

УДК 66.047.3.049.6

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ВАКУУМНОЙ СУБЛИМАЦИОННОЙ СУШКИ МАТРИКСОВ НА ОСНОВЕ АЛЬГИНАТ-ХИТОЗАНА НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ПРОЦЕССА

© 2024 г. Е. К. Мохова*, М. Г. Гордиенко, Н. В. Меньшутина

Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Москва, Россия

*e-mail: lizi5263@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.01.2024.

После доработки 02.02.2024

Принята в печать 11.02.2024

В работе проводится интенсификация вакуумной сублимационной сушки биополимерных матриц альгинат-хитозана на каждой стадии ведения процесса: от предварительной заморозки до непосредственно самой сушки. В основной части статьи представлены и описаны конструкции установок для проведения процесса замораживания с ультразвуковым воздействием и сушки с инфракрасным и ультразвуковым воздействием. Проведена серия экспериментов по исследованию кинетики замораживания и сушки при различных режимах. Выявлено, что применение ультразвука на этапе заморозки позволяет формировать материалы с широкими направленными каналами в объеме полимерного каркаса, что впоследствии приводит к активному массопереносу влаги на этапе сушки.

Ключевые слова: вакуумная сублимационная сушка, интенсификация, тепло- и массоперенос, зародышеобразование, ультразвук, инфракрасное излучение

DOI: 10.31857/S0040357124050062 **EDN:** WDCOOE

ВВЕДЕНИЕ

Матрицы — это высокопористые материалы, как правило, состоящие из биополимеров и обладающие рядом свойств, определяющих их применение в медицине, в том числе регенеративной, тканевой инженерии и биотехнологии [1–3]. Благодаря развитой поверхности и наличию пор различного размера биополимерные матрицы находят широкое применение как подложки для культивирования клеток, что особенно важно в области регенеративной медицины при разработке материалов для восстановления пораженных тканей и органов [4,5]. Кроме того, благодаря свойствам биосовместимости и биodeградации матрицы широко применяются в качестве местных перевязочных материалов и кровоостанавливающих средств [6].

Основными сферами потребления биополимеров являются медицина и смежные области науки. В данных сферах деятельности существует потребность в промышленном производстве биodeградируемых и композиционных полимерных материалов. Данные материалы получают путем вакуумной сублимационной сушки. Однако, ограниченная скорость тепло- и массопереноса, ввиду протекания сублимационной сушки в усло-

виях пониженных температур, обычно приводит к длительному времени сушки и низкой производительности процесса в целом [7]. Продолжительность сублимационной сушки может составлять 24 часа и более. Кроме того, процесс является энерго- и ресурсозатратным, а использование дополнительного оборудования, необходимого для осуществления процесса вакуумной сублимационной сушки, такого как вакуумный насос, компрессорные установки и холодильная техника, ведет к удорожанию технологии и конечного продукта. Вследствие высоких энергетических затрат, исследование и интенсификация процесса вакуумной сублимационной сушки является актуальным и важным направлением с целью повышения энергоэффективности и увеличения производительности в сфере получения полимерных материалов биомедицинского назначения [8].

Интенсификация процессов, в том числе процессов сушки, — это набор инновационных принципов, применяемых при проектировании оборудования и организации процессов, которые вносят значительные преимущества с точки зрения повышения эффективности процессов, снижения капитальных и операционных затрат, повышения качества продукции [9,10].

Целью работы являлась интенсификация вакуумной сублимационной сушки матриц на основе альгината натрия и хитозана — биополимеров, часто применяющихся в регенеративной медицине и биотехнологии. Для этого были разработаны конструкции установок для проведения предварительной заморозки с ультразвуковым воздействием и сушки с одновременным инфракрасным и ультразвуковым воздействием.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Основными путями интенсификации процесса вакуумной сублимационной сушки являются новые энергоэффективные способы подвода тепла к высушиваемым образцам, включающие: инфракрасный нагрев [11], микроволновой нагрев [12], возможность генерации ультразвуковых импульсов в процессе сушки [13], а также их возможные комбинации. Также широко используются методы интенсификации, включающие оптимизацию режимов нагрева полок и циклическое изменение давления в вакуумной камере.

Необходимо отметить, что кроме интенсификации непосредственно стадии сублимационной сушки, в последние десятилетия широко развиваются методы интенсификации стадии предварительной заморозки [14].

Исследование и интенсификация процесса кристаллизации полимеров природного происхождения в рамках развития технологии сублимационной сушки являются актуальными направлениями на сегодняшний день.

Морфология кристаллов льда и распределение по размерам, влияющие на конечный вид и качество материала после сублимационной сушки, закладываются на стадии зародышеобразования [15]. Стоит отметить, что зародышеобразование является стохастическим явлением, происходящим в широком диапазоне температур [16]. Для образцов одинакового состава температура зародышеобразования может отличаться, это может привести к различному среднему диаметру образующихся кристаллов льда. Таким образом, на последующей стадии сублимационной сушки образцам в одной партии потребуется разное время для достижения целевого влагосодержания, что впоследствии приводит к неоднородности получаемой партии образцов с различным значением остаточной влаги.

Существуют различные способы влияния на размер кристаллов льда, не только интенсифицирующие процесс кристаллизации, но позволяющие контролировать стадию зародышеобразования: влияние магнитным и электрическим

полем, расширение под высоким давлением, а также ультразвуковая обработка.

Наиболее востребованным методом интенсификации и контролируемого зародышеобразования на сегодняшний день является ультразвуковое воздействие [17–19]. Во-первых, для осуществления ультразвукового замораживания (сонокристаллизации) не требуется контакта посторонних элементов непосредственно с раствором, а передача ультразвукового воздействия осуществляется путем создания акустического давления на стенке емкости, содержащей раствор, за счет колебаний, продуцируемых пьезоэлементом. Для реализации технологии сонокристаллизации требуется подключить пьезоэлемент к ультразвуковому генератору, что намного дешевле компрессионных установок. Во-вторых, отмечается положительное влияние ультразвука на процесс кристаллизации: зарождение кристаллов начинается при низких значениях переохлаждения жидкости; сокращение времени индукции зародышеобразования; узкое распределение кристаллов льда по размерам [20]. В-третьих, при ультразвуковой обработке создаются поверхностные напряжения в капиллярах, в результате чего образуются микроканалы, способствующие более легкому удалению влаги из материала при последующей вакуумной сублимационной сушке [21]. При ультразвуковой заморозке под действием внешнего давления происходит колебание микропузырьков, наполненных газом — это явление называется акустической кавитацией [21,22].

В работе [22] с использованием высокоскоростной камеры авторы смогли подтвердить наличие кавитационного потока, образующегося вокруг кавитационного пузырька в растворе сахарозы в процессе заморозки (рис. 1).

Движение кавитационных пузырьков способно ускорить процесс тепло- и массопереноса. При этом поверхности образующихся кавитационных пузырьков становятся центрами зарождения кристаллов льда.

В работе [23] приводится классификация по применению ультразвуковых волн в зависимости от частоты и мощности (рис. 2).

В соответствии с данной классификацией ультразвуковые волны в диапазоне от 20 до 100 кГц определяются как “мощный ультразвук”. Данные ультразвуковые волны, при высоком уровне мощности (>10 Вт), способны действовать на среду, в которой они распространяются, и модифицировать ее, вследствие возникновения акустической кавитации, ведущей к макроскопическим эффектам. Поэтому мощный ультра-

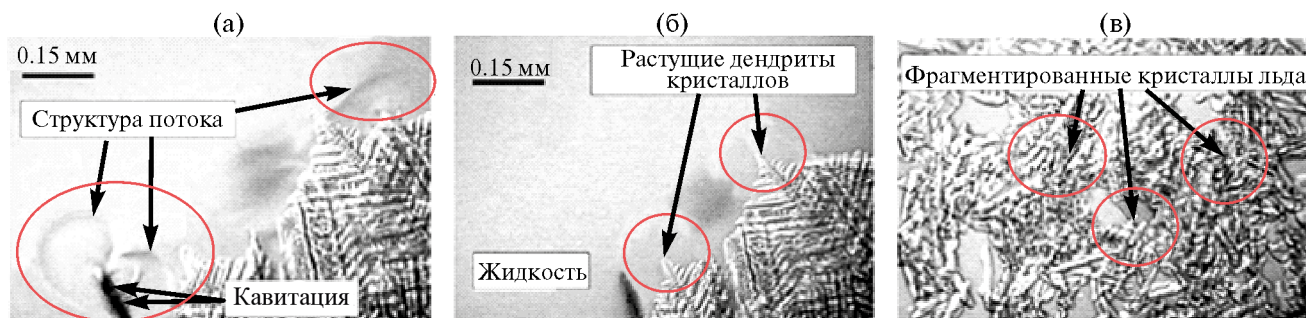


Рис. 1. Исследование замораживания раствора сахарозы с применением ультразвука: образование кавитационного потока (а); рост дендритных кристаллов льда (б); фрагментация кристаллов при воздействии ультразвуком (в).



Рис. 2. Классификация ультразвуковых волн в зависимости от частоты и мощности.

звук находит широкое применение в сонохимии, а также используется для интенсификации тепло- и массообменных процессов. Напротив, ультразвук малой мощности (<10 Вт), находящийся в частотном диапазоне выше 1 МГц, в основном используется в медицинской диагностике и не влияет на среду распространения.

Применение мощного ультразвука на стадии заморозки материалов позволяет воздействовать на форму кристаллов льда и влиять на их направленность, в соответствии с этим могут быть получены структурноориентированные материалы, имеющие широкие направленные каналы в объеме полимерного каркаса.

Для интенсификации вакуумной сублимационной сушки применяются: микроволновой нагрев, инфракрасное излучение и их комбинации.

Инфракрасное излучение так же, как и микроволновое относится к электромагнитному излучению и занимает спектральную область между красным концом видимого света и микроволновым излучением [24–26]. Длина волны инфракрасного излучения колеблется от 380 до 750 нм [27]. Инфракрасное излучение так же, как и микроволновое, способно проникать внутрь

материалов и напрямую передавать тепловую энергию на определенную глубину. Однако глубина проникновения инфракрасного излучения обычно зависит от поглощающей способности материалов. Экспериментальные исследования показали, что коэффициент поглощения льда существенно меняется в зависимости от длины волны падающего излучения. Соответственно, варьированием длины волны инфракрасного излучения можно добиться достижения необходимых температурных профилей в высушиваемом материале, не допуская его перегрева.

Кроме использования источников электромагнитного излучения в технологии вакуумной сублимационной сушки, в настоящее время широко исследуются способы механического воздействия, также ведущие к сокращению времени сушки. Одним из перспективных способов воздействия является применение ультразвуковых импульсов, способствующих активному тепло- и массопереносу [28,29].

Механические способы воздействия в процессе сушки в литературе также называют нетермическими, поскольку вызываемые первичные эффекты напрямую не связаны с нагревом образца [30]. Однако звуковые волны, передаваемые образцу, подвержены затуханию, вследствие возникновения трения между частицами, а также вязкого поглощения, что приводит к частичному преобразованию ультразвуковой (механической) энергии в тепловую. В процессе сублимационной сушки перегрев образца происходит, когда количество энергии, передаваемой образцу, превышает количество энергии, необходимой для совершения фазового перехода.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В ходе работы была сконструирована установка для проведения процесса замораживания с ультразвуковым воздействием для интенсификации

фикации стадии предварительной заморозки. Принципиальная схема установки приведена на рис. 3а. При осуществлении процесса заморозки с применением ультразвука был выбран импульсный режим воздействия. Продолжительность импульса составляет 5 секунд, с повтором каждые 30 секунд (рис. 3б).

Исследуемые образцы альгинат-хитозана в чашках Петри (1) устанавливали на подставку (2), в нижней части которой установлен пьезоэлемент (3). В объем раствора опускали термодару (4) для фиксации изменений значений температуры при проведении эксперимента. Конструкцию элементов (1), (2), (3) и (4) помещали в морозильную камеру (5) с заданной температурой 247 К. С помощью генератора ультразвука (6) осуществлялось преобразование постоянного напряжения источника питания (7) в напряжение ультразвуковой частоты. В момент начала эксперимента включенный генератор ультразвука (6) приводил к возбуждению пластины пьезоэлемента (3), в результате чего исследуемый раствор подвергался ультразвуковому воздействию. Сигнал от термодары (4) передавался к регистратору температуры (8), и по интерфейсу RS-485 (9) информация об изменении температуры раствора записывалась на компьютер (10). В экспериментальной работе

использовался генератор ультразвука с выходной мощностью, равной 50 Вт, и частотой 40 кГц.

Импульсный режим воздействия ультразвуком является более выгодным в отличие от режима с постоянным воздействием, т.к. позволяет предотвращать перегревание нижней поверхности образца, связанного с преобразованием механической энергии в тепловую.

В рамках интенсификации этапа вакуумной сублимационной сушки была модернизирована коммерческая установка Coolsafe 100-9 (Дания) для проведения процесса с одновременным инфракрасным (ИК) и ультразвуковым (УЗ) воздействием (рис. 4).

Были использованы базовые элементы установки Coolsafe 100-9, такие как корпус и система охлаждения, однако рабочее пространство рабочей камеры было дополнено конструктивными элементами, позволяющими проводить процесс сушки с инфракрасным излучением и ультразвуковым воздействием [31]. Модернизация сушилки и использование элементов собственной конструкции позволили расширить возможности установки.

Система управления процессом вакуумной сублимационной сушки представлена микроконтроллером на базе Arduino, подключенным

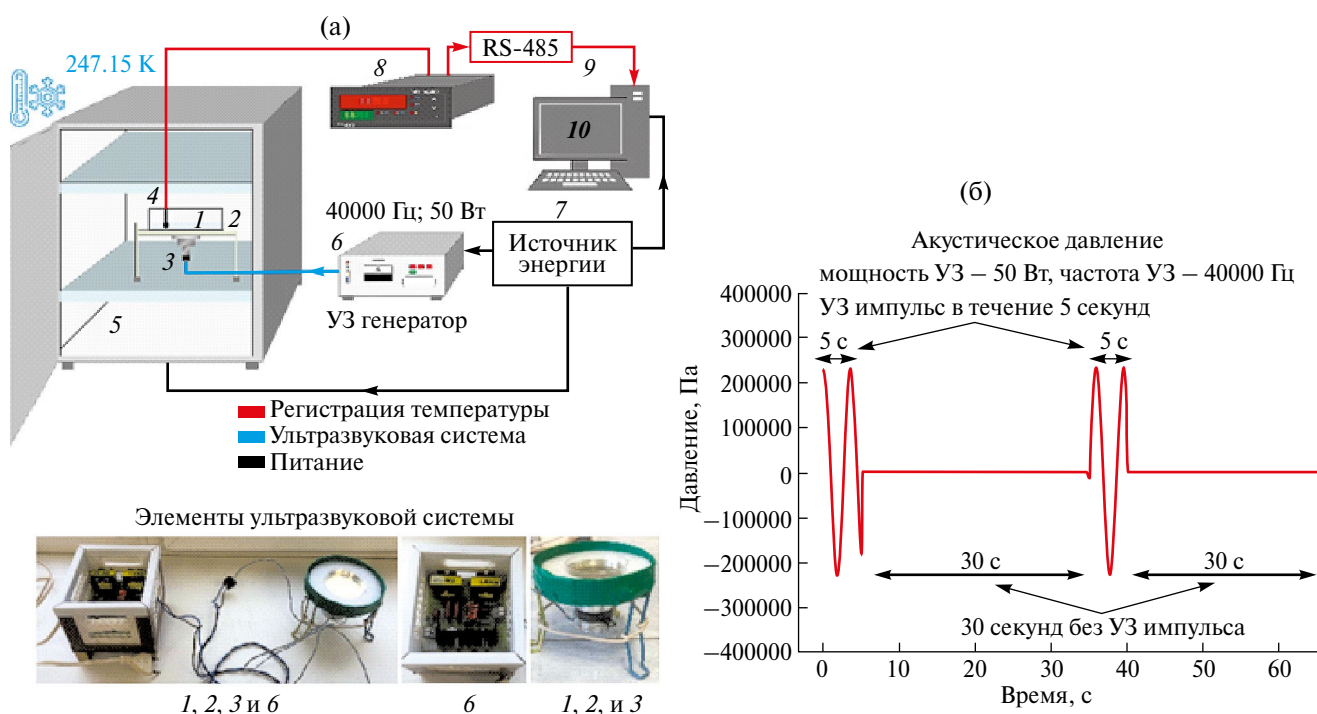


Рис. 3. Принципиальная схема конструкции для ультразвуковой заморозки (а): 1 – чашка Петри, 2 – подставка, 3 – пьезоэлемент, 4 – термодара, 5 – морозильная камера, 6 – генератор ультразвука, 7 – источник питания, 8 – регистратор температуры, 9 – интерфейс RS-485, 10 – ПК; режим ультразвуковой обработки (б).

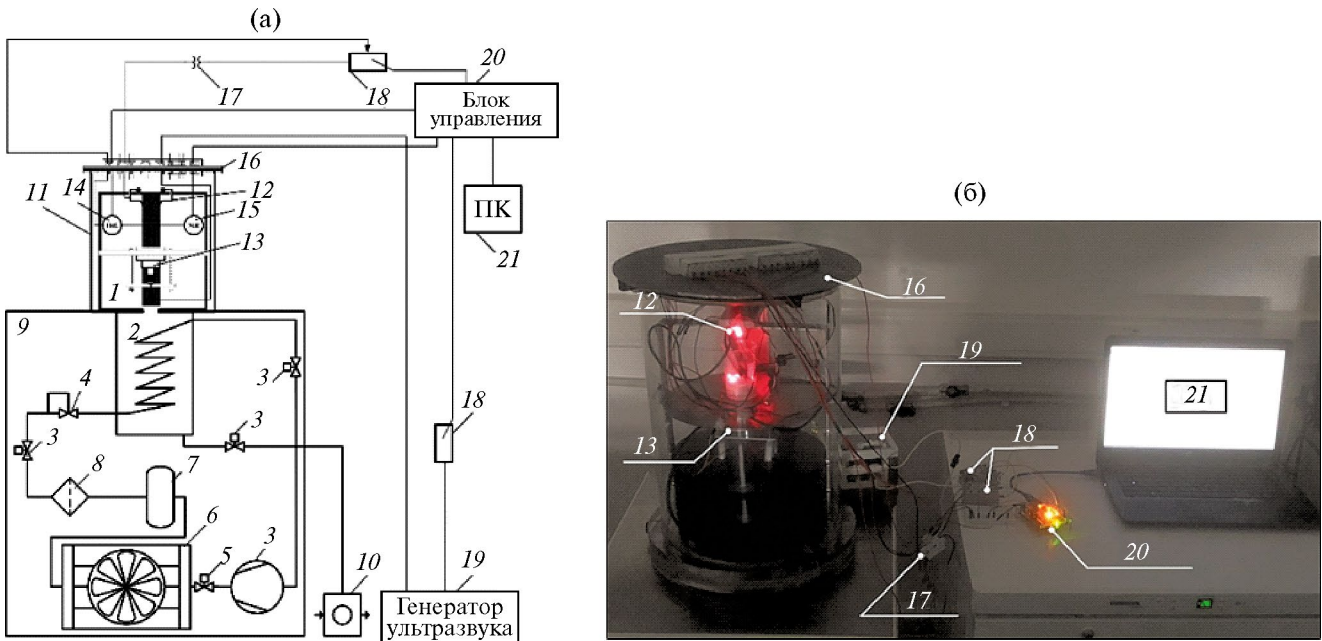


Рис. 4. Схема установки (а): 1 – рабочая камера, 2 – конденсатор, 3, 4 – клапаны, 5 – компрессор, 6 – конденсатор с воздушным охлаждением, 7 – сборник, 8 – фильтр-осушитель, 9 – корпус, 10 – вакуумный насос, 12 – источник ИК, 13 – источник УЗ, 14 – датчик температуры, 15 – датчик влагосодержания, 16 – крышка установки, 17 – понижающий трансформатор, 19 – реле переключения, 20 – блок управления, 21 – персональный компьютер; внешний вид установки (б).

Таблица 1. Описание режимов обработки матриц на этапах предварительной заморозки и вакуумной сублимационной сушки

Режим	Условия заморозки	Описание режима сушки
Режим 1	Обычная заморозка	Передача тепла от нагревательной полки
Режим 2	Заморозка с УЗ	
Режим 3	Обычная заморозка	УЗ (импульс 1 секунда, повтор импульса каждые 59 секунд) и ИК
Режим 4	Заморозка с УЗ	

Таблица 2. Температурно-временные параметры нагрева полок для режима 1

Температурно-временной режим						
$T_{\text{полки}}, \text{ K}$	273.15	278.15	283.15	288.15	293.15	298.15
$\tau, \text{ мин}$	0–240	240–600	600–900	900–1080	1080–1200	1200–1380

к компьютеру, а также цифровыми датчиками температуры, погружными аналоговыми датчиками влагосодержания и двумя реле переключения, с помощью которых регулируется работа инфракрасных нагревательных элементов и источника ультразвука.

При исследовании кинетики вакуумной сублимационной сушки матриц на основе альгинат-хитозана (**Алг-Хит**) были реализованы режимы, приведенные в табл. 1.

При осуществлении процесса вакуумной сублимационной сушки исследуемых образцов в режимах 1 и 2 температура нагревательных полок менялась с течением времени ступенчато, как представлено в табл. 2.

Для образцов, замороженных при различных условиях, были введены, краткие обозначения, приведенные в табл. 3.

Для каждого из исследуемых режимов сушки было проведено три повторных эксперимента, необходимых для расчета стандартного отклонения. При оценке стандартного отклонения сначала определялось среднее арифметическое выборки по уравнению (1):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \tag{1}$$

где $\bar{x}$ – среднее арифметическое выборки; n – размер выборки; x – элемент выборки; i – номер элемента выборки.

Таблица 3. Краткие обозначения исследуемых матриц

Образец	Условия заморозки	Состав образцов
Алг-Хит	Обычная заморозка	Альгинат натрия 1.5%
Алг-Хит-УЗ	Заморозка с УЗ	Хитозан 1%

Расчет стандартного отклонения S производился по уравнению (2):

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (2)$$

Для оценки сопоставимости кинетических кривых сушки использовались факторы различия и подобия. Фактор различия (f_1) показывает процент ошибки между двумя кривыми сушки, полученными при разных режимах, по всем временным точкам. Фактор различия рассчитывается по уравнению (3):

$$f_1 = \frac{\sum_{t=1}^k |R_t - T_t|}{\sum_{t=1}^k R_t} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где k – количество временных точек; R_t – средняя температура сравнения в данный момент времени, К; T_t – средняя температура материала в данный момент времени, К.

Фактор различия равен нулю, если кривые сушки идентичны. По мере увеличения различия между двумя кривыми сушки значение фактора возрастает. Кинетические кривые сушки считаются сопоставимыми, если значение фактора различия f_1 находится в интервале от 0 до 15.

Фактор подобия (f_2) – это величина, представляющая собой логарифмическое преобразование значения суммы квадратов ошибок, рассчитанных по разности между значениями двух кривых сушки во всех точках времени. Фактор подобия рассчитывается по уравнению (4):

$$f_2 = 50 \cdot \log \left(\frac{100}{\sqrt{1 + \frac{\sum_{t=1}^k |R_t - T_t|^2}{k}}} \right). \quad (4)$$

Кинетические кривые сушки считаются сопоставимыми, если значение фактора подобия f_2 находится в интервале от 50 до 100.

Если хотя бы один из факторов не попадает в диапазон значений, при которых кинетические кривые считаются сопоставимыми, то принимая, что такие кривые значительно различаются.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты исследования кинетики замораживания, а также микрофотографии замороженного слоя, для образцов Алг-Хит и Алг-Хит-УЗ приведены на рис. 5.

Анализ температурных кривых заморозки образцов альгинат-хитозана позволил определить длительность каждой стадии процесса заморозки: I – охлаждение раствора, II – фазовый переход, III – полная кристаллизация раствора. Для Алг-Хит температура начала зародышеобразования составила 267.05 К, а температура фазового перехода 267.94 К. Для образца Алг-Хит-УЗ температура фазового перехода составила 271.94 К.

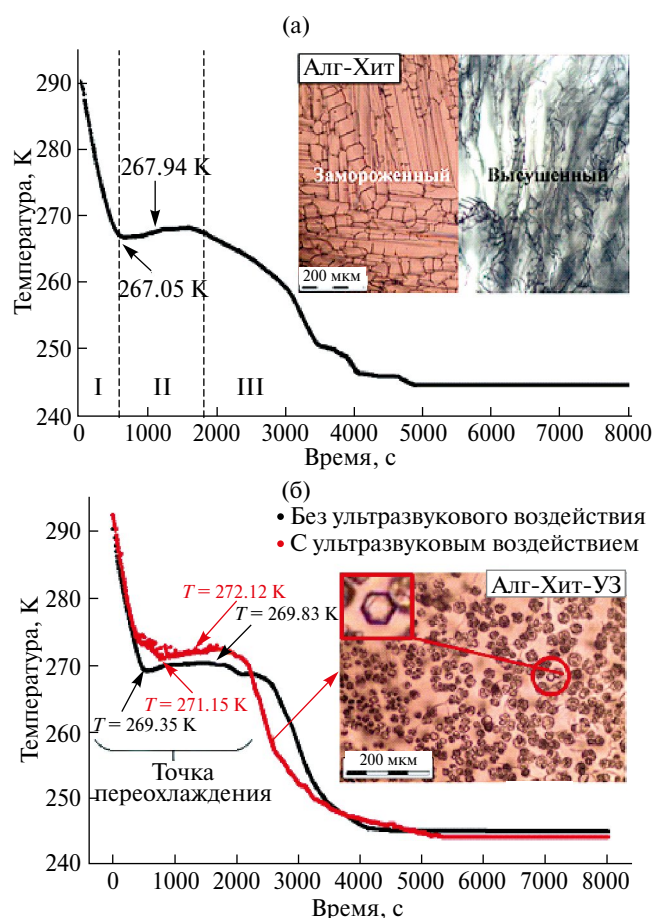


Рис. 5. Кинетика замораживания образцов альгинат-хитозана: образец Алг-Хит (а), сравнение образцов Алг-Хит и Алг-Хит-УЗ (б).

Для образцов Алг-Хит-УЗ (рис. 5б) были выявлены общая закономерность и преимущества применения ультразвука в процессе заморозки. Сокращение времени фазового перехода у образцов Алг-Хит-УЗ может быть связано с образованием большого количества центров кристаллизации. Ультразвук высокой мощности способствует образованию большого количества кавитационных пузырьков, сжатие которых вызывает зарождение кристаллов льда. Кроме того, еще одной причиной сокращения времени фазового перехода может быть явление, связанное с дроблением (за счет ультразвуковых колебаний) уже образованных кристаллов льда, которые в свою очередь могут выступать в качестве новых центров кристаллизации.

Необходимо отметить, что ультразвук также оказал влияние на температуру переохлаждения и фазового перехода для образцов Алг-Хит-УЗ. Температура переохлаждения и фазового перехода повышается. Соответственно, ультразвуковое воздействие позволяет инициировать начало зародышеобразования при более низкой степени переохлаждения. Это может быть связано с механизмом акустической кавитации, в результате которого схлопывание кавитационных пузырьков приводит к уменьшению энергетического барьера, необходимого для начала зарождения кристаллов льда. Также можно предположить, что поверхности кавитационных пузырьков могут выступать в качестве сторонних центров зародышеобразования.

Приведенные на рис. 5 снимки замороженного слоя образцов Алг-Хит и Алг-Хит-УЗ были получены во Всероссийском научно-исследовательском институте холодильной промышленности – филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН. Исследования проводились по методике, описанной в работе [14].

Анализ снимков замороженного слоя показал характер расположения кристаллов льда в образцах Алг-Хит (левая сторона снимков, рис. 5а). При этом снимки высушенных образцов Алг-Хит (правая сторона снимков, рис. 5а) показывают, что структура пор четко повторяет форму кристаллов льда.

Применение ультразвука на этапе фазового перехода в процессе заморозки позволило уменьшить размер образующихся кристаллов льда. На микрофотографии для образца Алг-Хит-УЗ наблюдаются зоны с большим скоплением мелких кристаллов льда, а также зоны свободные от кристаллов льда (рис. 5б). Зоны свободные от кристаллов льда представляют собой микрокана-

лы, которые при последующей сублимационной сушке способствуют активному массопереносу влаги. Кроме того, ультразвук способствует формированию кристаллов в виде правильных шестигранников.

Далее был проведен анализ результатов исследования кинетики вакуумной сублимационной сушки при различных режимах обработки образцов альгинат-хитозана (рис. 6).

В табл. 4 приведены результаты расчета факторов f_1 и f_2 для кинетических кривых сублимационной сушки.

Из приведенных в табл. 4 результатов расчета факторов f_1 и f_2 видно, что для кинетических кривых, полученных в режиме 1 и 2, подобие не наблюдается, следовательно, подобными также не будут считаться кинетические кривые для режима 1 и 3, а также для режима 1 и 4. Анализ результатов (табл. 4), показал, что кинетические кривые для четырех режимов сублимационной сушки образцов на основе альгинат-хитозана не являются подобными между собой.

Анализ результатов кинетики сушки показал, что совместное применение ультразвука на

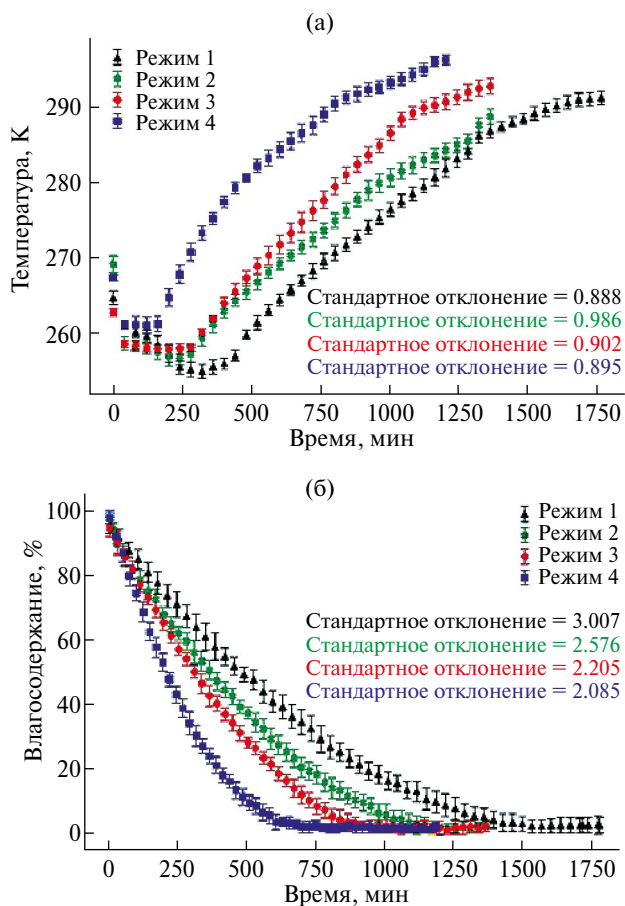


Рис. 6. Кинетика вакуумной сублимационной сушки образцов альгинат-хитозана: температура (а), влагосодержание (б).

Таблица 4. Температурно-временные параметры нагрева полок для режима 1

№ режима	f_1	f_2	Подобие
2	По сравнению с кинетической кривой, полученной для режима 1		
	41.72	68.12	нет
3	По сравнению с кинетической кривой, полученной для режима 2		
	34.80	70.08	нет
4	По сравнению с кинетической кривой, полученной для режима 3		
	86.52	50.38	нет

этапе заморозки и применение инфракрасного и импульсного ультразвукового воздействия на последующем этапе вакуумной сублимационной сушки приводят к синергетическому эффекту, тем самым интенсификация проходит на всех этапах технологического процесса, и более эффективно на этапе сушки. Для образца Алг-Хит-УЗ время процесса при сравнении режимов 1 и 4 сокращается на 596 минут (9.9 часа), что составляет 30% экономии временных затрат.

Данный результат объясняется наличием микроканалов в образцах, обработанных ультразвуком на этапе заморозки. Сформированные микроканалы способствуют активному массопереносу влаги в процессе сушки.

Для подтверждения образования микроканалов в образцах, обработанных ультразвуком на

этапе заморозки, высушенные образцы цилиндрической формы Алг-Хит и Алг-Хит-УЗ, полученные в режимах 1 и 4 соответственно, разрезали с помощью тонкого лезвия в осевом сечении (вид спереди) для всестороннего исследования влияния ультразвука на морфологию поверхности материалов. Для анализа морфологии поверхности образцов использовался сканирующий электронный микроскоп VEGA3 TESCAN (TESCAN, Чешская Республика). Исследования были проведены на кафедре химии и технологии кристаллов РХТУ им. Д.И. Менделеева. На рис. 7 представлены снимки сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) матриц на основе альгинат-хитозана в осевом сечении.

Анализ изображений СЭМ показал, что образцы Алг-Хит имеют неправильную пластин-

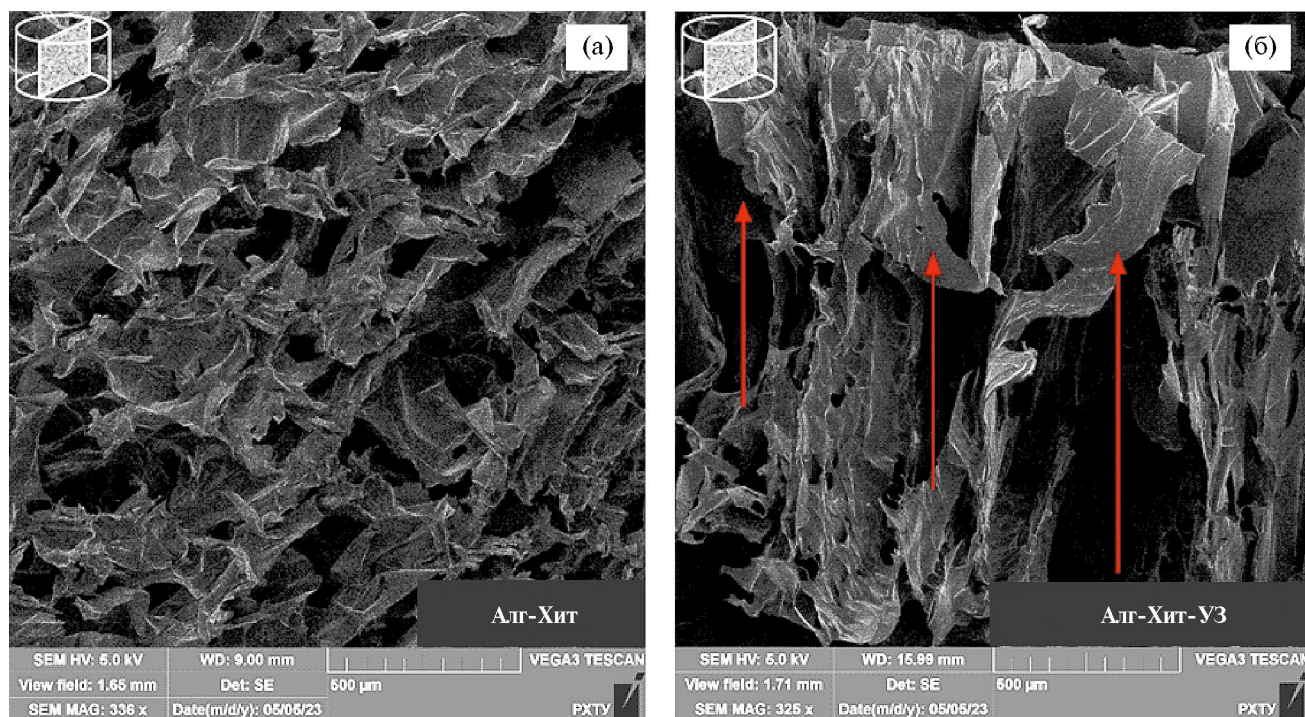


Рис. 7. Морфология поверхности матриц на основе альгинат-хитозана: хаотическое распределение пор в объеме полимерного каркаса (а), образование микроканалов в полимерном каркасе, обработанном ультразвуком на этапе заморозки (б).

чатую структуру альгинатного компонента с толщиной пластин до 3 мкм (рис. 7а). При сравнении снимков СЭМ образцов Алг-Хит и Алг-Хит-УЗ в осевом сечении видно, что ультразвук способствовал структурированию пластин альгинатного компонента в вертикальном положении, которое соответствует направлению воздействия ультразвуковых волн и соответственно акустического давления (рис. 7б). Средний размер пор образца Алг-Хит составил 160 мкм, а минимальный и максимальный размеры составили 70 и 250 мкм соответственно. Для образца Алг-Хит-УЗ в осевом сечении средний диаметр каналов составил 212 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен теоретический анализ в области интенсификации процесса вакуумной сублимационной сушки. Применение ультразвуковой обработки во время фазового перехода на стадии предварительной заморозки приводит к формированию множества зародышей кристаллов льда, тем самым стадия заморозки протекает более эффективно. Возникающие поверхностные напряжения в капиллярах приводят к формированию микроканалов, способствующих активному массопереносу влаги на последующем этапе сублимационной сушки. Для стадии вакуумной сублимационной сушки описаны основные механизмы интенсификации процесса за счет инфракрасного излучения и ультразвуковых колебаний.

Однако в научно-технической литературе не приводятся результаты интенсификации вакуумной сублимационной сушки на каждой стадии ведения процесса. Поэтому в работе предложены конструкции установок для проведения стадии предварительной заморозки с импульсным ультразвуковым воздействием, а также вакуумной сублимационной сушки с одновременным инфракрасным и ультразвуковым воздействием. Анализ кинетики заморозки показал, что импульсное воздействие ультразвуком с мощностью 50 Вт и частотой 40 кГц позволят интенсифицировать стадию предварительной заморозки. Совместное применение ультразвука на этапе заморозки и применение инфракрасного и импульсного ультразвукового воздействия на этапе сублимационной сушки приводит к синергетическому эффекту, тем самым интенсификация проходит на всех этапах технологического процесса, а экономия временных затрат составляет 30%.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

T полки	температура нагревательной полки;
τ	время выдерживания температуры полки, мин;
f_1	фактор различия;
f_2	фактор подобия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bedian L., Villalba-Rodriguez A.M., Hernandez-Vargas G., Parra-Saldivar R., Iqbal H.* Bio-Based Materials with Novel Characteristics for Tissue Engineering Applications – A Review // *Int. J. Biol. Macromol.* 2017. V. 98. P. 837.
2. Храмов Д.П., Сулягина О.А., Покусаев Б.Г., Вязьмин А.В., Некрасов Д.А. Нестационарный массоперенос в гелях с микроорганизмами // *Теорет. основы хим. технологии.* 2023. Т. 57. № 1. С. 71.
3. *Silva A.C.Q., Silvestre A.J.D., Vilela C., Freire C.S.R.* Natural Polymers-Based Materials: A Contribution to a Greener Future // *Molecules.* 2021. V. 27. № 1. P. 94.
4. *Farshidfar N., Iravani S., Varma R.S.* Alginate-Based Biomaterials in Tissue Engineering and Regenerative Medicine // *Mar. Drugs.* 2023. V. 21. № 3. P. 189.
5. *Andersen T., Auk-Emblem P., Dornish M.* 3D Cell Culture in Alginate Hydrogels // *Microarrays.* 2015. V. 4. № 2. P. 133.
6. *Gordienko M.G., Palchikova V.V., Kalenov S.V., Lebedev E.A., Belov A.A., Menshutina N.V.* The Alginate–Chitosan Composite Sponges with Biogenic Ag Nanoparticles Produced by Combining of Cryostructuring, Ionotropic Gelation and Ion Replacement Methods // *Int. J. Polym. Mater. Polym. Biomater.* 2022. V. 71. № 1. P. 34.
7. Freeze-drying: The Basic Process // *Encyclopedia of Food and Health* / Eds. Caballero B., Finglas P.M., Toldra F. Oxford: Academic Press, 2016. P. 104.
8. Семенов Г.В., Краснова И.С. Развитие технологии сублимационной сушки в современной России // *Сб. тр. Современные энергосберегающие тепловые и массообменные технологии (сушка, тепловые и массообменные процессы) СЭТМТ.* М., 2023. С. 58–60.
9. *Stankiewicz A., Moulijn J.A.* Process Intensification // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2002. V. 41. № 8. P. 1920.
10. *Becht S. et al.* An industrial view of process intensification // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification.* 2009. V. 48. № 1. P. 329.
11. *Nowak D., Lewicki P.P.* Infrared drying of apple slices // *Innovative Food Science & Emerging Technologies.* 2004. V. 5. № 3. P. 353.
12. *Duan X. et al.* Trends in Microwave-Assisted Freeze Drying of Foods // *Drying Technology.* 2010. V. 28. № 4. P. 444.

13. *Carcel J.A. et al.* Ultrasound Effects on the Mass Transfer Processes during Drying Kinetic of Olive Leaves (*Olea Europea*, var. Serrana) // DDF. 2010. V. 297–301. P. 1083.
14. *Mokhova E. et al.* Ultrasonic freezing of polymers of various compositions before freeze drying: Effect of ultrasound on freezing kinetics and ice crystal size // Drying Technology. 2023. V. 41. № 10. P. 1663.
15. *Hottot A., Nakagawa K., Andrieu J.* Effect of ultrasound-controlled nucleation on structural and morphological properties of freeze-dried mannitol solutions // Chemical Engineering Research and Design. 2008. V. 86. № 2. P. 193.
16. *Passot S. et al.* Effect of Controlled Ice Nucleation on Primary Drying Stage and Protein Recovery in Vials Cooled in a Modified Freeze-Dryer // Journal of Biomechanical Engineering. 2009. V. 131. № 7. P. 5.
17. *Cogne C. et al.* Theoretical model of ice nucleation induced by inertial acoustic cavitation. Part 2: Number of ice nuclei generated by a single bubble // Ultrasonics Sonochemistry. 2016. V. 28. P. 185.
18. *Mozdziejcz N.J. et al.* Mathematical modeling and experimental validation of continuous slug-flow tubular crystallization with ultrasonication-induced nucleation and spatially varying temperature // Chemical Engineering Research and Design. 2021. V. 169. P. 275.
19. *Morris L. et al.* Dynamic monitoring of glycine crystallisation with low power ultrasound reflection spectroscopy // Chemical Engineering Research and Design. 2021. V. 170. P. 213.
20. *Ma X., Mei J., Xie J.* Mechanism of ultrasound assisted nucleation during freezing and its application in food freezing process // International Journal of Food Properties. 2021. V. 24. № 1. P. 68.
21. *Garcia-Noguera J. et al.* Ultrasound-Assisted Osmotic Dehydration of Strawberries: Effect of Pretreatment Time and Ultrasonic Frequency // Drying Technology. 2010. V. 28. P. 294.
22. *Chow R. et al.* A study on the primary and secondary nucleation of ice by power ultrasound // Ultrasonics. 2005. V. 43. № 4. P. 227.
23. *Legay M. et al.* Enhancement of Heat Transfer by Ultrasound: Review and Recent Advances // International Journal of Chemical Engineering. 2011. V. 2011. P. 1.
24. *Pan Z. et al.* Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating and freeze-drying // LWT – Food Science and Technology. 2008. V. 41. № 10. P. 1944.
25. *Khampakool A., Soisungwan S., Park S.H.* Potential application of infrared assisted freeze drying (IRAFD) for banana snacks: Drying kinetics, energy consumption, and texture // LWT. 2019. V. 99. P. 355.
26. *Krishnamurthy K. et al.* Infrared Heating in Food Processing: An Overview // Comp Rev Food Sci Food Safety. 2008. V. 7. № 1. P. 2.
27. *Li A. et al.* Medium and short-wave infrared drying: Principles, applications, and future trends // Drying Technology. 2023. P. 1.
28. *Xu H. et al.* Effect of Power Ultrasound Pretreatment on Edamame Prior to Freeze Drying // Drying Technology. 2009. V. 27. № 2. P. 186.
29. *Brines C. et al.* Influence of the Ultrasonic Power Applied on Freeze Drying Kinetics // Physics Procedia. 2015. V. 70. P. 850.
30. *Schössler K., Jäger H., Knorr D.* Novel contact ultrasound system for the accelerated freeze-drying of vegetables // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2012. V. 16. P. 113.
31. *Мохова Е.К., Гордиенко М.Г., Меньшутина Н.В.* Устройство для интенсификации процесса вакуумной сублимационной сушки с одновременным регулированием инфракрасного нагрева и сменного источника ультразвука в объеме рабочей камеры. Пат. 218559. 2023.