

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу **Моховой Елизаветы Константиновны** «Интенсификация и моделирование вакуумной сублимационной сушки материалов различной структуры (на примере биополимерных матриц и суспензий)», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий

Актуальность работы. В настоящее время важным направлением развития медицины и биотехнологии является получение новых биodeградируемых материалов различной структуры, что отражено в постановлении Правительства РФ от 22 октября 2021 года № 1814 об утверждении государственной программы «Научно-технологическое развитие Российской Федерации». В частности, диссертационная работа Е.К. Моховой сосредоточена на получении полимерных матриц и частиц методом вакуумной сублимационной сушки. Подобного рода материалы широко применяются в тканевой инженерии для восстановления пораженных тканей и органов, а также в качестве систем доставки лекарств.

При разработке технологий сушки термолабильных и легкоокисляющихся материалов широко используют вакуумную сублимационную сушку, которая является энергоемким и длительным процессом. Интенсификация процесса вакуумной сублимационной сушки остается актуальным направлением в сфере получения биополимерных материалов. В представленной Е.К. Моховой диссертационной работе изучены вопросы интенсификации вакуумной сублимационной сушки и предложены новые технические решения для различных стадий процесса (предварительная заморозка и непосредственно сушка).

Как отмечено автором, работа выполнена в рамках государственного задания при поддержке Министерства науки и высшего образования

Российской Федерации, что является дополнительным подтверждением востребованности представленной темы и ее актуальности.

В рамках диссертационной работы была поставлена и достигнута цель, включающая проведение исследований по получению материалов различной структуры, интенсификацию и математическое моделирование процесса вакуумной сублимационной сушки.

Научная новизна работы заключается в классификации типов материалов, в зависимости от их физической структуры и технологии получения, что впоследствии позволяет сформулировать определенные допущения при математическом моделировании кинетики вакуумной сублимационной сушки.

В работе исследовано влияние ультразвука на морфологию кристаллов льда, а далее – на структуру и морфологию материалов, получаемых из кристаллов после вакуумной сублимационной сушки.

Изучено влияние ультразвука на кинетику заморозки, а также влияние давления водяных паров, инфракрасного излучения и ультразвукового воздействия на кинетику вакуумной сублимационной сушки.

Разработана комплексная математическая модель, включающая расчеты кинетики заморозки полимерных материалов, в том числе с учетом влияния ультразвука на кинетику заморозки; подобраны коэффициенты эмпирического уравнения, описывающего распределение кристаллов льда по размерам; проведены расчеты скорости тепло- и массопереноса в процессе вакуумной сублимационной сушки и предложен подход для учета особенностей строения материала; произведено объединение двух моделей, а именно, математической модели для расчета кинетики сушки для различных материалов и математической модели, использующей для учета неравномерного распределения водяных паров по объемам лабораторного и промышленного лиофилизаторов (программный пакет Ansys Fluent).

Теоретическая и практическая значимость работы. Апробированы методики получения материалов различной структуры: матриц и суспензий.

Предложен ряд конструктивных решений для интенсификации стадии предварительной заморозки и последующей вакуумной сублимационной сушки, с применением ультразвука и инфракрасного излучения. Необходимо отметить, что данные исследования были проведены впервые для биополимерных матриц и суспензий.

Для исследования кинетики вакуумной сублимационной сушки с одновременным инфракрасным и ультразвуковым воздействием автором были разработаны автоматизированная система управления процессом сушки и программный модуль, отвечающий за накопление экспериментальных данных и отображение информации о ключевых показателях высушиваемого материала, температуры и влагосодержания, в режиме реального времени.

Проведены расчеты экономической эффективности процесса вакуумной сублимационной сушки.

В результате проделанной работы диссертант зарегистрировал ряд программ для ЭВМ и один патент на полезную модель, что также подчеркивает практическую значимость проделанной работы.

Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов. Достоверность результатов работы подтверждается достаточным объемом экспериментальных данных, полученных с применением современных аналитических методов и стандартизированных методик. При аналитических исследованиях образцов было использовано множество общепринятых методов, например, сканирующей электронной микроскопии; и гелиевой пикнометрии. В работе использованы известные методы математического и компьютерного моделирования.

Научные положения апробированы на международных и российских конференциях, опубликованы научные статьи в рецензируемых научных изданиях.

Структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 194 наименований, 5 приложений. Общий объем работы составляет 241 страницу печатного текста, включая 35 таблиц и 94 рисунка.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации. Автореферат диссертации в полном объеме соответствует содержанию диссертационной работы.

Соответствие диссертации предъявляемым требованиям. Диссертация **Моховой Елизаветы Константиновны** «Интенсификация и моделирование вакуумной сублимационной сушки материалов различной структуры (на примере биополимерных матриц и суспензий)» соответствует паспорту научной специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий по следующим направлениям исследований:

- Фундаментальные исследования явлений переноса энергии, массы и импульса в химико-технологических процессах и аппаратах.
- Способы, приемы, методология исследования гидродинамики движения жидкости, газов, перемещение сыпучих материалов в технологических аппаратах и схемах.
- Способы, приемы, методология исследования химических, тепловых, массообменных и совмещенных процессов, совершенствование их аппаратного оформления.
- Способы, приемы, методология изучения нестационарных режимов протекания процессов в химической аппаратуре, в том числе с целью формирования предпосылок эффективного управления и автоматизации.
- Методы и способы интенсификации химико-технологических процессов, в том числе с помощью физико-химических воздействий на перерабатываемые материалы.

Соискателем представлено необходимое количество публикаций, содержание которых достаточно полно отражает содержание диссертационной работы. Результаты работы представлены на 1 научной конференции всероссийского и 8 научных конференциях международного уровня. Оформление диссертации и автореферата выполнено в соответствии с требованиями, изложение диссертации выстроено логично.

По объему исследований, актуальности, научной новизне и практической значимости диссертационная работа **Моховой Елизаветы Константиновны** полностью соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней в РХТУ им. Д.И. Менделеева и положением о диссертационном совете РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Публикации, отражающие основное содержание диссертации. Основное содержание диссертации с достаточной полнотой отражено в 22 печатных работах, из них 5 в журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, и 1 статья из перечня ВАК. Получен 1 патент на полезную модель. Зарегистрировано 5 программ для ЭВМ.

Вопросы и замечания по диссертационной работе.

При анализе представленного материала возникли следующие вопросы и замечания:

1. Формула (1.1) на с. 55 и следующая из нее формула (4.1) на с. 144 не учитывают конвективный перенос теплоты (свободную конвекцию) в объеме жидкости. Необходимо было выполнить хотя бы оценку вклада свободной конвекции.

2. Уравнение (1.10) предполагает ламинарный режим фильтрации. Выполнялась ли проверка режима для водяного пара?

3. Таблица 3.1 на с. 90 содержит избыточное количество значащих цифр (6 для скорости звука, 7 для интенсивности ультразвука, 8 для давления). Такая точность вряд ли подкреплена высокоточными исходными данными.

4. Рис. 4.1. Если ось абсцисс – время, то положение фронта замерзания на оси ординат должно меняться со временем.

5. В формулах (4.21), (4.23) фигурируют различные коэффициенты λ и h , поэтому им должны быть присвоены разные индексы. То же относится к числам Нуссельта в уравнениях (4.25), (4.26). В формулах (4.21), (4.23) не определены переменные $T_{\text{возд}}$, $T_{\text{пов}}$, $T_{\text{стекло}}$, $T_{\text{низ}}$.

6. Если формула (4.26) описывает теплоотдачу от поверхности стеклянной чашки Петри к массе льда, почему использована теплопроводность стекла?

7. Если формула (4.23) описывает зону контакта поверхности стеклянной чашки Петри и массы льда в нижней части охлаждаемой массы, то здесь должны быть сформулированы граничные условия четвертого рода для контакта твердых тел.

8. Коэффициент h в уравнении (4.21) является коэффициентом теплоотдачи, а не теплопередачи.

9. В диссертации не указано, к какой зоне – жидкостной или твердой относится уравнение (4.27) для расчета числа Нуссельта.

10. Из материалов диссертации не очевидно, доказан ли количественно синергетический эффект от инфракрасного нагрева и ультразвукового воздействия при вакуумной сублимационной сушке (п. 3.2.2).

11. На с. 147 фраза «дифференциальные уравнения решались методом конечных разностей» не раскрывает конкретно использованные методы, их устойчивость и точность.

12. В работе имеются немногочисленные опечатки (с. 87, 110, 114), стилистические ошибки, а также незначительные недочеты при оформлении таблиц, рисунков и списка литературы.

Заключение. Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Выполненное

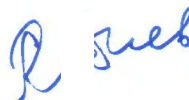
исследование указывает на высокий профессиональный уровень соискателя. Диссертация прошла хорошую апробацию и достаточно полно опубликована.

Диссертационная работа **Моховой Елизаветы Константиновны** на тему «Интенсификация и моделирование вакуумной сублимационной сушки материалов различной структуры (на примере биополимерных матриц и суспензий)» является законченной научно-квалификационной работой, которая полностью соответствует Положению о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденного приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева от 14.09.2023 г. № 103ОД. Автор диссертации – **Мохова Елизавета Константиновна** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий.

Официальный оппонент

Заведующий кафедрой оптимизации химической и биотехнологической аппаратуры ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)»

д. т. н., профессор

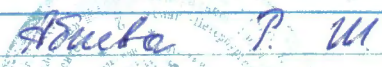



Абиев Руфат Шовкетович

Адрес: 190013, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 26.

Телефон: +7 (812) 494-92-76

E-mail: abiev.r@technolog.edu.ru

Подпись	
Начальник	


Т. Д. Крохове