

6.3 Експериментальні дослідження отримання порошкової форми високоволової суспензії синьо-зеленої водорості методом розпилювального сушіння

На даний час все більшої популярності в харчуванні людей набувають біологічно активні препарати у вигляді харчових добавок. Одними з таких препаратів є синьо-зелені водорості, зокрема спіруліна. Спіруліна містить повноцінний рослинний білок, розчинну та нерозчинну клітковину, комплекс вітамінів, мінералів та амінокислот. Ці компоненти сприяють підвищенню опірності до інфекційних захворювань, допомагають боротися зі стресом, старінням, зміцнюють організм загалом.

Метою проведення досліджень було одержання водорості спіруліни у сухому порошкоподібному вигляді з максимальним збереженням біологічно активних складових.

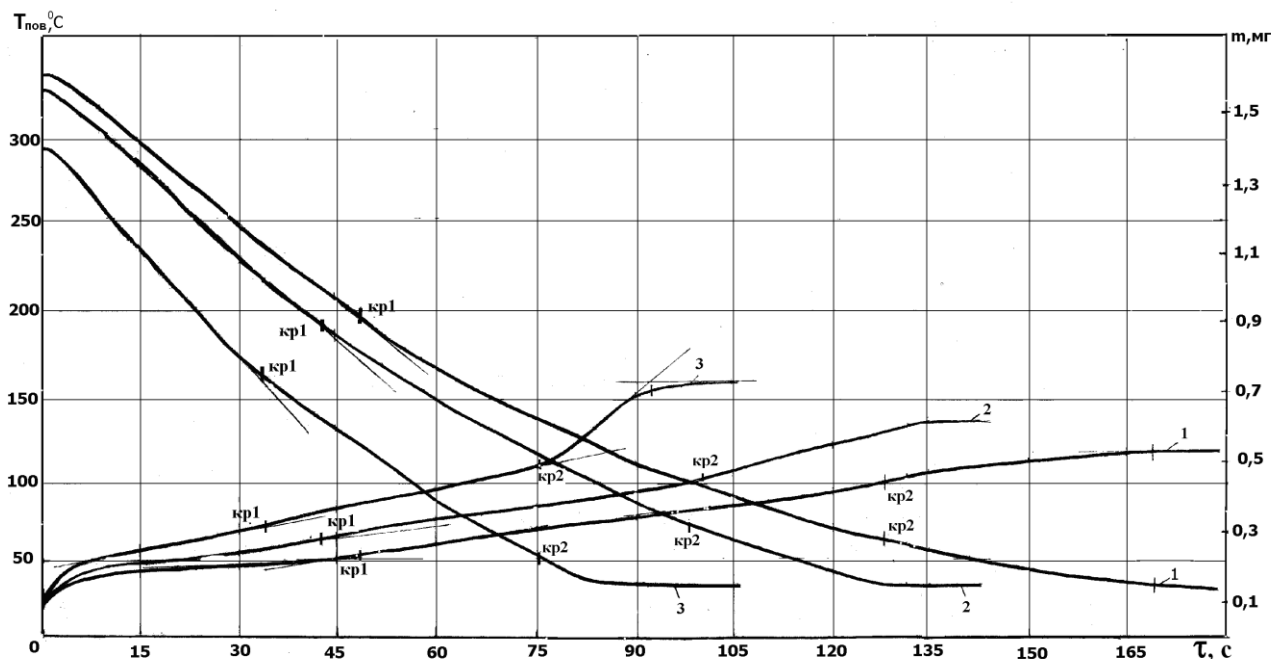
Проведено комплекс досліджень з розпилювального зневоднення суспензії спіруліни, що включає дослідження кінетичних особливостей зневоднення та теплотехнологічних параметрів розпилювального способу сушіння таких продуктів.

В Інституті технічної теплофізики (ІТТФ) НАН України були розроблені і створені лабораторні установки для дослідження кінетики процесу термічного зневоднення з метою виявлення ступеня впливу внутрішніх процесів тепловологопереносу в одиничній краплі (частці) на інтенсивність та тривалість зневоднення та дозволяють змодельовати процеси, що відбуваються в камері розпилювальної установки [309].

Дослідження кінетики випаровування і сушіння одиничних крапель суспензії спіруліни і змін, які при цьому вона зазнає, проводилися на експериментальному стенді в статичних умовах ($v_{\text{пов}} = 0$ м / с). Стенд дозволяє отримати додаткову інформацію про зміну маси краплі $m(\tau)$, що дає можливість аналізувати кінетику процесу одночасно на масо- і термограммах [309].

Температура повітря змінювалася в діапазоні $T_{\text{пов}} = 120 \dots 160^\circ\text{C}$. Початкова концентрація сухих речовин суспензії становила $C_0 = 14\%$.

На мал.1 показані термограми $t_{\text{кр}}=f(\tau)$ та масограми $m_{\text{кр}}=f(\tau)$, які спостерігалися при зневодненні крапель суспензії спіруліни розміром $\delta_0 \sim 1,45$ мм.



Малюнок 1. Термограми (1,2,3) та масограми (1',2',3') процесу зневоднення одиничних крапель суспензії водорості спіруліни в статичних умовах, $T_{\text{пов}}$: 1 - 120°C ; 2 - 140°C ; 3 - 160°C

Термограми процесу випаровування і сушіння одиничних крапель суспензії спіруліни при всіх $T_{\text{пов}}$ мають 3 періоди:

I – період прогрівання;

II – період випаровування вологи з вільної поверхні, який проходить при температурі, що близька до температури мокрого термометра ($t_{\text{кр}} \approx t_{\text{м.т}}$);

III – період кіркоутворення (кр1 - кр2) та заключної стадії зневоднення, в якому інтегральна температура краплі $t_{\text{кр}}$ різко підвищується за рахунок утворення на поверхні краплі твердого (щільного) шару нерозчинних речовин, який лімітує масоперенос, що зумовлює підвищення температури краплі.

Заключний період зневоднення завершується, коли температура частинки t_c досягає температури теплоносія $T_{\text{пов}}$.

Необхідно відзначити, що якщо при $T_{\text{пов}} = 120^\circ\text{C}$ випарна стадія протікає практично без підвищення температури, то при $T_{\text{пов}} = 140, 160^\circ\text{C}$ спостерігається деяке збільшення температури краплі в цьому періоді. Тривалість випарної стадії для всіх наведених термограм становить $\approx 30\text{-}35\%$ від загального часу процесу сушіння, протягом якої випаровується близько 45% вологи. Точка кр1 характеризує завершення випарної стадії і початок періоду кіркоутворення, в якому відбувається утворення деякого сухого шару на поверхні краплі, що зневоднюється. Цей період при всіх $T_{\text{пов}}$ проходить з лінійним підвищенням температури краплі, тобто $dt/d\tau = \text{const}$ до точки кр2. Потім настає період сушіння - видалення вологи через скоринку, що утворилася.

Розрахунок основних кінетичних параметрів наведено в таблицях 1 та 2.

Таблиця 1. Кінетичні характеристики при зневодненні
одиничних крапель суспензії водорості спіруліни

$T_{\text{пов}},$ $^\circ\text{C}$	$\tau_{\text{заг}},$ с	$\tau_{\text{вип}},$ с	$\tau_{\text{кірк}},$ с	$m_0,$ мг	$m_{\text{кр1}},$ мг	$m_{\text{кр2}},$ мг	$t_{\text{кр1}},$ $^\circ\text{C}$	$\tau_{\text{вип}}/\tau_{\text{заг}}$	$\tau_{\text{кірк}}/\tau_{\text{заг}}$
120	169	49	78	1,60	0,90	0,28	46	0,28	0,46
140	135	42	57	1,56	0,88	0,32	56	0,30	0,42
160	92	34	41	1,40	0,74	0,24	60	0,36	0,44

Таблиця 2. Інтенсивність тепло- вологовіддачі
в різних стадіях зневоднення.

$T_{\text{пов}},$ $^{\circ}\text{C}$	$\delta_0,$ мм	$\delta_{\text{кін}},$ мм	$I_{\text{вип}}$	$I_{\text{кірк}}$	$\bar{I}$	$N_{\text{вип}}$	$N_{\text{кіркк}}$	$\bar{N}$
120	1,45	1,35	$14,2 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-3}$	$9,5 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
140	1,43	1,35	$16,2 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$	$11,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$
160	1,38	1,3	$19,4 \cdot 10^{-3}$	$12,2 \cdot 10^{-3}$	$15,2 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$

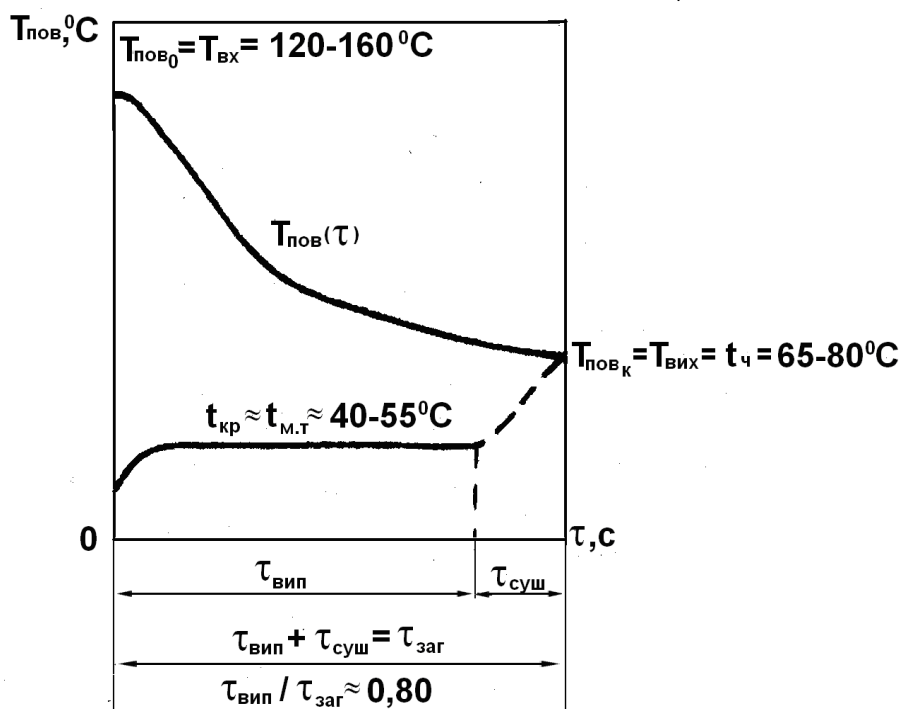
Як видно з термограм та даних табл. 1 період кіркоутворення має тривалість дещо більшу, ніж випарна стадія. У періоді кіркоутворення випаровується близько 35% вологи, температура краплі підвищується від $t_{\text{кр}} \approx t_{\text{м.т}}$ до $t_{\text{кр}} \approx 100^{\circ}\text{C}$. Важливо, що на всіх термограмах при різних $T_{\text{пов}}$ в камері, відсутній період кипіння, поява якого зазвичай свідчить про негативний термічний вплив при інтенсивному випаровуванні на продукт під скоринкою твердої речовини, що утворилася. Відсутність періоду кипіння пояснюється тим, що структура твердої оболонки досить рихла, досить вологопровідна і тому в процесі сушіння не виникає ніяких деформаційних змін частинки. Це підтверджується ще й тим, що кінцевий розмір висушених часток практично однаковий для всіх дослідів незалежно від зміни температури повітря в камері (табл. 2).

Після точки $\text{кр}2$ настає завершальна стадія - сушіння, яка протікає при плавному підвищенні температури до $t_{\text{кр}} = t_{\text{ч}} = T_{\text{пов}}$. Час цієї стадії незначний. Це також говорить про те, що інтенсивність вологовіддачі не лімітується структурою частинки, що утворилася.

Аналізуючи кінетичні криві сушіння одиночних крапель суспензії спіруліни видно, що підвищення температури повітря дозволяє скоротити час зневоднення, так як інтенсивність зневоднення (табл. 2) зі збільшенням $T_{\text{пов}}$ зростає.

$$\text{Так: } \frac{\left[\frac{N_{\text{вип}}}{\delta_0^2} \right]_{160^\circ \text{C}}}{\left[\frac{N_{\text{вип}}}{\delta_0^2} \right]_{120^\circ \text{C}}} = \frac{9,9 \cdot 10^{-3}}{7,1 \cdot 10^{-3}} = 1,39; \quad \frac{\left[\frac{N_{\text{кірк}}}{\delta_0^2} \right]_{160^\circ \text{C}}}{\left[\frac{N_{\text{кірк}}}{\delta_0^2} \right]_{120^\circ \text{C}}} = \frac{4,9 \cdot 10^{-3}}{3,1 \cdot 10^{-3}} = 1,58$$

Зневоднення крапель у нагрітому повітряному середовищі в умовах камери розпилювальної сушарки протікає при зміні $T_{\text{пов}}$ від $T_{\text{пов(вх)}}$ до $T_{\text{пов(вих)}}$ і температура рівноважного випаровування, або температура мокрого термометра (мал.2), буде $t_{\text{кр}} \approx t_p \approx t_{\text{м.т}} = 40...55^\circ\text{C}$. Значення $t_{\text{м.т.}}$ залежить від параметрів нагрітого повітря: температури та вмісту вологи. І лише на завершальній стадії підсушування частинок здійснюється при температурі, яка підвищується від $t_{\text{м.т.}}$ до $T_{\text{пов(вих)}}$.



Малюнок 2. Зміна температури повітря та температури краплі (частки) від часу при зневодненні високовологих суспензій.

Проведені дослідження підтверджують можливість отримання цього продукту в порошкоподібній формі шляхом розпилювального зневоднення із збереженням біологічно активних складових спіруліни. Слід також зазначити, що в кінці досвіду частка була суха, а отже, продукт не є термопластичним.

Наступний етап досліджень – особливості процесу розпилювального сушіння, проводився на лабораторній розпилювальній установці. Установка складається з розпилювальної камери $D=1,3$ м типу циліндр-конус з верхнім підведенням теплоносія, пристрою, що розпилює, ділянки підготовки теплоносія, ділянки транспортування і сепарації сухого продукту, розвантажувального пристрою. В якості розпилюючого пристрою використовувався відцентрово-дисковий розпилювач з диском $d = 120$ мм, частотою обертання диска $n=18000$ об/хв. Як теплоносій використовується повітря. Частинки висушеного продукту, що утворюються в сушильній камері, направляються в циклон, звідки після сепарації надходять у вивантажувальний пристрій. Отримані дані по розпилювальному сушінню спіруліни відображені в табл. 3. Як вихідний продукт використовувалася паста спіруліни, вироблена на одному з підприємств України, вологістю $W_0 = 75,5\%$.

Таблиця 3. Результати сушки суспензії
спіруліни на лабораторній сушарці

№	Кільк. розчину, л	C_0 , %	$t_{вх}$, °C	$t_{вих}$, °C	Кільк. отриман. порошку, г	Вологість порошку, %	Продук- тивність у-ки по розчину, л/год	Продук- тивність у-ки по вип. волозі, л/год	Час дослід
1.	29	13,4	155- 160	78- 80	3800	5,2	5,8	5,02	5год
2.	27	15,5	160- 170	90- 92	4155	5,3	6,7	5,66	4год
3.	27	12,4	160- 170	78- 82	3200	-	5,6	4,90	4год 45хв
4.	17	13,3	160- 170	86- 90	2325	5,1	5,7	4,94	3год
5.	12	13,1	160- 170	92- 94	1515	3,7	7,2	6,25	1год 40хв
6.	10,5	13,5	160- 170	90- 92	1450	4,1	6,3	5,4	1год 40хв

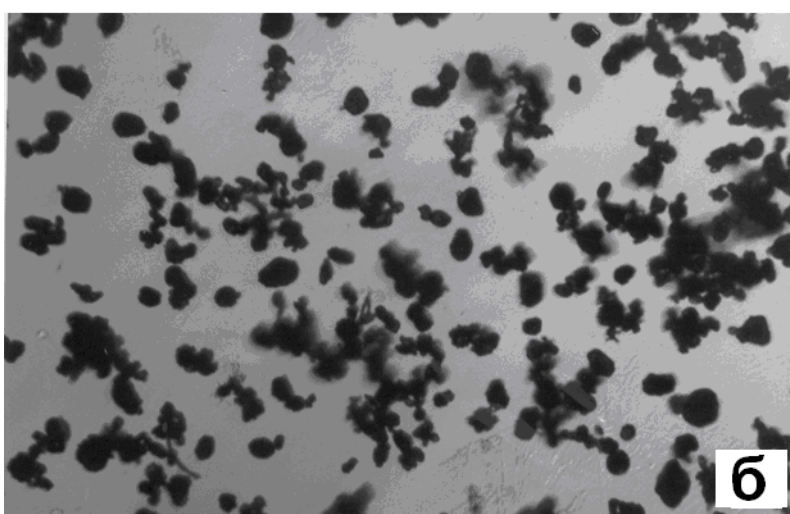
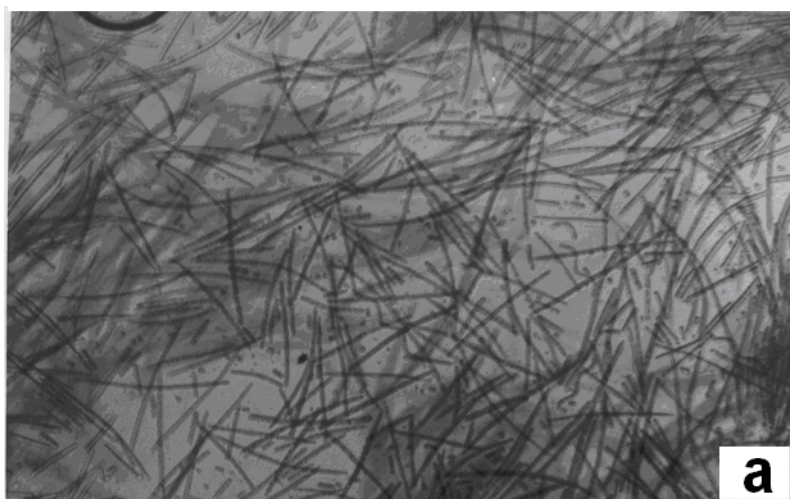
У дослідах 1,3 (табл. 3) були заміряні втрати порошкоподібного продукту з відпрацьованим теплоносієм, який через циклон та матер'яний фільтр викидається в атмосферу. Кількість порошку, що осів на фільтрі, склало 17,6 г і 12,3 г, що становить $\sim 0,45\%$ втрат від загального отриманого порошку спіруліни.

Після закінчення сушіння при відкритті сушильної камери у всіх дослідах спостерігалися незначні відкладення порошку на стелі і стінках камери, які легко видалялись. У досліді 2 заміряли кількість порошку, що осів на стінках. Його вага склало 70 г, що становило $\sim 1,68\%$ від загального отриманого порошку спіруліни.

При сушінні суспензії спіруліни питомі витрати електроенергії у перерахунку на 1 кг випареної вологи становили 2,5 – 2,7 кВт·год або 9700 – 10800 кДж.

Було проведено аналіз дисперсійних та структурно-механічних характеристик порошків. Отриманий порошок - темно-зеленого кольору з характерним запахом водорості. Насипна вага порошку $\rho = 0,314 - 0,316$ г/см³. Також отримані фотографії мікроструктури початкового продукту, порошкоподібного та продукту після редиспергації у воді (мал. 3).

Початковий продукт має голчасту (ниткоподібну) структуру (мал. 3а), порошкоподібний - сферичну або овальну (мал. 3б). Продукт після розчинення порошку має голчасту структуру, але ці голки (або нитки) значно меншої довжини, ніж початкової суспензії (мал. 3в). Частинки сухого порошку, як видно із мал. 3б, досить однорідні, середні розміри становлять 48...64 мкм. У полі зору не спостерігалися дуже дрібні частинки та дуже великі. Це свідчить про високу ефективність використання для такого продукту відцентрового дискового розпилювача, який диспергує ниткоподібні структури на такі розміри, які потім «згортаються» у сферичну форму. Це ще раз підтверджує доцільність отримання таких продуктів у порошкоподібній формі на розпилювальній сушильній установці, оскільки виявлений ефект сприятиме кращому засвоєнню біологічно активних речовин організмом.

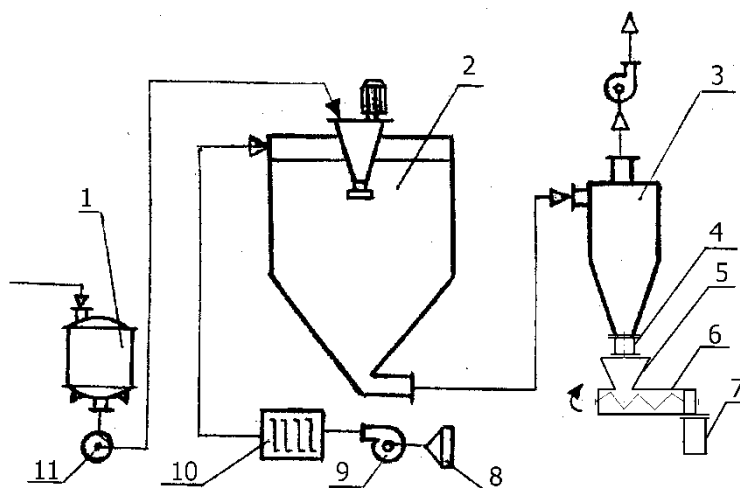


Малюнок 3. Мікрофотографії частинок водорості спіруліни:

а) вихідний продукт; б) порошкоподібний продукт; в) продукт після розчинення порошку

Отриманий порошкоподібний продукт водорості спіруліни було проаналізовано на різні якісні показники лабораторією по вирощування спіруліни. Аналіз показав високу біологічну активність, що підтверджує досить м'які температурні умови розпилювального способу сушіння. Процес сушіння протікає досить інтенсивно, що веде до суттєвого скорочення часу зневоднення, а це зумовлює незначний термічний вплив на якісні характеристики, що, як відомо, визначається впливом двох параметрів – температури та часу.

На підставі проведених досліджень рекомендується розпилювальний спосіб сушіння суспензії водорості спіруліни як спосіб, що гарантує отримання якісного сухого порошку спіруліни. Для реалізації цього способу рекомендується розроблена в ІТТФ НАН України розпилювальна сушильна установка СУМ-1,5 (мал. 4,5).



Малюнок 4. Схема розпилювальної сушарки СУМ-1,5:

1 - ємність для вихідного продукту; 2 - сушильна камера; 3 - циклон;
4 - шлюзовий затвор; 5 - бункер; 6 - шнековий транспортер; 7 - контейнер;
8 - фільтр; 9 - вентилятор; 10 - електрокалоріфер; 11 – насос.

Установка має камеру з діаметром циліндричної частини $D_{\text{кам}}=1,5$ м, висотою $H_{\text{кам}}=3,8$ м та об'ємом $V_{\text{кам}}=2,95$ м³; розпилювач відцентровий дисковий Ц-18: $d_d=0,12$ м, $n=18000$ об/хв; циклон спіраль-но-конічного типу діаметром

0,3 м; систему для вивантаження та охолодження готового порошкоподібного продукту у вигляді шнекового пристрою.

Продуктивність сушарки по випареній волозі становить 20...25 кг/год. Витрата повітря, що подається в камеру - 750 50 кг/год, температура повітря на вході може змінюватися в діапазоні $T_{\text{вх}}=120...240^{\circ}\text{C}$, на виході $T_{\text{вих}}=75...105^{\circ}\text{C}$. Нагрівання повітря проводиться в електрокалорифері. Потужність електрична встановлена - 55 кВт, витрати е/е в робочому режимі 35-40 кВт. Висушений продукт після циклону зсипається в бункер, а звідти через шнековий пристрій, де відбувається його часткове охолодження, надходить на розфасовку.



Малюнок 5. Загальний вигляд промислової розпилювальної установки СУМ-1,5