



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева»

Факультет цифровых технологий и химического инжиниринга
Кафедра химического и фармацевтического инжиниринга



Доклад на тему:

**«Математическая модель вакуумной
сублимационной сушки с неравномерным
распределением паров по объемам лабораторного и
промышленного лиофилизаторов»**

Докладчик: Мохова Е.К., магистрант 2-го года обучения.

Научный руководитель: д.т.н., профессор кафедры ХФИ Гордиенко М.Г.

**Москва
2022**

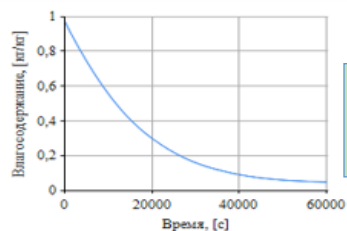


Эксперимент

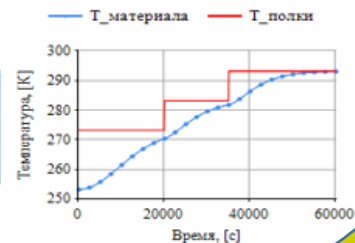
Затраты на материалы
(реагенты, клетки и т.д.)

Затраты на
электроэнергию

Затраты времени



Математическая модель



Отсутствие существенных
материальных и
энергетических затрат

Возможность быстро
получить кинетические
характеристики процесса

Быстрый подбор
режимов сушки



Цель работы:

Разработка математической модели вакуумной сублимационной сушки с учетом неравномерного распределения водяных паров по объемам лабораторного и промышленного лиофилизаторов

Задачи:

Экспериментальная работа

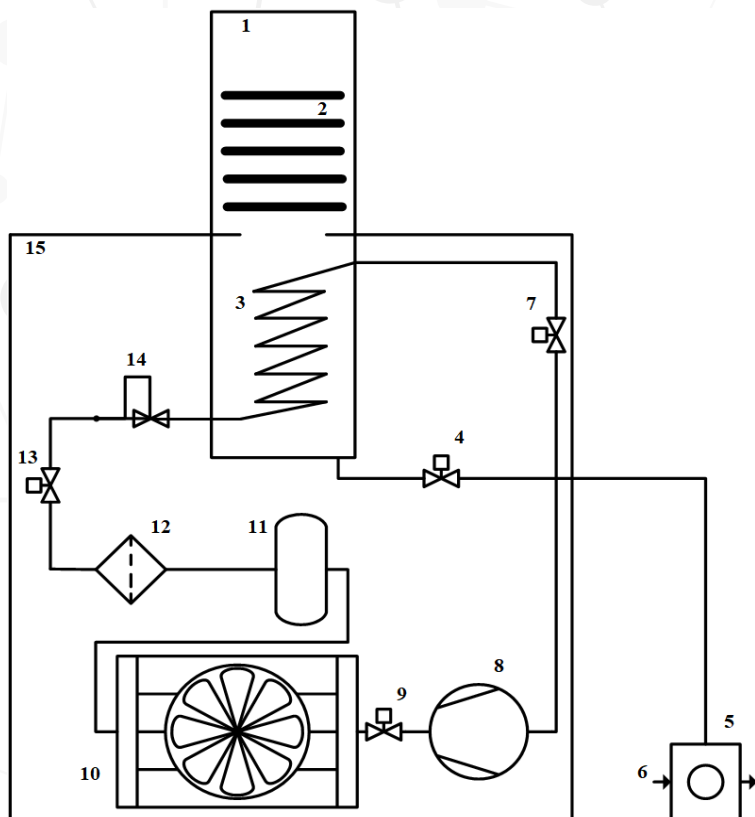
1. Снятие экспериментальных точек влагосодержания во время процесса сушки альгината натрия в лабораторном лиофилизаторе Coolsafe 100-9 для дальнейшего определения адекватности математической модели.

Математическое моделирование

1. Математическое моделирование кинетики процесса вакуумной сублимационной сушки альгината натрия:

- учет неравномерного распределения водяных паров в объеме рабочей камеры и влияние градиентов давления на кинетику сушки;
- объединение модели кинетики сушки и расчета газодинамики в ANSYS Fluent.
- Проведение расчетов для лабораторного и промышленного лиофилизаторов.

Лабораторный лиофилизатор Coolsafe 100-9

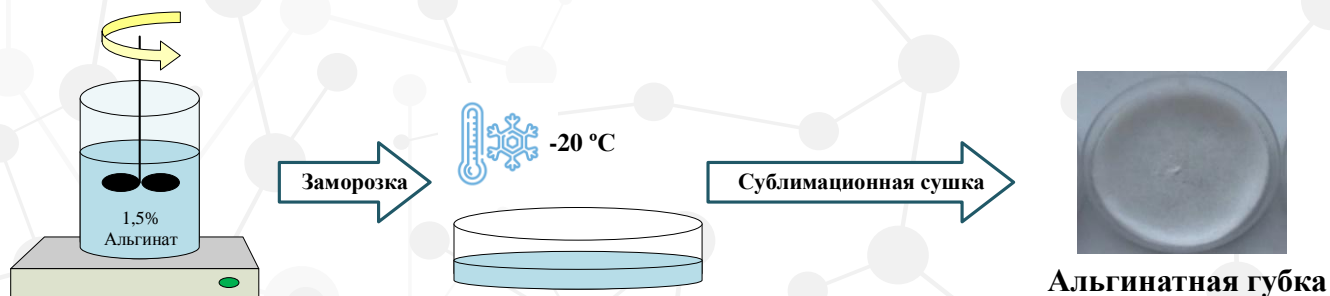


1 – камера сублиматора; 2 – нагревательные полки; 3 – конденсор; 4 – вакуумный клапан; 5 – вакуумный насос; 6 – газ носитель; 7 – соленоидный клапан; 8 – компрессор; 9 – клапан управления хладагентом; 10 – конденсатор с воздушным охлаждением; 11 – приемный резервуар; 12 – фильтр-осушитель; 13 – клапан управления потоком хладагента; 14 – терморегулирующий клапан; 15 – корпус установки

Температурный режим сушки

$T_{\text{полки}}, \text{K}$	273,15	278,15	283,15	293,15
$\tau_{\text{режима}}, \text{c}$	0 - 28800	28800-46800	46800-68400	68400-90000

Снятие экспериментальных точек влагосодержания



Приготовление образцов

Проведение процесса вакуумной сублимационной сушки; остановка процесса в 4 временных точках

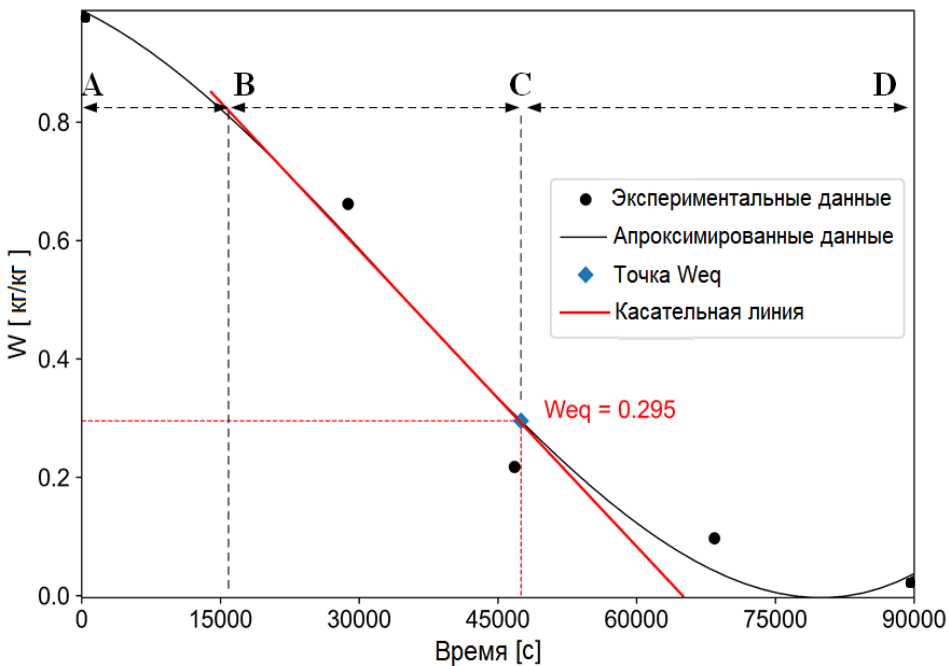
Определение остаточного влагосодержания материалов

Высушиваемый материал	Время сушки, с			
	28800	46800	68400	90000
Высушиваемый материал	Влагосодержание			
	W ₁ , %	W ₂ , %	W ₃ , %	W ₄ , %
Полка 1				
Альгинат 1	66.18	21.73	9.68	2.33
Полка 5				
Альгинат 5	67.02	22.08	10.96	2.86

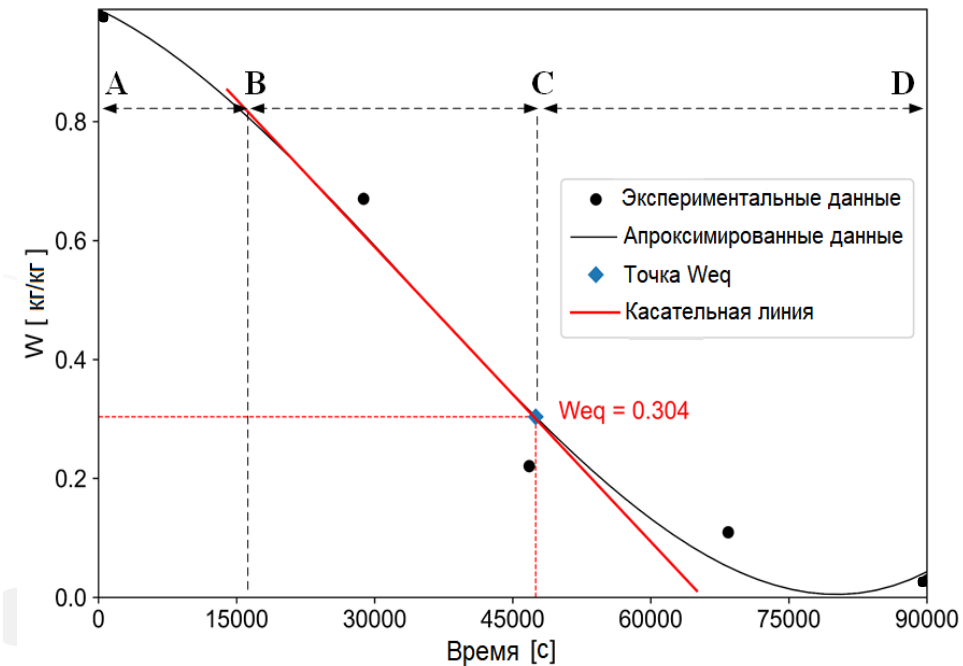
Определение критического влагосодержания



Альгинат натрия, Полка 1
 $T=253.15$ [К], $P=100$ [Па]



Альгинат натрия, Полка 5
 $T=253.15$ [К], $P=100$ [Па]

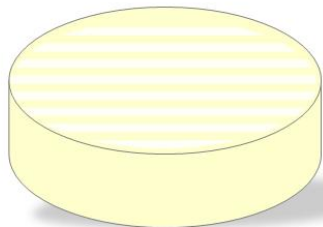


AB – период прогрева материала; BC – первый период сушки; CD – второй период сушки

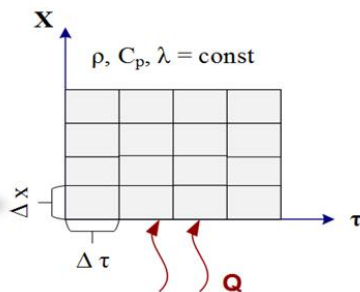
Структура разработанной математической модели



Альгинат натрия



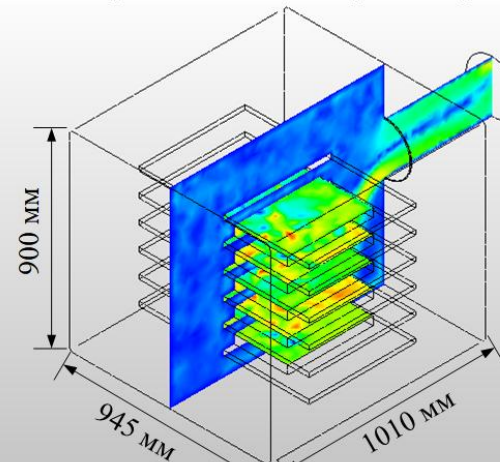
$\rho, C_p, \lambda = const$



CFD Моделирование

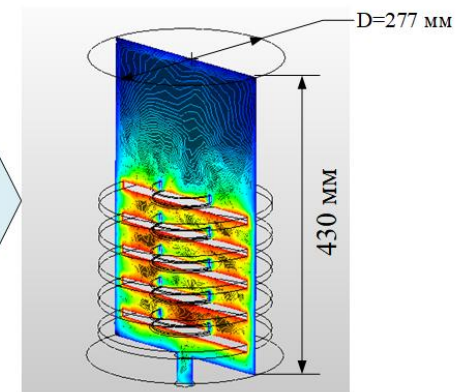
ANSYS Fluent 17.0

Промышленный лиофилизатор



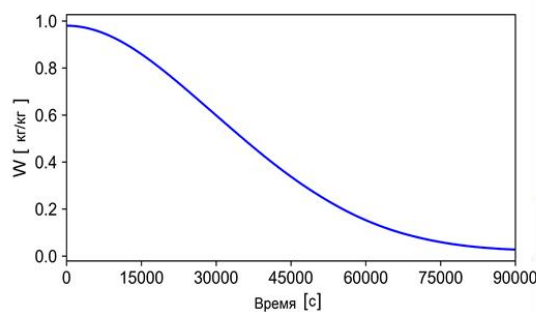
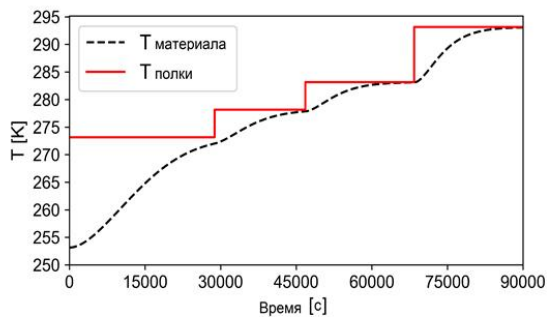
UDF: temperature; mass flow

Лабораторный лиофилизатор



UDF: temperature;
mass

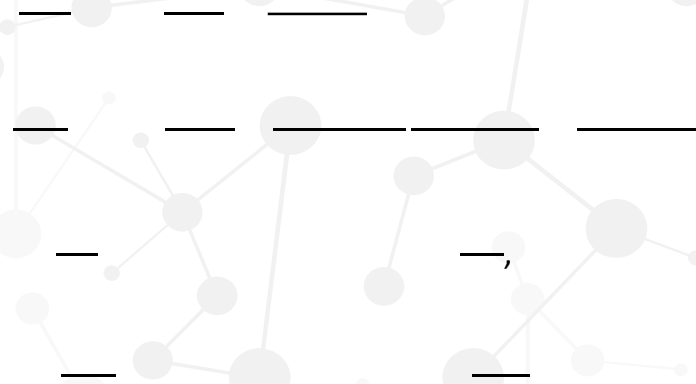
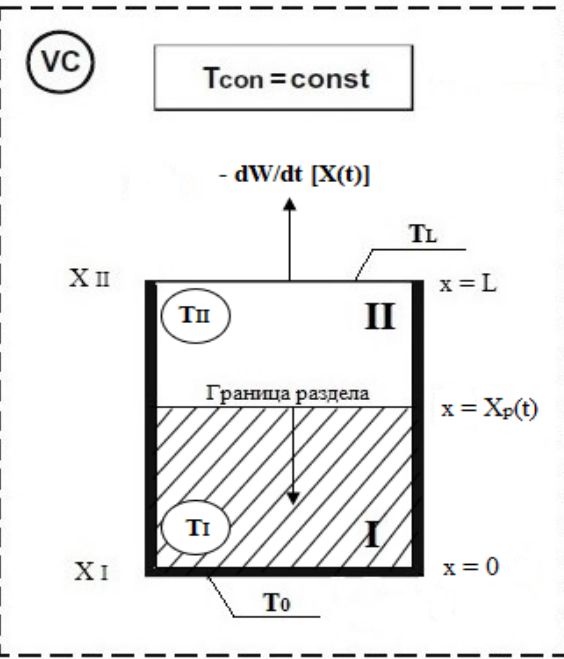
РАСЧЕТ КИНЕТИКИ СУШКИ – Python



Математическая модель кинетики сублимационной сушки



Первый период сушки:



Начальные условия:

$$T_I = T_{II}, \quad t = 0$$

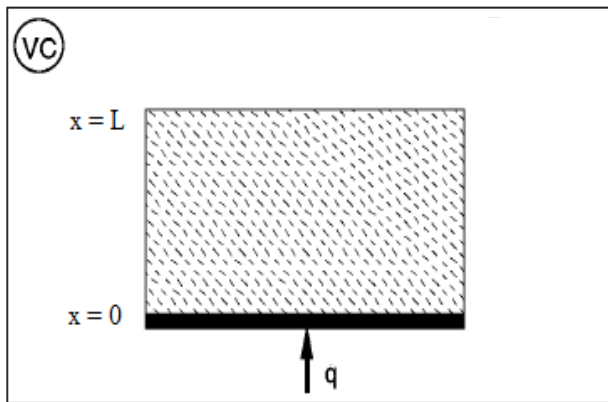
$$W = 0.98, \quad t = 0$$

Граничные условия:

$$T_0 = T_I, \quad x = 0, \quad t > 0$$

$$T_{II} = T_L, \quad x = L, \quad t > 0$$

Второй период сушки:



()

Начальные условия:

()

Граничные условия:

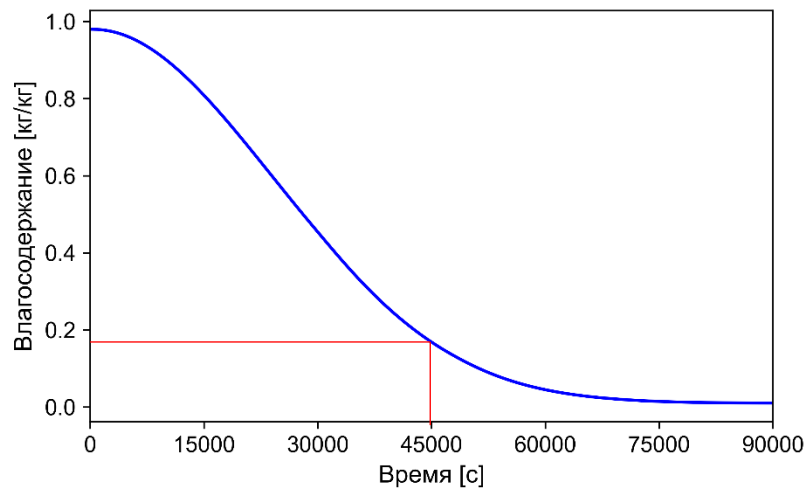
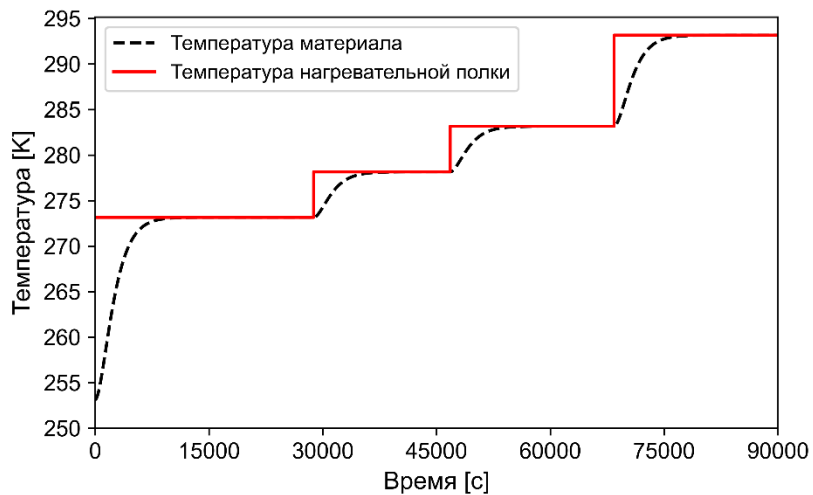
$$\sqrt{\quad}$$

(—)

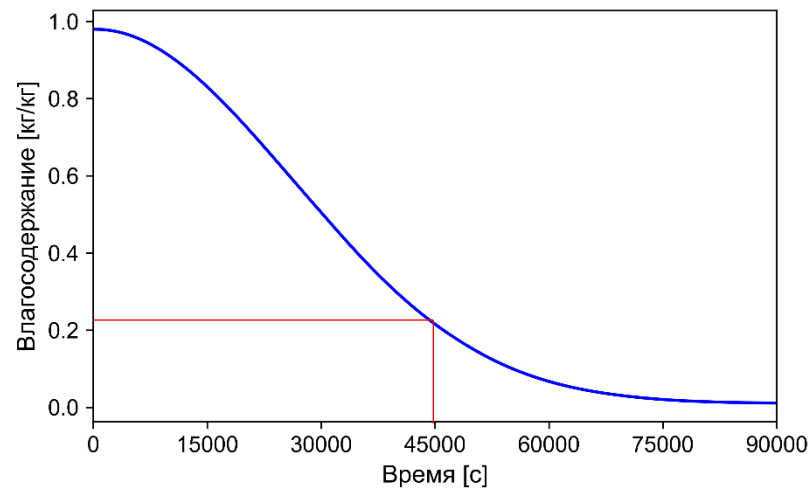
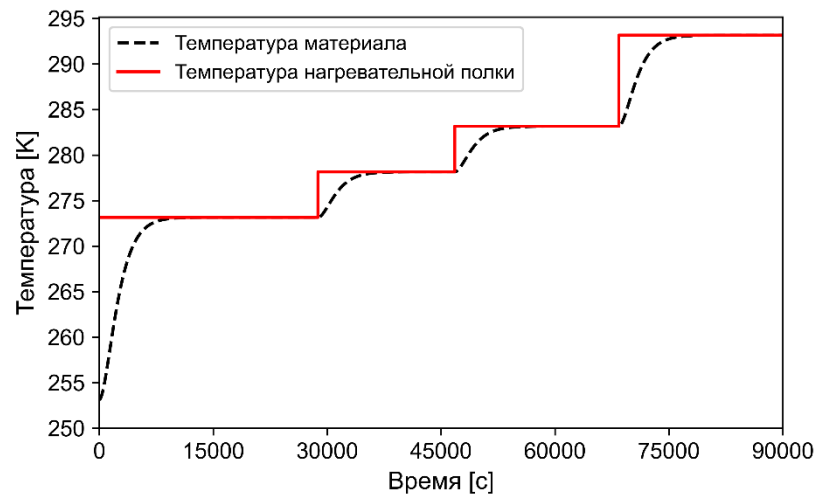
Результаты расчета кинетики сушки



$T_H=253.15$ [K], $P=5$ [Па]



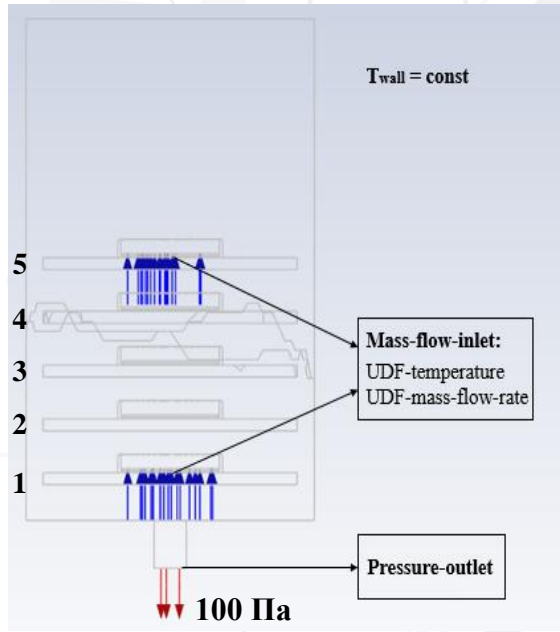
$T_H=253.15$ [K], $P=100$ [Па]



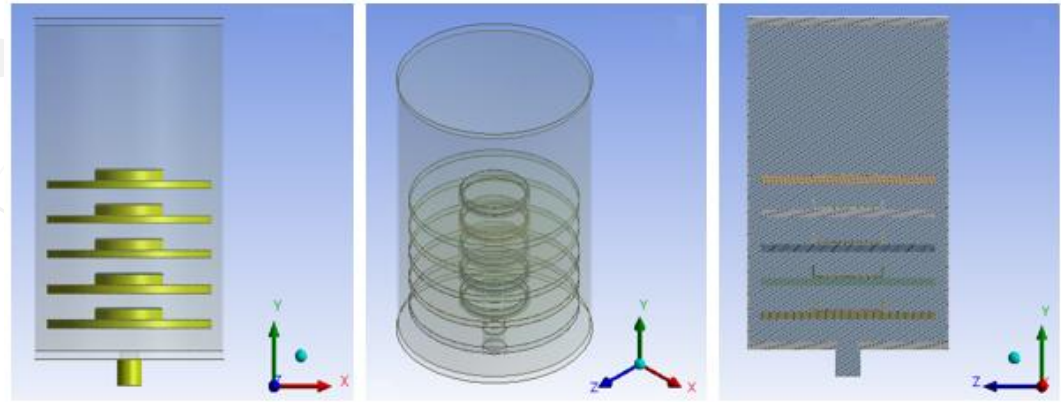
Расчет профилей давлений в лабораторном лиофилизаторе



Расчетная область и граничные условия



Геометрия рабочей камеры лиофилизатора



Закон сохранения:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_S \rho \phi \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = \int_V S_\phi dV$$

Начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned} & \phi = \phi_0 \quad \text{on } V \\ & \phi = \phi_w \quad \text{on } S_w \\ & \mathbf{n} \cdot \nabla \phi = q_w \quad \text{on } S_w \end{aligned}$$

Дополнительные соотношения:

$$\left(\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \right)$$

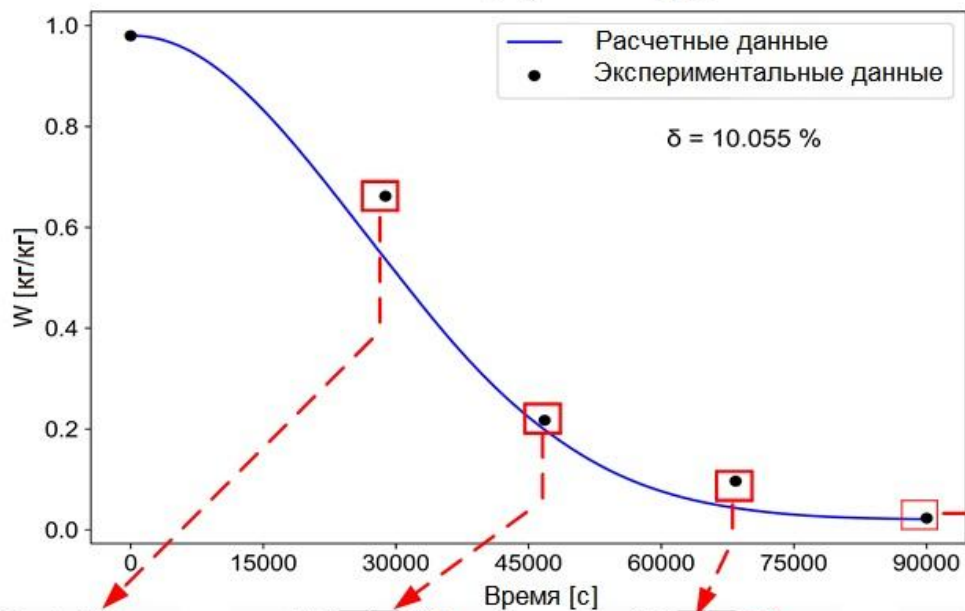
Геометрические размеры рабочей камеры и элементов

Камера		Нагревательные полки		Чашки Петри		Патрубок	
Высота, мм	430	Высота, мм	10	Высота, мм	14	Высота, мм	70
D_{out} , мм	277	D , мм	250	D_{out} , мм	99	D_{out} , мм	55
D_{in} , мм	272	Расстояние, мм	45	D_{in} , мм	93	D_{in} , мм	50

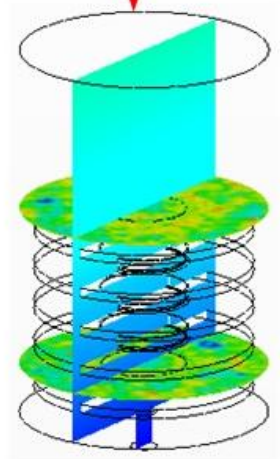
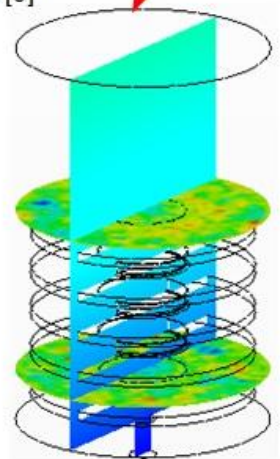
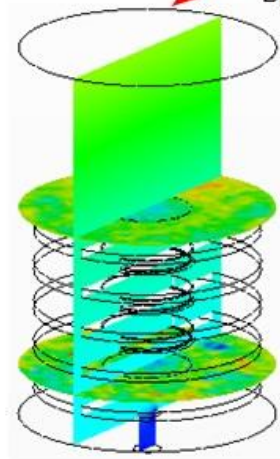
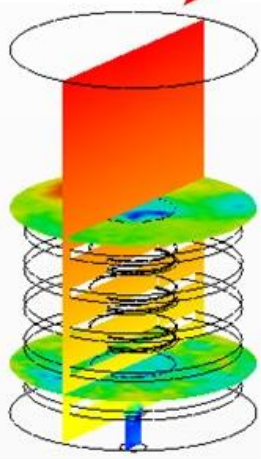
Оценка адекватности математической модели



Гомогенный материал, Полка 1
 $T=253.15$ [K], $P=100$ [Па]



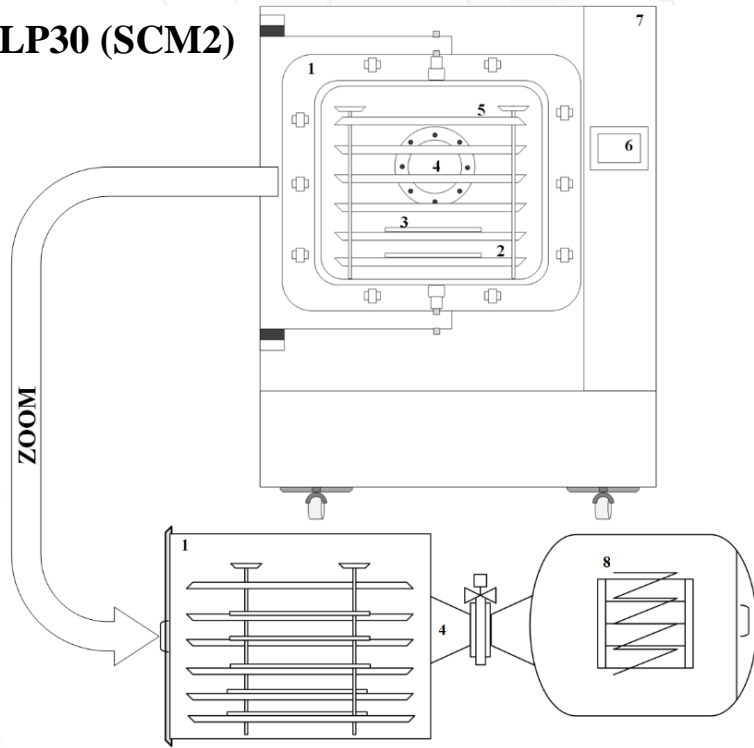
Давление
106.896
105.172
103.448
101.724
100.000
[Па]



Расчет профилей скоростей водяных паров в промышленном лиофилизаторе

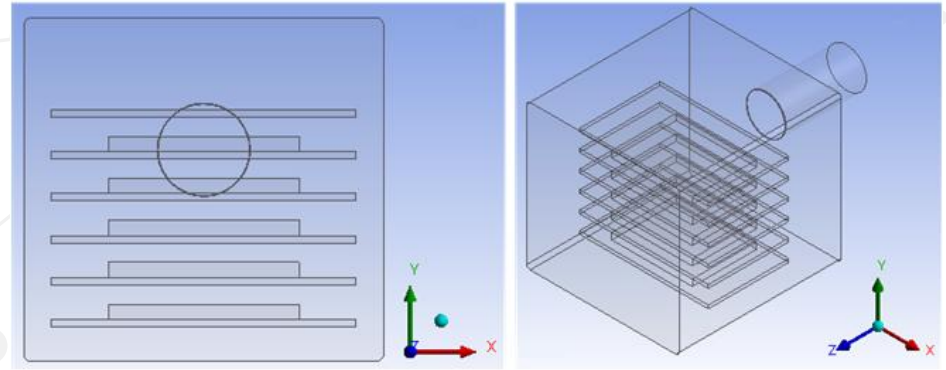


LP30 (SCM2)

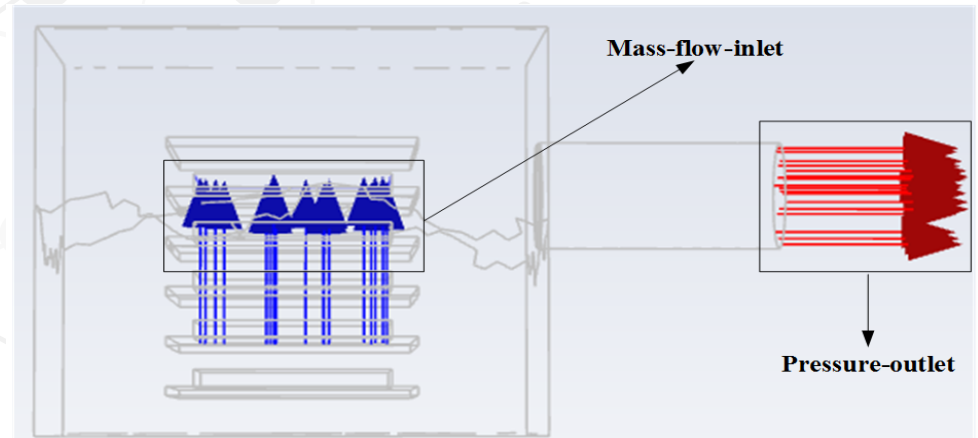


1 – камера сублиматора; 2 – нагревательные полки; 3 – поддоны с материалом; 4 – соединительный патрубок; 5 – дополнительная нагревательная полка; 6 – панель управления; 7 – корпус установки; 8 – конденсор

Геометрия лиофилизатора



Расчетная область и граничные условия

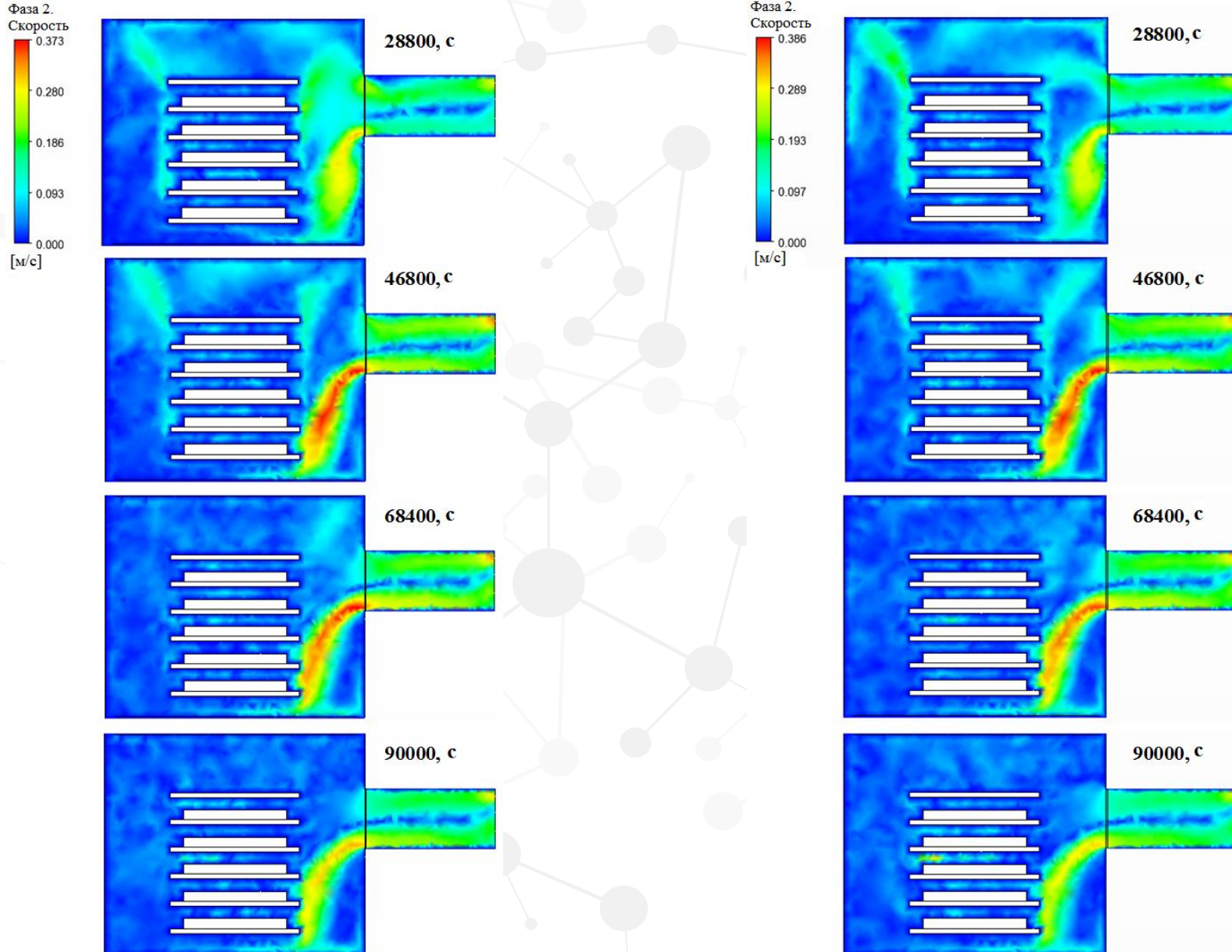


Геометрические размеры рабочей камеры и элементов

Камера		Нагревательные полки		Поддоны		Патрубок	
Высота, мм	900	Высота, мм	20	Высота, мм	40	Длина, мм	500
Ширина, мм	945	Ширина, мм	800	Ширина, мм	500	D_{out} , мм	250
Длина, мм	1010	Длина, мм	500	Длина, мм	400	D_{in} , мм	245

$T_H = 253.15$ [K], $P = 100$ [Па]

$T_H = 253.15$ [K], $P = 5$ [Па]



Выводы:



1. Разработан и продемонстрирован метод объединения двух математических моделей, который позволил прогнозировать и исследовать влияние градиентов давления на скорость процесса сушки материалов, находящихся на разном расстоянии от конденсора как в лабораторном, так и в промышленном лиофилизаторах.
2. Полученные результаты математического моделирования кинетики вакуумной сублимационной сушки в лабораторной установке Coolsafe 100-9 для альгината натрия показали хорошую сходимость с экспериментальными данными. Рассчитанный режим сушки подошел для альгинатной губки.
3. Моделирование газодинамики в промышленном лиофилизаторе LP30 показало наличие застойных зон в области левой части первой полки, т.к. скорость потока водяного пара в данной области минимальна. Также необходимо отметить, что сушка на пятой полке завершается быстрее, т.к. после 28800 секунд скорость отвода водяных паров для 5, 4 и 3 полок падает, а для 2 и 1 полок возрастает. Это связано с тем, что верхние полки находятся в непосредственной близости к области конденсора, поэтому отвод паров максимален.

Спасибо за внимание!