

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ РИЦИНОВОЇ ОЛІЇ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

Журавель Д. П.¹, д.т.н.,

Дідур В. В.², д.т.н.

¹Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, м. Запоріжжя, Україна.

²Уманський національний аграрний університет, м. Умань, Україна.

Постановка проблеми. Для очищення рицинової олії від фосфатидів попередньо здійснюють їх гідратацію при концентрації води 1,5 ... 2 %. Видалення гідратованих фосфатидів пов'язане з певними особливостями: велика в'язкість рицинової олії та її спроможність утримувати гідратовані фосфати в майже колоїдному стані. Крім того після очищення олія потребує видалення остатків води [1-3].

Технологія електричного очищення олії полягає в наступному. Після проведення гідратації емульсія підігрівається до температури близько 100 °С. і надходить в ємність, в якій встановлено систему електродів у вигляді паралельних циліндрів. На електроди подається змінна висока напруга, що створює в міжелектродному просторі електричне поле. Величина напруги повинна бути якомога високою, але такою, щоб не виник електричний пробій рідини.

Основні матеріали дослідження. Для створення математичної моделі розглянемо в'язку рідину, яка вміщує зважені частинки. Відповідно до другого закону Ньютона рівняння руху частинки в рідині має вигляд:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_e + \vec{F}_c + \vec{F}_g,$$

(1)

де m – маса частинки; кг;

v – швидкість руху частинки, м/с;

\vec{F}_e – сила, що діє на поляризовану незаряджену частинку в електричному полі, Н;

\vec{F}_c – сила опору в'язкої рідини руху частинки, Н;

\vec{F}_g – гравітаційна сила, Н.

Будемо вважати, що частинки мають форму кулі. Гравітаційною силою нехтуємо у зв'язку з її малою величиною у порівнянні з електричною силою.

Для визначення розрахункової формули сили опору рідини руху частинки зробимо оцінку числа Рейнольдса за формулою:

$$R = \frac{v a \rho}{\eta},$$

(2)

де R – число Рейнольдса;
 a – радіус кулі, м;
 ρ – щільність рідини, кг/м³;
 η – динамічна в'язкість, Па·с.

При орієнтовній швидкості руху $V=1$ мм/с, розмірі частинки $a=50$ мкм, (рицинова олія при $t=90$ °С) значення числа Рейнольдса становить $\eta = 0,001$. Таке значення числа Рейнольдса дає підставу розраховувати силу опору в'язкої рідини руху частинки, що має форму кулі за наступною формулою:

$$\vec{F}_c = 6\pi\eta(\vec{v} - \vec{v}_p)a, \quad (3)$$

де \vec{v}_p - швидкість руху рідини, м/с.

В створеному неоднорідному електричному полі на краплі вологи та гідратовані фосфатиди діє сила, що забезпечує їх рух до поверхні електродів:

$$\vec{F}_e = 4\pi \cdot \varepsilon_c \cdot a^3 \frac{\varepsilon_q - \varepsilon_c}{\varepsilon_q + 2\varepsilon_c} \left(E_x \frac{\partial \vec{E}}{\partial x} + E_y \frac{\partial \vec{E}}{\partial y} + E_z \frac{\partial \vec{E}}{\partial z} \right), \quad (4)$$

де ε_c – ДП середовища, Ф/м; ($3 \cdot 10^{-11}$ Ф/м);
 ε_q – ДП речовини кулі, Ф/м; ($60 \cdot 10^{-11}$ Ф/м);
 \vec{E} – діюче значення вектору напруженості електричного поля, В/м.

На підставі другого закону Ньютона складаємо рівняння руху кулі в рідині:

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} + \frac{9\eta}{2a^2\rho} \left(\frac{d\vec{r}}{dt} \right) - \frac{3}{4\pi a^3 \rho} \vec{F}_e(\vec{r}) = 0, \quad (5)$$

де \vec{r} – радіус - вектор, м.

Розглянемо рух краплі вздовж лінії, що з'єднує центри електродів.

В такому випадку потенціал електричного поля між двома паралельними циліндрами описується рівнянням:

$$U(x) = U_{12} \frac{\ln\left(\frac{x-D}{x}\right)}{2 \cdot \ln\left(\frac{D}{R}\right)}, \quad (6)$$

де U_{12} - різниця потенціалів між електродами, В.

D – відстань між осями електродів, м.

R – радіус електродів, м.

Напруженість електричного поля визначається формулою:

$$E(x) = -\frac{dU}{dx} = -U_{12} \frac{D}{2 \cdot (x - D) \cdot x \cdot \ln\left(\frac{D}{R}\right)}, \quad (7)$$

Градiєнт напруженостi поля:

$$\frac{dE}{dx} = U_{12} \frac{D(2x - D)}{2 \cdot (x - D)^2 \cdot x^2 \cdot \ln\left(\frac{D}{R}\right)}. \quad (8)$$

Вiдповiдно до формули (4) маємо:

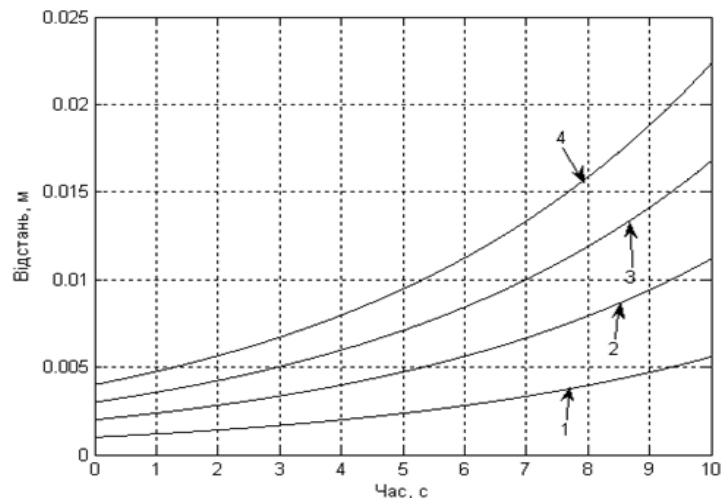
$$\vec{F}_e = 4\pi \cdot \varepsilon_c \cdot a^3 \frac{\varepsilon_v - \varepsilon_c}{\varepsilon_v + 2\varepsilon_c} \left(E_x \frac{\partial \vec{E}}{\partial x} \right);$$

$$\vec{F}_e = -4\pi \cdot \varepsilon_c \cdot a^3 \frac{\varepsilon_v - \varepsilon_c}{\varepsilon_v + 2\varepsilon_c} U_{12}^2 \frac{D^2(2x - D)}{4 \cdot (x - D)^3 \cdot x^3 \cdot \left(\ln\left(\frac{D}{R}\right) \right)^2}. \quad (9)$$

З формул (5) та (9) отримуємо диференцiйне рiвняння другого порядку руху частинки в в'язкiй рiдинi:

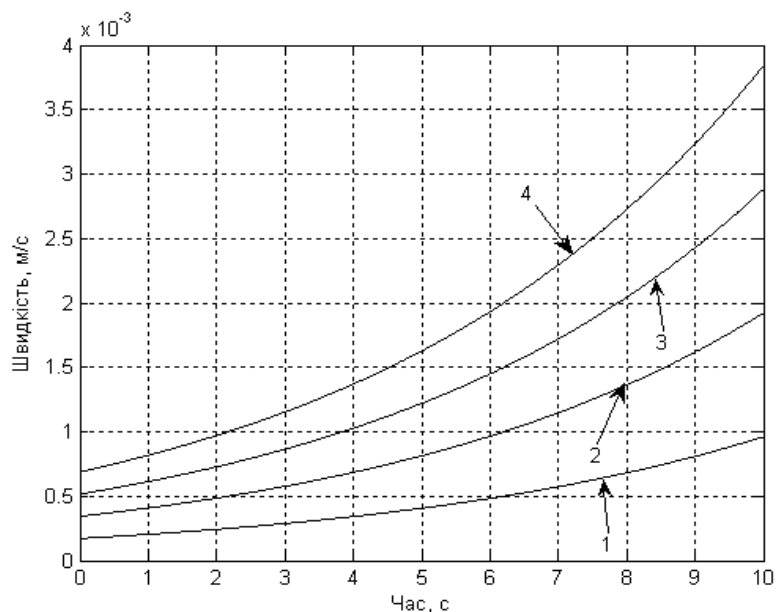
$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{9\eta}{2a^2\rho} \left(\frac{dx}{dt} \right) - \frac{3}{\rho} \cdot \varepsilon_c \cdot \frac{\varepsilon_v - \varepsilon_c}{\varepsilon_v + 2\varepsilon_c} \left(\frac{D \cdot (U_1 - U_2)}{2 \cdot \ln\left(\frac{D}{R}\right)} \right)^2 \cdot \frac{2x - D}{(x - D)^3 \cdot x^3} = 0. \quad (10)$$

Це рiвняння не розв'язується аналiтично, тому використано чисельне розв'язання методом Рунге-Кутта в середовищi програми MATCAD. Отримано залежностi координати руху частинки вiд часу, та її швидкостi вiд часу при рiзних початкових умовах (рис.1, рис.2). Цi залежностi отриманi для електродiв рiдiусом $R=1$ мм, при вiдстанi мiж осями $D=10$ мм, напрузи на електродах $U_{12}=5$ кВ, для частинки дiаметром $a=50$ мкм з $\varepsilon_v=6 \cdot 10^{-10}$ Ф/м, при в'язкостi рiдини $\eta=0,05$ Па·с та $\varepsilon_c=3 \cdot 10^{-11}$ Ф/м i початковими координатами $x_{01}=0,1$ мм, $x_{02}=0,2$ мм, $x_{03}=0,3$ мм, $x_{04}=0,4$ мм.



1 – 0,001 м; 2 – 0,002 м; 3 – 0,003 м; 4 – 0,004 м.

Рис. 1. Залежність вiдстанi вiд часу при початку руху з точок з координатами



1 – 0,001 м; 2 – 0,002 м; 3 – 0,003 м; 4 – 0,004 м.

Рис. 2. Залежність швидкості від часу при початку руху з точок з координатами

З отриманих залежностей можна визначити швидкість частинки в момент стикання з електродом при різних початкових координатах. Аналіз залежностей (рис.1 і рис. 2) показав, що ця швидкість не залежить від початкової координати руху і для вказаних умов складає 0,8 мм/с. Аналогічні розрахунки було проведено для на пруг на електродах: 3 кВ; 3,5 кВ; 4 кВ; 4,5 кВ; 5 кВ. В результаті отримані залежності швидкості осадження частинок на електроди від величини напруги (рис.3).

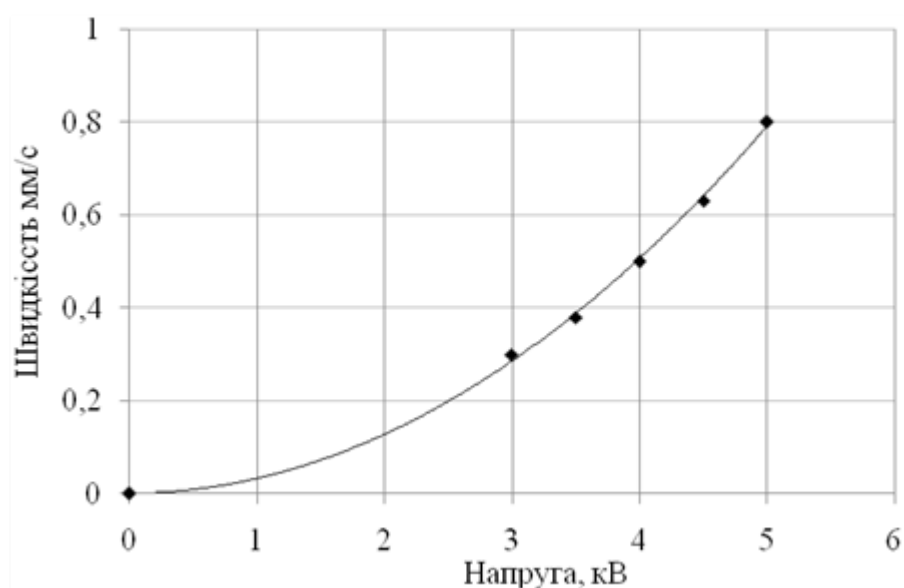


Рис. 3. Залежність швидкості частинки в момент стикання з електродом від напруги

При роботі флотаційної камери в безперервному режимі об'єм води в одиницю часу, що подається в камеру дорівнює:

$$Q_{\text{в}} = N \cdot Q_{\text{с}}, \quad (11)$$

де $Q_{\text{с}}$ – продуктивність по воді, м³/с;

N – вміст води в суміші, в.о.;

$Q_{\text{с}}$ – продуктивність по суміші, м³/с.

Об'єм води в одиницю часу, що виділяється на електродах у вигляді пари:

$$Q_{\text{в}} = \pi \cdot N \cdot v \cdot d \cdot l, \quad (12)$$

де v – швидкість зважених крапель води, м/с;

d – діаметр електроду, м;

l – довжина електроду, м.

З рівняння балансу води в камері:

$$N \cdot Q_{\text{с}} = \pi \cdot N \cdot v \cdot d \cdot l, \quad (13)$$

Отримуємо вираз для розрахунку загальної довжини електродів:

$$l = \frac{Q_{\text{с}}}{\pi \cdot v \cdot d}. \quad (14)$$

При роботі флотаційної камери в періодичному режимі зменшення об'єму води в одиницю часу, повинно дорівнювати об'єму води, що виділяється на електродах:

$$V \cdot \frac{dN}{dt} = \pi \cdot N \cdot v \cdot d \cdot l, \quad (15)$$

де V – об'єм камери, м³.

При розв'язанні цього диференціального рівняння отримуємо:

$$N = N_0 e^{-\frac{\pi \cdot v \cdot d \cdot l}{V} t}, \quad (16)$$

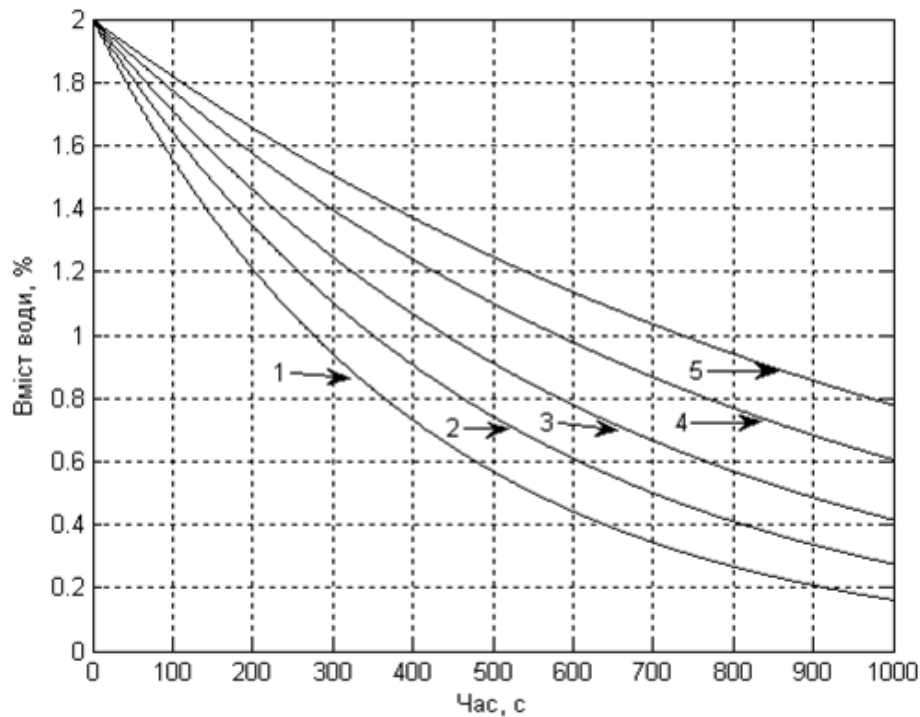
де N_0 – початковий вміст води в суміші, в.о.

Отримане рівняння дозволяє розрахувати теоретичне значення зменшення вмісту води в олії з часом під дією електричного поля при різних умовах та порівняти результат з експериментальними даними.

Крім цього з цього рівняння можна розрахувати потрібну довжину електродів для забезпечення технологічних вимог до процесу очищення:

$$l = -\frac{\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) \cdot V}{\pi \cdot v \cdot d \cdot t}. \quad (17)$$

Для перевірки математичної моделі процесу очищення рицинової олії в електричному полі було побудовано графічні залежності вмісту води в олії від часу за формулою (16) при напругах на електродах: 3 кВ; 3,5 кВ; 4 кВ; 4,5 кВ; 5 кВ, що відповідають швидкостям осадження на електроді 0,3 мм/с, 0,38 мм/с, 0,5 мм/с, 0,63 мм/с, 0,8 мм/с. Отримані теоретичні залежності (рис.4) побудовані для об'єму рідини 10^{-3} м^3 , діаметру електродів 10^{-3} м , довжини електродів 1 м та початкового вмісту води 2 %.



1 – 5 кВ; 2 – 4,5 кВ; 3 – 4 кВ; 4 – 3,5 кВ; 5 – 3 кВ.

Рис. 4. Теоретичні залежності вмісту води від часу при напрузі на електродах

Висновки. Таким чином, в результаті моделювання процесу очищення рицинової олії в електричному полі отримали числові значення швидкості частинки в момент стикання з електродом при різних початкових координатах, встановлено, що вона не залежить від початкової координати руху і для вказаних умов складає 0,8 мм/с. Отримані також залежності швидкості осадження частинок на електроди від величини напруги та вмісту води від часу при напрузі на електродах, що дозволить в подальшому розробити алгоритм інженерного розрахунку конструкційних параметрів флотаційної камери.

Список використаних джерел

1. Дідур В. В. Механіко-технологічні основи глибокої переробки насіння рицини в умовах малотоннажного підприємства: автореф.

дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : 05.05.11. Мелітополь, 2021. 44 с.

2. Журавель Д.П. Обґрунтування технологій отримання рицинової олії. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі», Запоріжжя, 2022. С. 25-28.

3. Дідур В.В. Методика проектування технологічних комплексів для очищення рослинних олій. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь, 2016. Вип. 16, Т. 2. С.224- 232.