

УДК 66.047.3.049.6

Эффективная теплопроводность замороженных дисперсных материалов в процессах вакуумного обезвоживания*

Д-р техн. наук Г. В. СЕМЕНОВ, канд. техн. наук М. С. БУЛКИН
Semenov@msaab.ru

Московский государственный университет пищевых производств
125080, г. Москва, Волоколамское ш., 11

В работе предложена оригинальная конструкция прибора для определения эффективной теплопроводности дисперсных материалов. Особенностью прибора является воспроизведение в измерительной ячейке условий, максимально приближенных к ситуации, которая возникает в процессе вакуумной сублимационной сушки. Экспериментально получены численные значения, которые могут быть использованы в инженерных расчетах.

Ключевые слова: сублимационная сушка, эффективная теплопроводность полидисперсных материалов, тепломассообмен в вакууме.

Effective thermal conductivity of frozen dispersed materials in the process of vacuum dehydration

D. Sc. G. V. SEMENOV, Ph. D. M. S. BULKIN
Semenov@msaab.ru

Moscow National University of Food Production
125080, Moscow, Volokolamskoye, 11

The paper presents the original design of the device to measure the effective thermal conductivity of dispersed materials. Feature of the device is to reproduce in the measuring cell conditions as close as possible to a situation that arises in the process of vacuum freeze-drying. Experimentally obtained numerical values that can be used in engineering calculations.

Keywords: freeze-drying, the effective thermal conductivity of polydisperse materials, heat and mass transfer in a vacuum.

Развитие промышленных технологий вакуумной сублимационной сушки фруктов и овощей, нарезанных мелкими кубиками или тонкими пластинами, а также замороженных в виде гранул соков и пюре, ставит перед инженерами задачи по расчету параметров процессов. Важнейшим параметром в этих расчетах является эффективная теплопроводность слоя дисперсного материала на греющей поверхности. В доступной литературе сегодня отсутствуют численные значения этого параметра, найденного применительно к условиям сушки дисперсных термолабильных материалов. В данной работе выполнены оригинальные экспериментальные исследования по определению эффективной теплопроводности в условиях, формирующихся в процессах вакуумного сублимационного обезвоживания при режимных параметрах, характерных для сушки термолабильных пищевых материалов. Отметим, что первые эксперименты в этом

направлении были проведены в 1970-е годы В. И. Карповым при исследовании теплопроводности в вакууме сублимированных образцов рыбы различных пород [1].

Центральным вопросом экспериментального нахождения эффективных значений теплопроводности является создание в измерительной ячейке тех условий укладки и контактирования частиц дисперсного материала, газодинамического и температурного режимов, которые имеют место в реальных промышленных условиях. Как известно, продвижение фронта в процессах сублимационной сушки пищевых термолабильных материалов происходит в квазистационарном режиме, т.е. в любой момент времени отличие распределения температурного поля в осушенной зоне согласно нашим оценкам не превышает 4%. По этой причине и в измерительном блоке прибора необходимо воспроизвести этот режим. Еще одним важным условием получения достоверных результатов является поддержание в приборе граничных условий, имеющих место в реальных условиях вакуумной сублимационной сушки. На одной из контактирующих с дисперсным материалом пластин установить температуру, равную температуре сублимации, а на противоположной пластине — максимально допустимую для высушиваемого материала. Также в измерительной ячейке прибора воспроизводятся паргазовая среда и давление, характерные для процесса сушки.

Рассмотрение вопроса о выборе метода измерений нельзя считать завершенным без учета еще одного важного обстоятельства, возникающего в ходе сушки: сквозь слой дисперсного материала движется поток пара, возникающий по мере углубления фронта фазового перехода от поверхности слоя к дну противня с дисперсным материалом [1]. Однако, вклад конвективной составляющей по причине малой интенсивности процесса, глубины вакуума и малой толщины слоев в реальных условиях сушки пищевых продуктов, в общую составляющую эффективной теплопроводности не велик и составляет, по нашим оценкам, 4–7%. Следовательно, в конструкции прибора, принципиальная схема которого показана на рис 1, отсутствует необходимость создания направленного движения

*Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации в поддержку молодых российских ученых № МК-4707.2012.4.

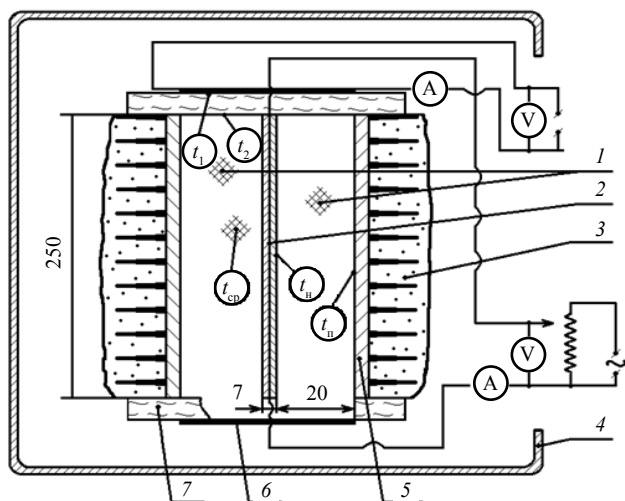


Рис. 1. Общий вид прибора для измерения эффективной теплопроводности замороженного дисперсного материала: 1 — испытуемый материал; 2 — центральный нагреватель; 3 — блок водяного льда; 4 — камера сублимационной установки; 5 — оребренная теплоотводящая пластина; 6 — охранный нагреватель; 7 — термоизолирующий корпус прибора

потока пара сквозь слой частиц. Это позволило упростить конструкцию прибора и условия выполнения экспериментов. На рис. 2 показан общий вид измерительной ячейки.

Измерительный блок прибора является симметричным относительно центрального нагревательного элемента 2. Испытуемый материал помещался в две разные полости 1 по обе стороны нагревательного элемента. Нагревательный элемент 2 выполнен из нихромовой проволоки, намотанной с шагом $2,5 \times 10^{-3}$ м и на специальном каркасе. Для выравнивания температурного поля, намотка из нихромовой проволоки плотно зажата между двумя красномедными пластинами толщиной 3×10^{-3} м и размерами $0,25 \times 0,25$ м каждая. Слева и справа от нагревательного элемента расположены теплоотводящие поверхности 5, которые представляют собой оребренные дюралевые пластины. При выполнении экспериментов на оребренную часть каждой из них предварительно намораживались блоки водяного льда 3.

Измерительный блок прибора размещался в вакуумируемой камере 4 сублимационной установки. Этим обеспечивалась возможность создания на поверхности теплоотводящих пластин температуры, соответствующей температуре сублимации льда 3 при заданном давлении в камере 4.

В пластину центрального нагревателя $t_{\text{н}}$ и теплоотводящей пластины $t_{\text{п}}$ зачеканены хромель-копелевые термопары. Измерение температур осуществлялось дифференциальной термопарой, холодный спай которой термостатировался в сосуде Дьюара с тающим льдом. В качестве регистрирующего прибора применялся потенциометр (класс точности 0,05). Центральный нагреватель и две теплоотводящие пластины помещались в термоизолирующий корпус 7 из пенополистирола. По периметру корпус охвачен охранным нагревателем 6, выполненным из нихромовой проволоки.

Методика проведения эксперимента

Объектом исследований были следующие виды дисперсных материалов. Первый из них — замороженные частицы правильной сферической формы, полученные

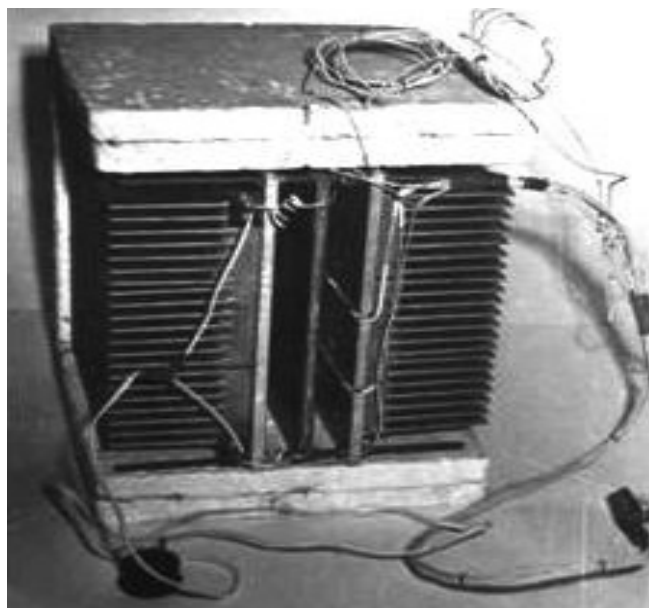


Рис. 2. Общий вид ячейки для измерения эффективной теплопроводности замороженного дисперсного материала (для наглядности боковая стенка снята)

посредством распыления материала (в нашем случае простокваша Мечникова) в жидкий азот. В зависимости от режима работы распылительной системы были получены сферические частицы размером $2,25 \times 10^{-3}$, $3,2 \times 10^{-3}$ и $4,75 \times 10^{-3}$ м. Второй вид испытуемого материала представлял собой полидисперсную массу из пластинок-чешуек, толщиной от $0,8 \times 10^{-3}$ до $2,5 \times 10^{-3}$ м. Этот полидисперсный материал получался посредством намораживания материала на поверхность цилиндра с последующим скалыванием этого слоя плоским ножом.

На оребренные теплоотводящие пластины измерительного блока предварительно намораживали водяной лед. Затем весь измерительный блок помещали на пару часов в холодильную камеру с температурой воздуха минус 30°C . Затем, в пространство между центральной греющей и двумя теплоотводящими пластинами свободно (без специального уплотнения) засыпали замороженные частицы испытуемого дисперсного материала. Вся конструкция помещалась в камеру сублимационной установки и испытуемый дисперсный материал подвергался сублимационному обезвоживанию непосредственно в измерительном блоке. В ходе сушки на центральной греющей пластине поддерживалась постоянно температура $40 \pm 2^\circ\text{C}$ посредством регулирования подаваемых на нагреватель тока и напряжения. На покрытых льдом оребренных теплоотводящих пластинах температура была минус 27°C . По окончании обезвоживания дисперсного материала стационарный режим выдерживали в течение полутора часов, затем фиксировали значения тока и напряжения подаваемых на греющую пластину, а также значения температур на поверхностях греющей и теплоотводящих пластин. Численные значения эффективной теплопроводности определяли из уравнения для стационарного режима:

$$\lambda_{\text{эф}} = Qh / (S(t_{\text{н}} - t_0)), \quad (1)$$

где Q — количество теплоты, выделяемое греющей пластиной, в расчетах учитываем половину этой величины, поскольку тепловой поток общий распределяется по обе сторо-

ны, Вт; h — расстояние между пластинами, м; S — площадь поверхности греющей пластины, м².

Найдено значение $\lambda_{эф}$ относилось к среднему значению между температурами $t_{г}$ — греющей, $t_{п}$ — теплоотводящей пластин.

Результаты экспериментов по определению зависимости эффективной теплопроводности полидисперсного материала из пластин-чешуек от его насыпной массы показаны на рис. 3. Здесь же даны значения $\lambda_{эф}$ дисперсных материалов из сферических гранул. Величины насыпной массы на оси абсцисс графика соответствуют исходному замороженному состоянию материала. К моменту начала замера теплопроводности уже высушенного материала его влажность составляла 2,5÷3%. Давление в сублимационной камере в этой группе экспериментов поддерживалось постоянным и равным 66,7 Па. На рис. 4 показаны величины эффективной теплопроводности, измеренные при различном давлении в сублимационной камере.

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать следующие выводы. По мере увеличения насыпной массы дисперсного материала происходит рост его эффективной теплопроводности. Полидисперсный материал из пластин-чешуек в состоянии свободной засыпки характеризуется случайным, хаотическим расположением отдельных частиц. Это обстоятельство влечет за собой некоторые изменения величины эффективной теплопроводности системы от опыта к опыту. Поэтому применительно к таким полидисперсным системам следует говорить о некоторой зоне характерных значений теплопроводности, соответствующих конкретной величине насыпной массы, на рис. 3 эта зона отмечена пунктирной линией.

Эффективная теплопроводность дисперсного материала из сферических гранул возрастает по мере увеличения размера каждой частицы. Это является общей характерной закономерностью дисперсных материалов. Наблюдаемая закономерность обусловлена, во-первых, тем, что увеличение размера частиц приводит к пропорциональному уменьшению их числа на неизменном участке длины. Как следствие, уменьшается число термических соприкосновений в местах контактирования частиц. Как известно, именно число контактов и их характер оказывают решающее влияние на эффективную теплопроводность [2]. Этими же факторами обусловлена и более высокая теплопроводность полидисперсного материала из пластин-чешуек в сопоставлении с дисперсным материалом из сферических гранул одинаковой насыпной массы. Пластины-чешуйки создают значительно более развитую поверхность контактирования, в том числе контактирования плоскими поверхностями, в сопоставлении с точечными контактами гранул правильной сферической формы.

По мере понижения давления в сублимационной камере происходит уменьшение эффективной теплопроводности дисперсных материалов. Эта закономерность обусловлена как понижением собственной теплопроводности паровоздушной смеси с понижением давления, так и уменьшением роли конвективной составляющей в теплообмене [3–5].

Проведенные эксперименты позволяют сделать важный для промышленного производства вывод: одним из наиболее перспективных вариантов замораживания жидких и пастообразных материалов для последующей сублимационной сушки является их замораживание

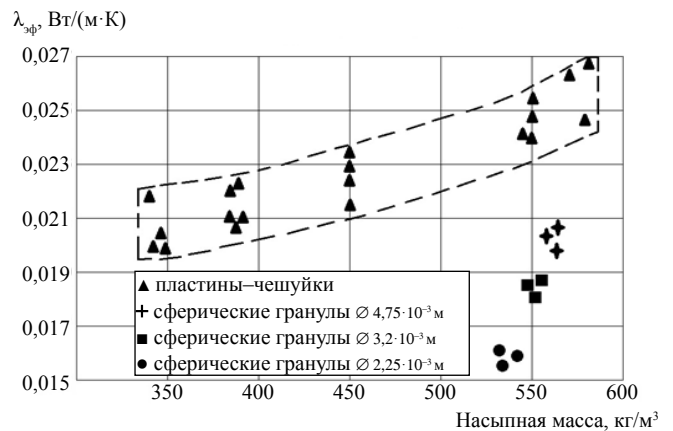


Рис. 3. Зависимость эффективной теплопроводности дисперсного материала с различным гранулометрическим составом (простокваши Мечникова) от его насыпной массы; давление в камере $P_0 = 0,5$ мм. рт. ст (66,7 Па)

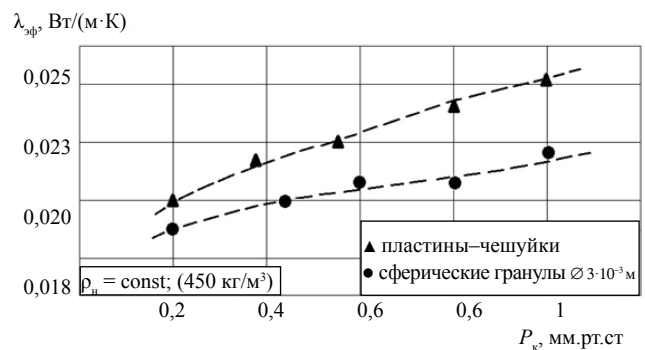


Рис. 4. Зависимость эффективной теплопроводности дисперсного материала от давления в камере сублимационной установки

в виде слоев толщиной $1,5\div 2,5 \times 10^{-3}$ м с последующим скалыванием замороженного слоя ножом. Это приводит к формированию полидисперсной массы с предпочтительными значениями насыпной массы и эффективной теплопроводности.

Список литературы

1. Семенов Г. В. Вакуумная сублимационная сушка. — М.: ДеЛи плюс, 2013.
2. Дутьнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. — Л.: Энергия, 1974.
3. Семенов Г. В., Меламед Л. Э., Тропкина А. И. Определение эффективных тепло-гидродинамических свойств неоднородных пористых и биоматериалов на основе фрагментационного анализа. // Вестник Международной академии холода. 2012. № 4.
4. Семенов Г. В., Буданцев Е. В., Меламед Л. Э., Тропкина А. И. Математическое моделирование и экспериментальное исследование совмещенных циклов вакуумной сушки термолабильных материалов. // Вестник Международной академии холода. 2011. № 4.
5. Семенов Г. В., Булкин М. С., Меламед Л. Э., Тропкина А. И. Тепломассообмен в промышленных процессах вакуумного сублимационного обезвоживания с учетом условий контактирования. // Вестник Международной академии холода. 2010. № 2.