Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
==========

УДК 664.8.086.2.061.3

Теоретическое обоснование применения СВЧ-поля для извлечения экстрактивных веществ из растительного сырья

Копысова Т.С.[1], Спиридонов А.Б.[1], Иванов А.Г.[1], Закирова Р.Р.[2], Гадлгареева Р.Р.[1]

[1]Ижевская государственная сельскохозяйственная академия
[2]Удмуртский государственный университет

Аннотация

Современные технологии получения экстрактивных веществ из растительного сырья должны сочетать высокую скорость извлечения функциональных элементов при сохранении их биологической ценности. Одним из таких способов является экстрагирование в холодной воде с облучением СВЧ-полем. Разработанная математическая модель является инженерной методикой расчета и обоснования параметров установки периодического действия с указанным принципом работы. Согласно методике, можно обосновать мощность СВЧ-магнетронов, обеспечивающих должное воздействие на процесс экстракции без перегрева рабочей среды.

Ключевые слова: СВЧ-ПОЛЕ, МАГНЕТРОН, МЕТОДИКА, УРАВНЕНИЕ ОКРУЖНОСТИ, МОДЕЛЬ, МОЩНОСТЬ МАГНЕТРОНА, ВРЕМЯ ОБРАБОТКИ, ТЕМПЕРАТУРА НАГРЕВА, ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ЦИКЛА

В работе авторов [1] представлено описание технологии низкотемпературной экстракции компонентов растительного сырья под действием СВЧ-поля. Экстракция осуществляется на установке, схема которой представлена на рис. 1.

В корпус аппарата 1 заливается чистая вода. В сетчатые стаканы 2, изготовленные из пластика, засыпается сухая мята. Стаканы устанавливаются внутри корпуса аппарата в подстаканники. Они установлены на спицах ротора, который приводится во вращение от электродвигателя. Подвижная часть аппарата выполняет роль перемешивающего устройства, что улучшает массообменные процессы в растворе 3. При включении питания электродвигателя ротор вместе со стаканами вращается внутри корпуса, проходя

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

поочередно около волноводов СВЧ-энергии 4. Обработка части раствора, находящейся вблизи СВЧ-волновода, происходит непрерывно, однако перемешиваемые объёмы раствора попадают в зону обработки периодически, что не позволяет сильно нагреваться рабочему телу. В установке реализуется ламинарный режим течения жидкости из-за малой скорости перемешивающего устройства. Интенсивность массообмена обеспечивается за счет турбулизации потока вблизи стаканов с сетчатыми стенками и дном. Свою лепту вносит также случайное распределение листьев мяты внутри стакана. Вода, омывая поверхности листьев, меняет своё направление, и струйное течение жидкости в данной области нарушается, что также обеспечивает распределение экстрактивных веществ во всем объеме жидкости [2, 3].

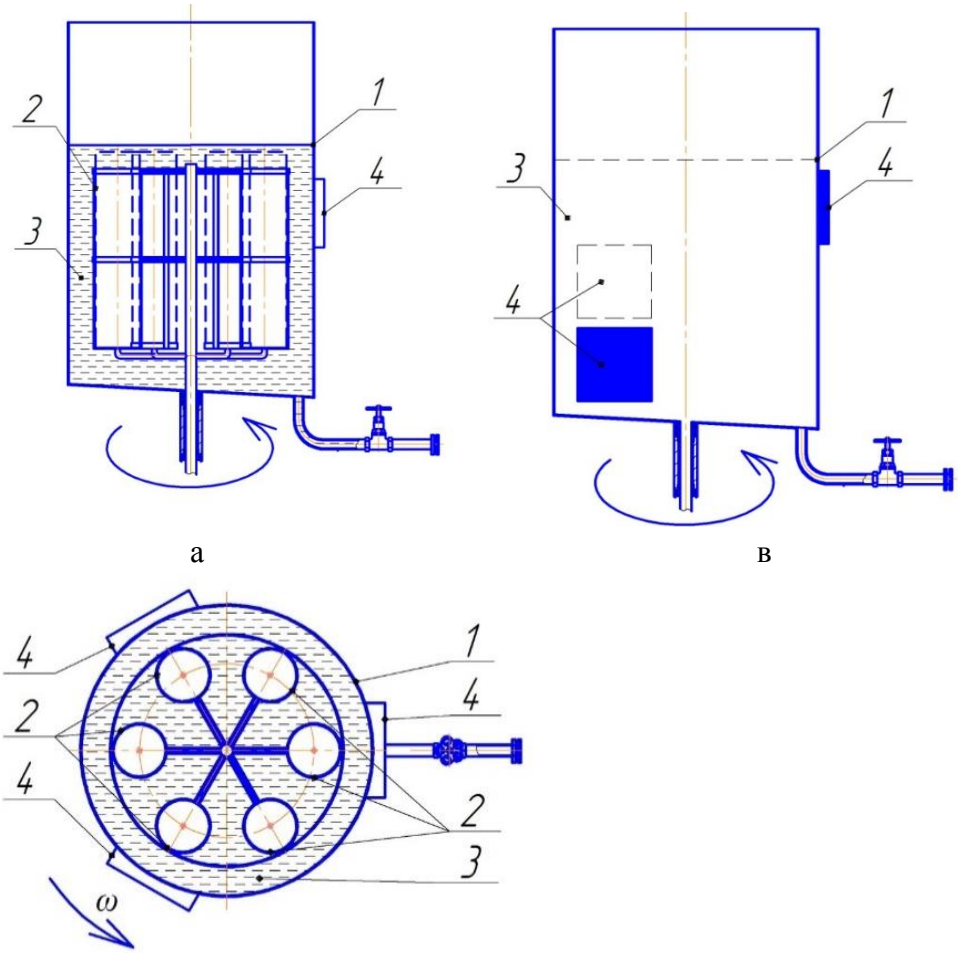

Рис. 1. Схема установки для получения водного экстракта мяты:
а) главный вид в разрезе; б) вид сверху; в) расположение волноводов
1 – корпус; 2 – стаканы с сухой мятой; 3 – раствор; 4 – волновод СВЧ-энергии

Рассмотрим методику определения мощности СВЧ-магнетронов. Источник СВЧ-энергии при помощи волноводов обеспечивает распределение электромагнитных волн внутри жидкости в некотором объеме. Волны действуют внутри тела, форма которого представлена на рис. 2.

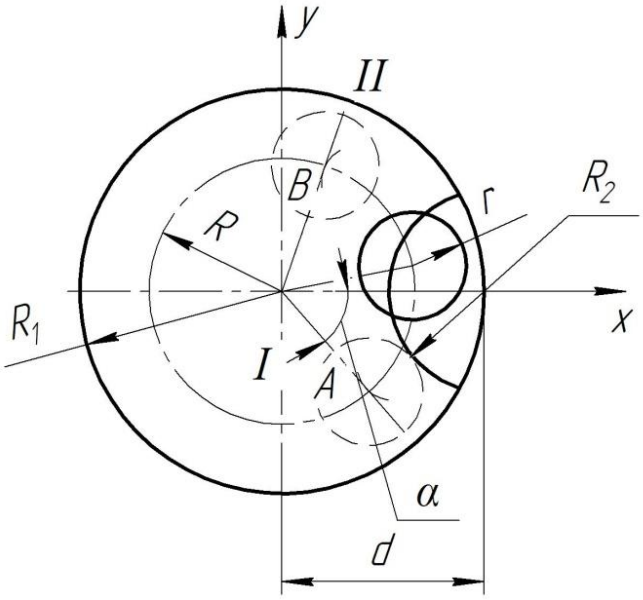

Рис. 2. Схема установки для нахождения фронта распространения волн (вид сверху)

В корпусе установки радиуса R_1 под действием электромагнитных волн сформирована зона воздействия СВЧ-поля радиуса R_2, определяемая его частотой f, с объемной плотностью энергии ω. Расстояние d указывает положение центра волновода. Данная зона формируется за счет распространения фронта волны после щелевого волновода. Магнетрон работает только в тот промежуток времени, в течение которого стакан с мятой проходит по зоне обработки СВЧ-поля из положения *I* в положение *II*, рис. 2 [4, 5].

Рабочая зона обработки каждого стакана с мятой определяется длиной дуги *AB* между центрами стакана радиусом r в положениях *I* и *II*. Найдем координаты точек пересечения окружностей радиусов R и R_2. Введем декартову систему координат, с началом в центре концентрических окружностей радиусов R и R_1. Уравнения окружностей имеют вид:

$$x^2 + y^2 = R^2, \qquad (x - d)^2 + y^2 = R_2^2, \tag{1}$$

где: R – радиус окружности расположения центров сетчатых стаканов, м; d – расстояние

до центра щелевого волновода, м; R_2 – радиус зоны распространения СВЧ-поля, м.

Совместное решение уравнений (1) определяет координаты точек пересечения в положениях *I* и *II*, а также угол α-половинной дуги в радианах:

$$x_I = \frac{(R^2 - R_2^2) + d^2}{2d}, \quad y_I = \pm\sqrt{R^2 - x_I^2}, \tag{2}$$

$$\alpha = \left|\mathrm{arctg}\frac{y_I}{x_I}\right| + \left|\mathrm{arctg}\frac{r}{R}\right|, \tag{3}$$

где r – радиус стакана, м.

Длина дуги $\overset{\frown}{AB}$определяется из радианной меры угла:

$$\overset{\frown}{AB} = 2 \cdot \alpha \cdot R. \tag{4}$$

Время работы магнетрона для обработки одного стакана равно:

$$\tau = \frac{\overset{\frown}{AB}}{v}, \tag{5}$$

где v – окружная скорость движения стакана вдоль дуги, м/с.

Задавшись значениями параметров: R = 0,195 м; r = 0,05 м; R_1 = 0,25 м; R_2 = 0,05 м; d = 0,26 м, а также скорости v = 0,088м/с, получаем из формул (1)-(5) координаты: x_I = 0,1983 м; y_I =0,036 м; угол α = 0,1796 рад; время работы магнетрона τ =1,93 с.

Параметры были подобраны таким образом, что при времени цикла $T = 2\pi R/v$=14,0 с (время одного полного оборота) происходит перекрытие, то есть за время обработки одного стакана τ (с) второй тоже попадает в зону облучения, поэтому магнетрон будет работать непрерывно [6].

Определим мощность СВЧ-магнетрона, которая не позволит раствору перегреться выше заданной температуры (t_{max}=40°С). Составим уравнение теплового баланса:

$$Q = C_т \cdot m_т \cdot \Delta t + C_ж \cdot m_ж \cdot \Delta t + Q_{пот}, \tag{6}$$

где: Q – теплота, подводимая за счет СВЧ-энергии, Дж; $C_т$, $C_ж$ – удельные теплоемкости твердой и жидкой фазы, соответственно, Дж/(кг·°С); $m_т$, $m_ж$ – масса твердой и жидкой фазы, соответственно, кг; $\Delta t = t_{max} - t_0$ – разность температур между начальным состоянием системы и допустимой температурой, °С; $Q_{пот}$ – потери теплоты в окружающую среду, Дж.

Если считать, что масса жидкой фазы определяется объемом раствора в зоне действия СВЧ-поля, т.е. областью пересечения двух цилиндрических тел, то

$$m_ж = \rho \cdot V = \rho \cdot \left[\frac{R_1^2}{2} \cdot (2\alpha_1 - \sin 2\alpha_1) + \frac{R_2^2}{2} \cdot (2\alpha_2 - \sin 2\alpha_2)\right] \cdot l, \qquad (7)$$

где: ρ – плотность жидкости, кг/м^3, $2\alpha_1$, $2\alpha_2$ – центральные углы, ограничивающие зону обработки (рис. 3), рад.

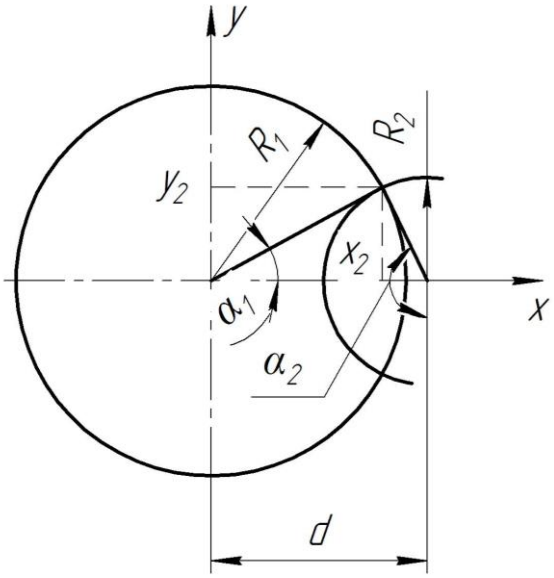

Рис. 3. Схема к определению объема зоны обработки

По аналогии с формулами (1)-(3), при пересечении двух цилиндров с радиусами R_1 и R_2 получаем координаты точек пересечения и искомые углы (рис. 3):

$$x_2 = \frac{(R_1^2 - R_2^2) + d^2}{2d}, \quad y_2 = \pm\sqrt{R_1^2 - x_2^2},$$

$$\alpha_1 = arctg\left|\frac{y_2}{x_2}\right|, \qquad \alpha_2 = arctg\left|\frac{y_2}{d - x_2}\right|.$$

Потери тепла происходят за счет теплообмена между теплой жидкостью в зоне СВЧ-обработки и холодной жидкостью в остальной части установки. Но время обработки мало, а теплоперенос в жидкостях происходит, в основном, за счет конвекции. Можно принять, что в конце периода из зоны обработки уходит объем теплой жидкости вместе со стаканом с мятой, а на ее место поступает холодная вода из установки [7, 8].

$$Q_{пот} = 2C_ж \cdot m_{пот} \cdot \Delta t, \qquad (8)$$

где $m_{пот}$ – масса воды, находящаяся в объеме стакана, кг.

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

$$m_{пот} = \rho \cdot V \cdot r^2 \cdot l, \quad (9)$$

Теплота, передаваемая за счет излучения [9]:

$$Q = P \cdot V \cdot \tau, \quad (10)$$

где P – мощность, выделяемая в 1 м^3 диэлектрического материала под воздействием электрического поля, Вт/м^3.

Известно, что:

$$P = 5{,}5 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \mathrm{tg}\,\alpha \cdot E^2, \quad (11)$$

где: f – частота электрического поля, Гц; ε – коэффициент диэлектрической проницаемости среды; $\mathrm{tg}\,\alpha$ – тангенс угла потерь в диэлектрике; E – напряженность электрического поля, В/м [10].

Объединяем формулы (6)-(11) и выражаем удельную мощность СВЧ-излучателя:

$$P = \frac{(C_т \cdot m_т + C_ж \cdot m_ж + 2C_ж \cdot m_{пот}) \cdot \Delta t}{V \cdot \tau}. \quad (12)$$

Предлагаемая методика расчета по формулам (6)-(12) позволяет решить следующие задачи.

1. Подобрать мощность источника излучения СВЧ-волн без перегрева обрабатываемого материала;

2. По заданным мощности P источника излучения и его параметрам (частоте f и напряженности E) найти температуру рабочего тела в процессе обработки;

3. Определить параметры источника СВЧ-излучения (частоту f и напряженность E), чтобы обеспечить достаточную глубину проникновения электромагнитных волн и не превысить интенсивность обработки.

Для достижения расчетной мощности СВЧ-излучения магнетроны необходимо устанавливать в рекомендуемом расчетами количестве. В целях предупреждения наложения СВЧ-волн друг на друга магнетроны необходимо размещать на разных уровнях высоты относительно корпуса ванны.

Список использованных источников

1. Копысова Т.С., Спиридонов А.Б., Анисимова К.В., Константинова У.И.,

Гадлгареева Р.Р. Применение СВЧ-энергии для извлечения экстрактивных веществ из растительного сырья на установках периодического действия // АгроЭкоИнфо. – 2019, №4. – http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2019/4/st_429.doc.

2. Копысова Т.С. Разработка технологии СВЧ-экстрагирования компонентов растительного сырья: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Санкт-Петербург-Пушкин. – 2013. – 171 с.

3. Бабенко Ю.И., Иванов Е.В. Экстрагирование растворенного вещества из пористого тела в движущуюся жидкость // Теор. основы хим. технол. – 2007, т. 41, № 2. – С. 225-227.

4. Диденко А.Н. СВЧ-энергетика: Теория и практика / Отв. ред. Я.Б. Данилевич. – М.: Наука. – 2003. – 446 с.

5. Кавецкий Г.Д., Васильев Б.В. Детали машин. Проектирование приводов технологического оборудования. Учебное пособие для студентов вузов. 2-е изд, перераб. и доп. – М.: Колос. – 1999. – 551 с.

6. Чернилевский Д.В. Детали машин. Проектирование приводов технологического оборудования. Учебное пособие для студентов вузов. – М.: Машиностроение. – 2001. – 560 с.

7. Иванов Е.В. Диффузионно-конвективное экстрагирование в аппаратах с интенсивным гидродинамическим режимом // Известия РГПУ им. Герцена. Серия: Естественные и точные науки. – 2007, № 8 (38). – С. 72-89.

8. Аметистов В.А., Григорьев В.А., Емцев Б.Т. и др. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент. Справочник / под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоиздат. – 1982. – 512 с.

9. Кутовой К.В., Осипов Ю.Р. Решение задачи массообмена при термообработке дисперсного материала комбинированным способом // Технические науки. Фундаментальные исследования. – 2012, № 9.

10. Иванов Е.В. Энергетический подход к описанию кинетики экстрагирования // Журн. прикл. химии. – 2006, т. 79, № 7. – С. 1132.

==========

Цитирование:

Копысова Т.С., Спиридонов А.Б., Иванов А.Г., Закирова Р.Р., Гадлгареева Р.Р. Теоретическое обоснование применения СВЧ-поля для извлечения экстрактивных веществ из растительного сырья // АгроЭкоИнфо. – 2020, №1. – http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2020/1/st_121.pdf.