

УДК 66.047.1:663.1

ПЕРЕЯСЛАВЦЕВА Е.А., МАЛЕЦКАЯ К.Д.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ
ВЫСОКОВЛАЖНОЙ БИОМАССЫ *SPIRULINA PLATENSIS*

Проведено комплекс досліджень розпилювального зневоднення біомаси *Spirulina platensis*, стосовно кінетичних особливостей сушіння та теплотехнологічних параметрів розпилювального способу сушки. Отримано дослідні партії порошків, проведено аналіз дисперсних та структурно-механічних характеристик отриманих порошків, виявлено, що процес зневоднення здійснюється при достатньо "м'яких" термічних умовах.

Проведен комплекс исследований по распылительному обезвоживанию биомассы *Spirulina platensis*, включающий исследование кинетических особенностей обезвоживания и теплотехнологических параметров распылительного способа сушки. Получены опытные партии порошков, проведен анализ дисперсионных и структурно-механических характеристик полученных порошков, показано, что процесс обезвоживания осуществляется при достаточно "мягких" термических условиях.

A complex investigation of the spray drying of *Spirulina platensis* biomass have been carried out, which included studying of the kinetic properties of the dehydration process as well as the heat exchanging technological parameters of spray drying technique. By using a pilot dryer, development types of the dry powdered product have been obtained. A analysis of the dispersion and mechanical characteristics of the powdered product being obtained has been performed. It has been shown that the drying processes has to be carried out at fairly soft dehydration regimes.

C – концентрация растворенного вещества в растворе;

I – скорость испарения капли;

\bar{N} – интенсивность сушки;

\bar{N} – осредненная интенсивность сушки;

$$N^* = \frac{(\bar{N})_{160^\circ\text{C}}}{(\bar{N})_{120^\circ\text{C}}};$$

m – масса;

t – температура;

δ – диаметр капли;

τ – время.

Индексы:

0 – начальный;

в – воздух;

вх – вход;

вых – выход;

исп – испарительный;

к – капля;

кон – конечный;

кор – коркообразование;

кр – критический;

мт – мокрый термометр;

общ – общий;

п – порошок;

суш – сушильный;

ч – частица.

В настоящее время общий уровень здоровья населения в Украине значительно снизился. Это происходит по ряду причин, в частности, в результате Чернобыльской катастрофы, многолетнего загрязнения окружающей среды промышленными выбросами и отходами. С другой стороны, социальные условия, снижение пищевой ценности продуктов, а нередко и ухудшение их качества также способствуют возникновению иммунодефицита и различных заболеваний у населения. В сложившейся ситуации Минздрав Украины осо-

бо рекомендует употреблять препараты на основе биологически активных веществ различных микроорганизмов. Разработка и производство таких лечебно-профилактических препаратов является одним из перспективных и развивающихся направлений современной биотехнологии.

Исследуемый в данной работе препарат создан на основе биомассы клеток *Spirulina platensis*. Он содержит 60...70% белка, в том числе все необходимые (незаменимые) аминокислоты, широкий спектр витаминов (А, Е, В₁, В₂, В₆, В₁₂, РР, F и

др.), макро- и микроэлементы. Эти компоненты способствуют повышению сопротивляемости к инфекционным заболеваниям, помогают бороться со стрессом, старением, укрепляют организм в целом [1,2].

Для более удобного использования такого препарата, который рекомендован для лечебно-профилактического использования как биологически активная добавка (БАД), целесообразно иметь его в сухой форме. Однако в большинстве случаев обезвоживание осуществляется на полочных сушильных установках, и полученный продукт имеет неоднородный полидисперсный состав с включением значительных по размеру агломератов, которые требуют дополнительного измельчения. Кроме того, процесс обезвоживания протекает в течение длительного времени (несколько часов), что приводит к существенному снижению активности.

Цель работы – исследовать процесс распылительного обезвоживания биологически активного препарата на основе биомассы *Spirulina platensis*, проанализировать дисперсионные и структурно-механические характеристики полученных тонкодисперсных порошков.

В ИТТФ НАН Украины был проведен комплекс исследований по распылительному обезвоживанию биомассы *Spirulina platensis*, включающий изучение кинетических особенностей

обезвоживания и теплотехнологических параметров распылительного способа сушки таких продуктов.

Исследование кинетических закономерностей сушки одиночных капель биомассы *Spirulina platensis* проводилось на экспериментальном стенде Института технической теплофизики НАН Украины, который позволяет смоделировать, в определенной степени, физическую картину обезвоживания капли в объеме сушильной камеры и оценить возможные термические воздействия и особенности структурообразования капли (частицы) [3]. Рабочей камерой стенда является шаровая, обогреваемая камера диаметром $D = 0,05$ м, где процесс испарения и сушки происходит в статических условиях [4]. Температура воздуха в камере для различных опытов составляла $t_B = 120, 140, 160$ °С, и при этом в каждом опыте $t_B \approx \text{const}$. Начальная концентрация биомассы по сухим компонентам составляла $C_0 \approx 14\%$. На рис.1 показаны термограммы $t_k = f(\tau)$ и массогаммы $m_k = f(\tau)$, которые наблюдались при обезвоживании капель биомассы *Spirulina platensis* размером $\delta_0 \approx 1,410^{-3} \dots 1,4510^{-3}$ м. Расчет основных кинетических параметров приведен в табл. 1 и 2.

На всех термограммах процесса сушки присутствует испарительная стадия, которая протекает при температуре равновесного испарения, близ-

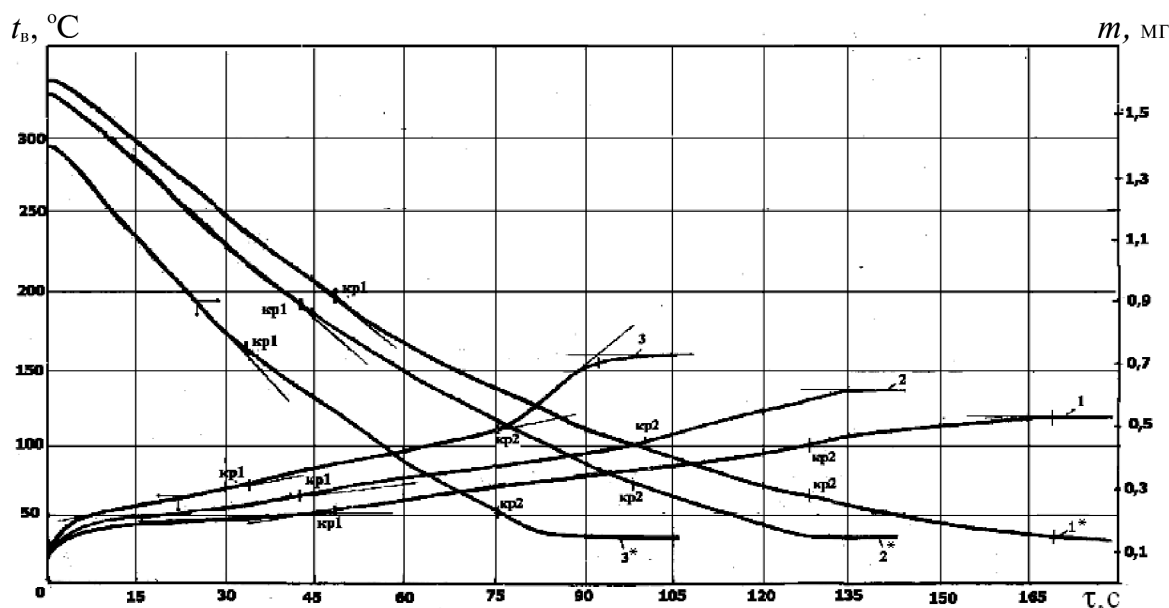


Рис. 1. Термограммы (1, 2, 3) и массогаммы (1*, 2*, 3*) сушки капель биомассы *Spirulina platensis*:
1 – $t_B = 120$ °С; 2 – 140; 3 – 160.

Табл. 1. Кинетические характеристики при обезвоживании единичных капель биомассы *Spirulina platensis*

t_B , °C	$\tau_{\text{общ}}$, с	$\tau_{\text{исп}}$, с	$\tau_{\text{кор}}$, с	m_0 , кг	$m_{\text{кр1}}$, кг	$m_{\text{кр2}}$, кг	$t_{\text{кр1}}$, °C	$\frac{\tau_{\text{исп}}}{\tau_{\text{общ}}}$	$\frac{\tau_{\text{кор}}}{\tau_{\text{общ}}}$
120	169	49	78	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$0,9 \cdot 10^{-6}$	$0,28 \cdot 10^{-6}$	46	0,29	0,46
140	135	42	57	$1,56 \cdot 10^{-6}$	$0,88 \cdot 10^{-6}$	$0,32 \cdot 10^{-6}$	56	0,31	0,42
160	93	33	41	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$0,74 \cdot 10^{-6}$	$0,24 \cdot 10^{-6}$	60	0,35	0,44

Табл. 2. Интенсивность тепловлагоденоса в различных стадиях обезвоживания

t_B , °C	δ_0 , м	$\delta_{\text{кон}}$, м	$I_{\text{исп}}$, кг/с	$I_{\text{суш}}$, кг/с	$\frac{I_{\text{исп}}}{I_{\text{суш}}}$	$N_{\text{исп}}$, кг/с·м ²	$N_{\text{кор}}$, кг/с·м ²	\bar{N} , кг/с·м ²
120	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$	$14,0 \cdot 10^{-9}$	$6,0 \cdot 10^{-9}$	2,3	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
140	$1,43 \cdot 10^{-3}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$	$16,0 \cdot 10^{-9}$	$7,8 \cdot 10^{-9}$	2,0	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
160	$1,38 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$20,0 \cdot 10^{-9}$	$9,8 \cdot 10^{-9}$	2,0	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$

кой к температуре мокрого термометра ($t_k \approx t_{\text{MT}}$). Необходимо отметить, что если при $t_B = 120$ °C испарительная стадия протекает практически без повышения температуры, то для $t_B = 140, 160$ °C наблюдается некоторое увеличение температуры капли в этом периоде. Длительность испарительной стадии для всех приведенных термограмм составляет 30...35% от общего времени процесса сушки, в течение которого испаряется до 45% влаги. Точка кр1 характеризует завершение испарительной стадии и начало периода коркообразования, в котором происходит образование некоторого сухого слоя на поверхности обезвоживаемой капли. Этот период для всех t_B проходит с линейным повышением температуры капли, т.е. $dt/d\tau = \text{const}$ до точки кр2. Затем наступает период сушки – удаление влаги через образовавшуюся корочку. Как видно из термограмм и данных табл. 1, период коркообразования имеет несколько большую продолжительность, чем испарительная стадия. В периоде коркообразования испаряется до 35% влаги, температура капли повышается от $t_k \approx t_{\text{MT}}$ до $t_k \approx t_B \approx 100$ °C. Важно отметить, что на всех термограммах при различных t_B в камере отсутствует период кипения, появление которого обычно свидетельствует о нежелательном термическом воздействии при интенсивном испарении на жидкий продукт под

образовавшейся корочкой твердого вещества. Отсутствие периода кипения объясняется тем, что структура образовавшейся в период коркообразования твердой оболочки достаточно влагонепроводна. В процессе сушки не возникает никаких деформационных изменений частицы. Это подтверждается тем, что конечный размер высушенных частиц практически одинаков для всех опытов независимо от изменения температуры воздуха в камере.

После точки кр2 наступает завершающая стадия сушки, которая протекает при плавном повышении температуры до $t_k = t_B$. Время этой стадии незначительно. Это также говорит о том, что интенсивность влагоотдачи существенно не лимитируется образовавшейся структурой частицы.

Из анализа кинетических кривых сушки одиночных капель биомассы *Spirulina platensis* видно, что повышение температуры воздуха позволяет сократить время обезвоживания, т.к. интенсивность обезвоживания (см. табл. 2) при увеличении t_B возрастает: $N^* = 1,7$. При этом, как показали расчеты на основании полученных данных, значения скорости влагоотдачи в испарительной стадии по сравнению с сушильной существенно

больше: $\frac{I_{\text{исп}}}{I_{\text{суш}}} \approx 2$ (табл.2).

Табл. 3. Результаты сушки биомассы *Spirulina platensis* на лабораторной сушилке

№ п/п	Объем раствора, л	C_0 , %	$t_{вх}$, °C	$t_{вых}$, °C	Масса порошка, кг	$W_{п}$, %	Произв. установки по раствору, л/ч	Произв. установки по исп. влаге, л/ч	Время опыта, мин
1	29	13,4	155±5	75±5	3,8	5,2	5,8	5,02	300
2	17	13,3	165±5	80±5	2,325	5,1	5,7	4,94	180
3	22,5	13,5	165±5	85±5	2,965	4,1	6,75	5,83	200

Следует также отметить, что в конце опыта частица была сухая, и, следовательно, продукт не является термопластичным.

Следующий этап исследований – особенности процесса распылительной сушки, проводился на лабораторной распылительной установке. Установка состоит из распылительной камеры $D = 1,3$ м типа цилиндр-конус с верхним подводом теплоносителя, распыливающего устройства, участка подготовки теплоносителя, участка транспортировки и сепарации сухого продукта, выгрузочного устройства. В качестве распыливающего устройства используется центробежно-дисковый распылитель с диском $d = 0,120$ м, число оборотов диска $n = 18000$ об/мин. В качестве теплоносителя используется воздух. Образующиеся в сушильной камере частицы высушенного продукта направляются в циклон, откуда после сепарации поступают в выгрузочное устройство.

Обезвоживание капель в нагретой воздушной среде в условиях камеры распылительной сушилки протекает при изменении t_b от $t_{b(вх)}$ до $t_{b(вых)}$. Значительная часть продолжительности обезвоживания приходится на стадию испарения со свободной поверхности капель, которые контактируют с теплоносителем, и при этом их температура будет близка к температуре мокрого термометра ($t_k \approx t_{MT}$). Значение t_{MT} зависит от параметров нагретого воздуха: температуры и влагосодержания и для исследуемого диапазона температур теплоносителя составляет 40...55°C. И только на завершающей стадии подсушивание частиц осуществляется при температуре, которая повышается от t_{MT} до $t_b = t_{b(вых)}$.

Полученные данные по опытам распылительной сушки биомассы *Spirulina platensis* с влажностью $W_0 \approx 86,5\%$ приведены в табл. 3.

Как видно из представленных данных, объем исследуемого продукта в этом комплексе исследований составлял около 60 л. Процесс сушки проходил без осложнений, порошкообразный продукт стабильно поступал в приемную емкость после циклона. После окончания сушки, при открытии сушильной камеры во всех опытах наблюдались незначительные отложения порошка на потолке и стенках камеры, которые легко сметались. В опыте 3 измеряли количество осевшего на стенках порошка. Его масса составила 0,070 кг (2,3% от общей массы полученного в опыте порошка).

Был проведен анализ дисперсионных и структурно-механических характеристик порошков. На рис. 2 представлены фотографии микроструктуры начального продукта, порошкообразного и после растворения в воде. Начальный продукт имеет игольчатую (нитеобразную) структуру (рис. 2, а), частицы порошкообразного продукта – форму, близкую к сферической или овальной (рис. 2, б). Продукт после растворения порошка (рис. 2, в) имеет игольчатую структуру, но эти иголки (или нити) значительно меньшей длины, чем в начальной исходной биосуспензии. Частицы сухого порошка достаточно однородны (рис. 2, б), средние размеры составляют 48...64 мкм. В образце порошка не наблюдались очень мелкие или крупные частицы. Это свидетельствует о высокой эффективности использования для такого продукта центробежного дискового распылителя, который диспергирует нитевидные структуры на такие размеры, которые затем “сворачиваются” в форму, близкую к сферической. Выявленный эффект будет способствовать лучшему усвоению биологически активных веществ организмом человека, что еще раз подтверждает целесообраз-

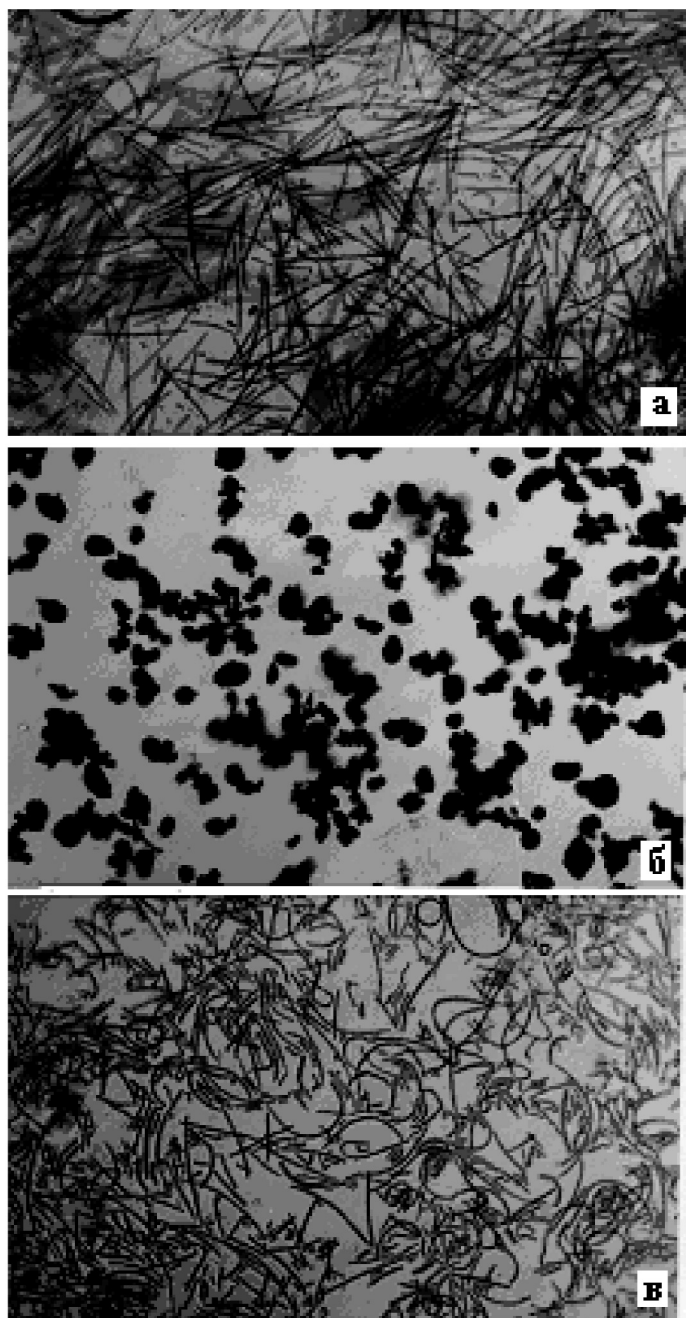


Рис. 2. Микрофотографии частиц биомассы *Spirulina platensis* (увеличение в 280 раз): а – исходная биомасса; б – порошкообразный продукт; в – продукт после растворения.

ность получения таких продуктов в порошкообразной форме на распылительной сушильной установке.

Средние размеры частиц полученных порошков достаточно высокие, что предопределяет эф-

фективность процесса их сепарации в циклонах данного типоразмера (диаметр циклона – 0,27 м) и совсем незначительное количество порошка на тканевом фильтре после циклона.

Насыпная плотность порошка составила $\rho = 315...325 \text{ кг/м}^3$, а конечная влажность – 4...5%, что обеспечивает сохранность сыпучей формы продукта достаточно длительное время (не менее года).

Полученный порошкообразный продукт биомассы *Spirulina platensis* был проанализирован на качественные показатели в лаборатории Института гидробиологии НАН Украины и показал высокую биологическую активность. Процесс сушки протекает достаточно интенсивно, что ведет к существенному сокращению времени обезвоживания, а это обуславливает незначительное термическое влияние на качественные характеристики, которое, как известно, определяется воздействием двух параметров – температуры и времени.

Выводы

На основании проведенных исследований ряду организаций были представлены рекомендации по использованию распылительного способа обезвоживания данного продукта на малогабаритных установках разработки ИТТФ НАН Украины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Янковский Д.С. Микробная экология человека: современные возможности ее поддержания и восстановления. – К.: Эксперт ЛТД, 2005. – 362 с.
2. Жизнь микробов в экстремальных условиях. – М.: Мир, 1981. – 515 с.
3. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Оптимизация процессов распылительной сушки. – К.: Наукова думка, 1984. – 240 с.
4. Долинский А.А., Малецкая К.Д., Шморгун В.В. Кинетика и технология сушки распылением. – К.: Наукова думка, 1987. – 224 с.

Получено 01.04.2008 г.