный практический интерес, что является предметом отдельного исследования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Патент РФ N 2158175 от 07.02.2000 г. Авторы: Егоров Ю. М., Бобков С. Н., Люшин В. В. и др.
- [2] Уэндланд У. Термические методы анализа, М., Мир, 1978.
- [3] Скурагов С. М., Колесов В. П., Воробьев А. Ф. Термохимия, Часть 1, 2, М., Химия, 1964 – 1966.

- [4] К у т а т е л а д з е С. С., Б о р и ш а н с к и й В. М. Справочник по теплопередаче, М., Госэнергоиздат, 1975.
- [5] Справочник по энергетике, М., Энергия, 1991.
- [6] Топливо, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение. Справочное издание. Под ред. В. М. Школьников, М., Госэнергоиздат, 1989.
- [7] Ч е р н о ж у х о в Н. И. Технология переработки нефти и газа. Часть 3. Очистка нефтепродуктов и производство специальных продуктов, М., Госэнергоиздат, 1966.

Институт общей физики
им. А. М. Прохорова РАН

Поступила в редакцию 5 сентября 2006 г.