66.021.4

ЭФФЕКТИВНАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ВНУТРЕННЯЯ ПОВЕРХНОСТЬ ПЕРЕНОСА ПОРИСТЫХ И ВОЛОКНИСТЫХ СТРУКТУР (НА ПРИМЕРЕ ПИЩЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ)

Ю.В. Светлов, профессор, Ю.Б. Никифоров[@], аспирант

Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского, Москва,109004 Россия
[@]Автор для переписки, e-mail: nickel-nc@inbox.ru

Кратко изложены физические основы макроквантового термодинамического метода анализа, показаны его основные особенности и преимущества. Приведено расчётное уравнение для эффективной теплопроводности и эффективной поверхности переноса. В результате расчётного анализа получены и приведены графические зависимости эффективных значений теплопроводности и поверхности от плотности, влагосодержания и температуры.

Ключевые слова: *ээффективная теплопроводность, капиллярно-пористые материалы, волокнистые материалы, инженерный расчет, макроквантование.*

EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY AND INNER TRANSFER SURFACE OF POROUS AND FIBROUS MATERIALS ON THE EXAMPLE OF FOODSTUFFS

Yu.V. Svetlov, Yu.B. Nikiforov[@]

Moscow State University of Technologies and Management named after K.G. Razumovskiy, Moscov, 109004 Russia
[@]Corresponding author e-mail: nickel-nc@inbox.ru

Analytical evaluation the effective thermal conductivity of porous and fibrous materials is difficult due to the complexity of the structures, which leads to idealization and simplification of its parameters. Macro-quantum thermodynamic calculation method (MQTM) uses well known fundamental constants and requires no approximate factors. This ensures accuracy of calculations. MQTM also makes it possible to determine the internal (effective) specific surface for heat or mass transfer, which could not be evaluated experimentally. The results of the analysis calculation are given in graphical form. The calculation results confirm the efficiency of the method and demonstrate the basic relationship between physical constants and macroscopic quantum parameters. The presented information opens up a new approach for the evaluation and modeling of heat and mass transfer processes for various purposes.

Keywords: *effective thermal conductivity, capillary-porous materials, fibrous materials, engineering calculation method, macro-quantization.*

Введение

В современных пищевых технологиях оптимизация режимов хранения и тепловой обработки – задача, решение которой зачастую ведется методом проб и ошибок. Теплофизические характеристики класса пищевых материалов в температурно-временных режимах, соответствующих условиям хранения и тепловым процессам обработки, могут значительно отличаться от стандартизованных условий. Как правило, в такой ситуации используют аналитические расчетные методы, однако их большое разнообразие [1–6] свидетельствует о сложности и неопределенности в оценке внутренней структуры образцов, форм связи влаги в них и других факторов.

Многие из существующих аналитических методов ориентированы на конкретный специфический продукт, в иных случаях области применения вовсе не указаны. Известные стохастические модели капилляров пор и межпорового пространства зависят

от корректности постановки задачи, основаны на разноречивых допущениях и реализуются при помощи сложных математических моделей.

Таким образом, проблема описания и нахождения удобных и наиболее точных способов прогнозирования теплофизических характеристик (ТФХ) материалов, в частности, пищевых продуктов и полуфабрикатов, в настоящее время остается актуальной.

Для решения указанной задачи появился, по нашему мнению, другой – более результативный подход: описание термодинамических закономерностей с позиции макроквантовой физики – относительно нового и уверенно развивающегося в настоящее время направления в теплофизике. Современные ученые рассматривают это направление даже как альтернативу классической физике сплошной среды, а именно – феноменологической термодинамике [4]. В основе направления лежит принцип субстанциональности энергии [6–9] и законы квантовой физики, в которых все макроскопические явления переноса представляются как флуктуационное взаимодействие системы элементарных объемов условно шарообразной формы – макроячеек, функционирующих под воздействием движущей силы тепло- и (или) влагопереноса.

Применительно к теплофизическим процессам теплопереноса такой подход позволил разработать макроквантовый метод для качественного анализа и расчёта процессов теплопереноса в материалах капиллярно-пористой и волокнистой структуры [10].

Экспериментальная часть

Было получено расчётное уравнение для нахождения эффективной теплопроводности:

$$\lambda_{эф} = \frac{2kTr^2}{\hbar}\left(\rho c_p K_r + \frac{2kT}{Frk_V k_T \cdot \Delta T}\right); \qquad (1)$$

где k = 1.381·10^{-23} – постоянная Больцмана, Дж/К; T – температура, К; $\hbar$ = 1.055·10^{-34}, Дж·с – постоянная Планка, характеризующая разрешенный импульс (деленная на 2π); с ≈ 3·10^8 м/с – скорость света; ρ – плотность, кг/м^3; c_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); $K_r = 1/3\cdot(w_r/c)$ – коэффициент релаксации, выражающий степень динамической активности макроячейки; $w_r = (kT/m)^{0.5}$ – ассоциированная скорость частиц макроячейки; $m = \rho\cdot V$ – масса макроячейки; $F = \pi r^2$ – площадь поперечного сечения макроячейки; ΔT = 1 К – единичная движущая сила макроячейки; $k_V k_T$ – комплекс произведения геометрического формфактора и температурного коэффициента макроячейки, $k_T = T/T_0$ – температурный коэффициент, T_0 = 273 К. Произведение $k_V k_T$ определяется с помощью специальной номограммы (рис. 1) [10].

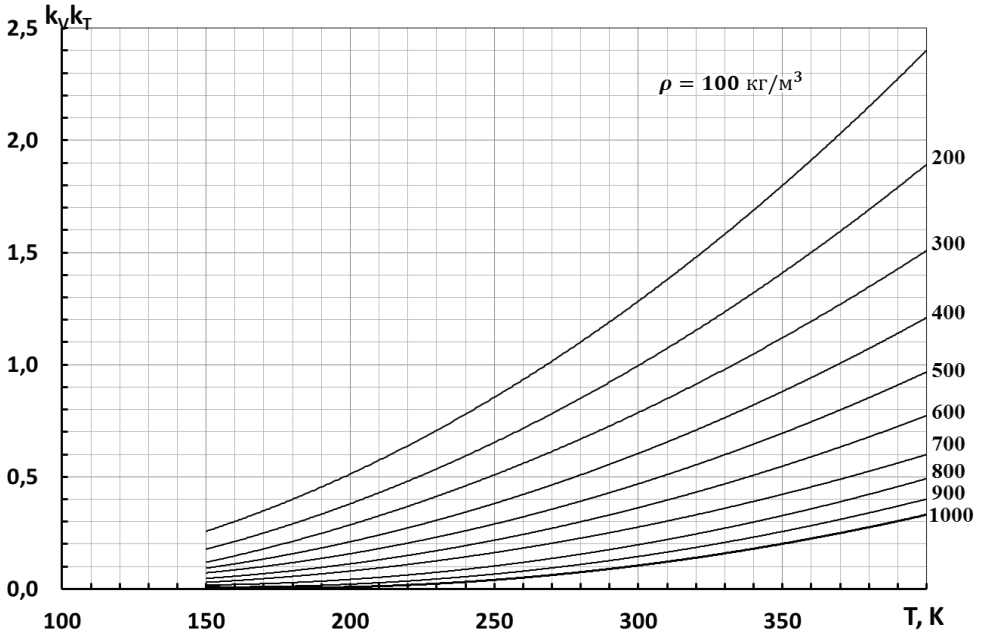


Рис. 1. Зависимость комплекса $k_V k_T$ от температуры и объемной плотности материалов капиллярно-пористой и волокнистой структуры.

Уравнение (1) берет начало от формулы энергетического баланса с источниковым членом [1], которая с учетом физической модели МКТМ записана для условий генерирования теплового потока элементарным объемом (макроячейкой):

$$\rho c_p K_r \frac{\partial T}{\partial \tau} + divE = Q \ ,$$

где $div\ E$ – плотность потока тепловой энергии единицы элементарного объема, Дж/(м^3·К).

Выделяемое элементарное количество теплоты $\Delta Q = 2kT$, которое в условиях равновесия интерпретируется как теплота Томпсона. В целом же количество тепловой энергии

$$Q = -\frac{2kT}{V \cdot \Delta\tau},$$

генерируемое макроячейкой, представляет собой производство теплоты Томпсона в единице объема; $\Delta\tau = \hbar/(2kT)$ – дискрет времени, с.

В реальных расчетных условиях происходит суммарное воздействие макроячеек и, как следствие, интегральная аккумуляция и перенос теплоты.

Данная модель с высокой точностью описывает явление теплопереноса в пористых телах любой структуры без привлечения приблизительных коэффициентов пропорциональности. Ряд полученных научных результатов показал целесообразность и высокую продуктивность метода на примере теплоизоляционных и текстильных материалов [10, 11].

Применительно к пищевым материалам пористой структуры (которую имеют большинство пищевых продуктов и полуфабрикатов) уравнение (1) также показало хорошую работоспособность. При проверочных расчетах теплопроводности по экспериментальным данным для более 250 образцов пищевых материалов [2, 3, 12, 13] разница между экспериментальной (табличной) $\lambda_{эксп}$ и расчетной $\lambda_{эф}$ теплопроводностью составила, в среднем, ± 10…12%. Весь массив экспериментальных данных собран в 11 групп продуктов с подобной структурой и близкими физико-техническим свойствами (таблица 1).

Таблица 1. Физико-технические характеристики исследуемых групп пищевых материалов

№, п.п	Наименование группы, источник	Структурно-механические параметры	T, К	W, %	ρ, кг/м^3	c_p, Дж/(кг·К)
1	Высушенные продукты: [2,3] (включает сублимированный картофель, сухое молоко, высушенный хлеб)	Твердая, сухая, хрупкая	273-323	2-5	103-510	1472-2093
2	Фрукты, [3,12,13]	Твёрдая, влажная, однородная, зернистая	293	73-91	790-1048	3270-3840
3	Овощи, [3,13]	Твёрдая, влажная, однородная, зернистая	281-301	68-95	700-1100	3140-4052
4	Ягоды, [3,12,13]	Плотная мягкая, влажная	293	74-90	900-1060	1800-3840
5	Мука, [2,3]	Твёрдая, сухая, рассыпчатая	293	15	506-660	1035-1355
6	Тесто, [3,13]	Плотная, пластичная	298-303	17-33	478-1362	2073-2311
7	Выпечка песочная и галетная, [2,3]	Твёрдая, зернистая, рассыпчатая	288	8-13	478-700	1721-2181
8	Кисломолочная продукция, [2] (сыворотка, творог, нежирный сыр)	Жидкая, сгустившаяся, псевдопластичная	288-326	58-94	982-1080	2428-4082
9	Рыба, [3,13]	Плотная, эластичная, волокнистая	274-293	73-83	980-1070	3226-3864
10	Мясо, [3,13]	Плотная, эластичная, волокнистая	273-303	69-78	1030-1158	3307-3770
11	Колбасные изделия, [2]	Плотная, упругая, однородная, с вкраплением мышечной ткани, жира	293-323	65-71	1000-1074	2371-5443

Результаты и их обсуждение

Зависимость полученных эффективных значений теплопроводности $\lambda_{эф}$ от объемной плотности приведена на рис. 2. Для наглядности показана сравнительная зависимость (кривая 6), полученная для теплоизоляционных и текстильных материалов. Можно видеть практически полное наложение точек на кривую в диапазоне плотностей ρ = 100…600 кг/м^3, с повышением которой следует значительное расслоение экспериментальных точек. В отличие от текстильных материалов, которые можно охарактеризовать, как технически сухие, большинство пищевых продуктов, вследствие своей природы, обладает более высоким влагосодержанием и специфическими структурно-механическими свойствами.

Влагосодержание вещества оказывает большое влияние на $\lambda_{эф}$. Опыты показывают, что с ее увеличением коэффициент теплопроводности значительно возрастает, что логично, т.к. большая часть объума капиллярно-пористых продуктов заполнена жидкостью. Так, при стремлении массовой доли влаги к 100% теплофизические параметры продукта приближаются к характеристикам воды. Аналогичные

результаты получают при аддитивном подходе в исследованиях, когда пористый материал рассматривается как сочетание скелета и порового пространства с отдельным математическим описанием того и другого. Таким образом, чем выше объемная плотность материала, тем меньше он имеет газонаполненных пор и тем выше его коэффициент теплопроводности.

Макроквантовое уравнение (1) показывает комплексное воздействие объемной плотности и удельной теплоемкости на эффективный коэффициент теплопроводности. Экспериментальное определение теплоемкости, особенно при наличии фазовых переходов в материале – процесс сложный, обычно наблюдается значительный разброс экспериментальных данных (таблица 1), что является следствием влияния не только влагосодержания, но и других компонентов веществ, присутствующих в пищевом изделии. Тем не менее их совместное влияние показывает определенную закономерность (рис. 3). Здесь обобщающая прямая может быть выражена простым уравнением:

$$\lambda_{эф} = 1{,}2 \cdot 10^{-4} \rho c_p + 0{,}02833$$

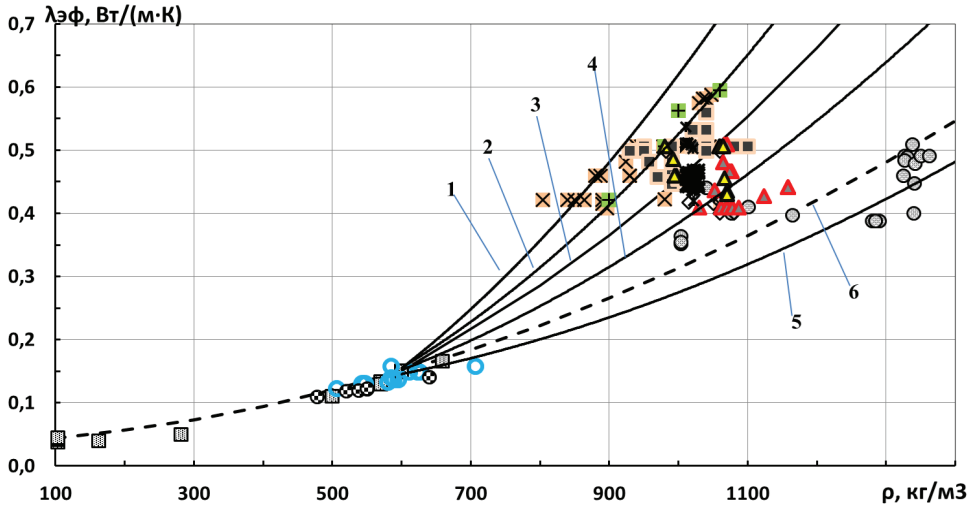


Рис. 2. Зависимость расчетных значений эффективной теплопроводности $\lambda_{эф}$ от объёмной плотности ρ для исследованных групп пищевых материалов и их обобщение по массовому влагосодержанию W: 1 – W ≈ 90 ± 5 %; 2 – W ≈ 80 ± 5 %; 3 – W ≈ 70 ± 5 %; 4 – W ≈ 60 ± 5 %; 5 – W ≈ 40 ± 10 %; 6 – обобщенная кривая по текстильным материалам [10].

Условные обозначения

- Высушенные продукты
- Овощи
- Выпечка
- Рыба
- Фрукты
- Мука
- Кисломолочные продукты
- Колбасные изделия
- Ягоды
- Тесто
- Мясо

Приводим полученные полиномиальные зависимости 2-го порядка, соответствующие номерам кривых на рис.2, которые можно использовать в оптимизационных инженерных расчётах:

$$1 - W \approx 90 \pm 5\ \%: \ \lambda_{эф} = 1 \cdot 10^{-6} \rho^2 - 5 \cdot 10^{-4} \rho + 0{,}117; \quad (2)$$

$$2 - W \approx 90 \pm 5\ \%: \ \lambda_{эф} = 7{,}4 \cdot 10^{-7} \rho^2 - 3 \cdot 10^{-4} \rho + 0{,}0831; \quad (3)$$

$$3 - W \approx 90 \pm 5\ \%: \ \lambda_{эф} = 5 \cdot 10^{-7} \rho^2 - 6 \cdot 10^{-5} \rho + 0{,}0139; \quad (4)$$

$$4 - W \approx 90 \pm 5\ \%: \ \lambda_{эф} = 4 \cdot 10^{-7} \rho^2 - 7 \cdot 10^{-5} \rho + 0{,}0541; \quad (5)$$

$$5 - W \approx 90 \pm 5\ \%: \ \lambda_{эф} = 2 \cdot 10^{-7} \rho^2 + 3 \cdot 10^{-5} \rho + 0{,}0464; \quad (6)$$

6 – обобщенная кривая по текстильным материалам [10]:

$$\lambda_{эф} = 2{,}18 \cdot 10^{-7} \rho^2 + 5{,}9 \cdot 10^{-5} \rho + 0{,}036. \quad (7)$$

Основной массив экспериментальных точек укладывается в поле ± 5…7 % относительно обобщающей прямой. В отдельных случаях отклонения достигают 25 %, что вследствие сложности эксперимента и разнообразия структур материалов является вполне удовлетворительным результатом. При этом следует отметить, что приведенные точки являются в ряде случаев усредненными значениями. Например, в группе однотипных варено-копченых колбасных изделий (колбаса московская, любительская, докторская, чайная,

сосиски молочные и пр.) – 59 наименований; фруктов – 24; высушенных продуктов – 10 групп, состоящих из подгрупп (яблоки, картофель, молоко, говядина и др.).

Таким образом, проявляется общая взаимосвязь теплофизических параметров.

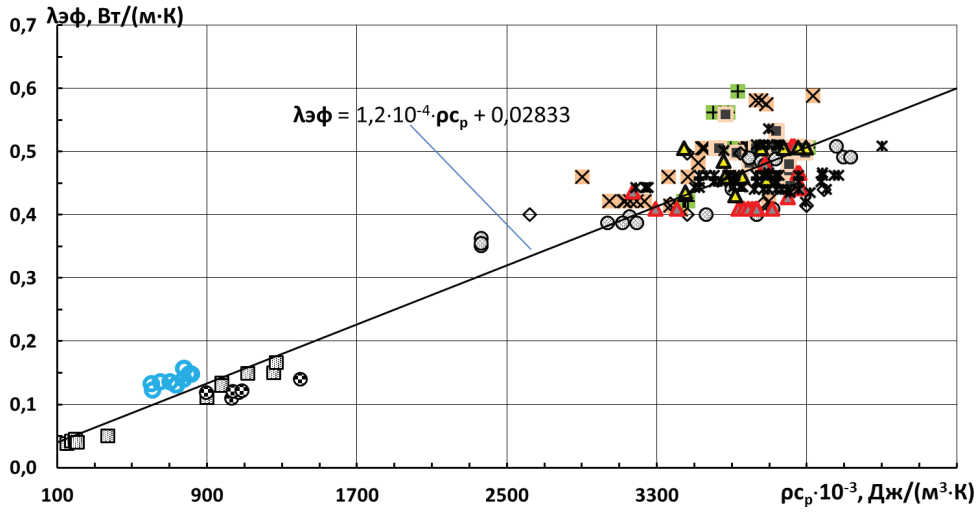


Рис. 3. Зависимость эффективной теплопроводности $\lambda_{эф}$ от параметрического комплекса ρc_p для исследованных групп пищевых изделий и полуфабрикатов.

Реальное распространение теплоты через структуру в двумерной постановке можно представить в виде поверхности переноса с различной скоростью по фронту (вследствие различной теплопроводности компонентов фронта). В нашей физической модели при реализации механизма макроквантования все особенности этого процесса учитывает произведение Fk_Vk_T, являющееся одной из важнейших величин в уравнении (1). Оно, по сути, является эффективной (смачиваемой) поверхностью – $F_{эф}$: именно той поверхностью, с которой вступает в контакт конгломерат элементарных ячеек, формирующий элементарные участки переноса (ЭУП) в процессе реализации макроквантового механизма передачи энергетических импульсов. Поэтому должна существовать объективно определенная параметрическая связь $F_{эф} = f(\lambda_{эф})$. Данную величину вряд ли возможно определить в ходе эксперимента, однако ее можно вывести из уравнения (1). Запишем его относительно $F_{эф}$:

$$F_{эф} = \frac{4k^2T^2r}{\Delta T\left(\lambda_{эф}\hbar - 2kTr^2\rho c_p K_r\right)} = Fk_Vk_T, \qquad (8)$$

На рис. 4а представлена графическая зависимость $F_{эф} = f(\lambda_{эф})$. Можно видеть, что величина $F_{эф}$ играет определяющую роль в явлении теплопроводности, интенсифицируясь с увеличением температуры (рис. 4б).

В свою очередь, на $F_{эф}$ влияет комплекс k_Vk_T. В процессе развития метода и обработки всего массива экспериментальных данных по текстильным, теплоизоляционным и пищевым материалам установлено, что зависимость $k_Vk_T = f$(T) (рис. 1) имеет универсальный характер, т.е. все исследованные материалы хорошо обобщаются, показывая расслоение лишь по группам плотности.

Результаты исследования говорят о хорошем согласовании экспериментальных и расчетных значений для достаточно широкого массива данных и диапазона физических свойств, что подтверждает целесообразность использования уравнения (1) в расчетном анализе.

Отметим, что отдельные выбросы точек, выпадающие из общей зависимости, числом менее 10% были исключены из анализа, т.к. вероятнее всего – это результат погрешностей при проведении эксперимента.

Таким образом, появляется возможность определения расчетным путем величин $\lambda_{эф}$ и $F_{эф}$ для новых продуктов подобной структуры на основе знания лишь температуры, плотности и теплоемкости искомого материала. Для поисковых практических расчетов также можно использовать зависимости (2)–(7).

Приводим расчет $\lambda_{эф}$ по формуле (1) на примере продукта «филе куриное» [2].

Исходные данные: T = 273 К; c_p = 3307 Дж/(кг·К); $\lambda_{эксп}$ = 0.44 Дж/(м·с·К); Вт/(м·К); ρ = 1030 кг/м^3; ΔT= 1 К.

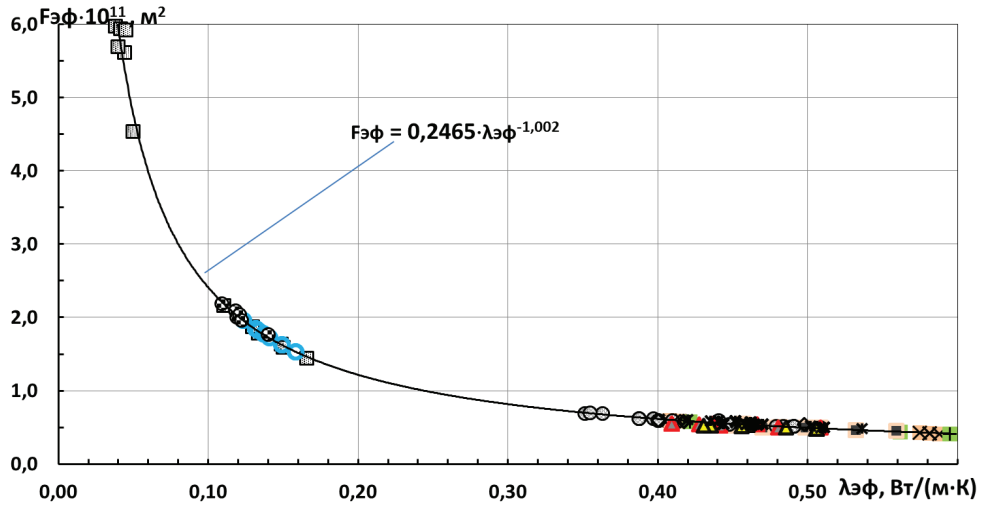
Радиус макроячейки:

$$r = c\cdot\Delta\tau = \frac{c\hbar}{2kT} = \frac{3\cdot10^8\cdot1.055\cdot10^{-34}}{2\cdot1.38\cdot10^{-23}\cdot273} = 4.20\cdot10^{-6}\text{ м}$$

Объем макроячейки:

$$V = \frac{\pi}{6}\left(\frac{c\hbar}{kT}\right)^3 = \frac{3.14}{6}\left(\frac{3\cdot10^8\cdot1.055\cdot10^{-34}}{1.38\cdot10^{-23}\cdot273}\right)^3 = 3.09\cdot10^{-16}\,м^3$$

а



б

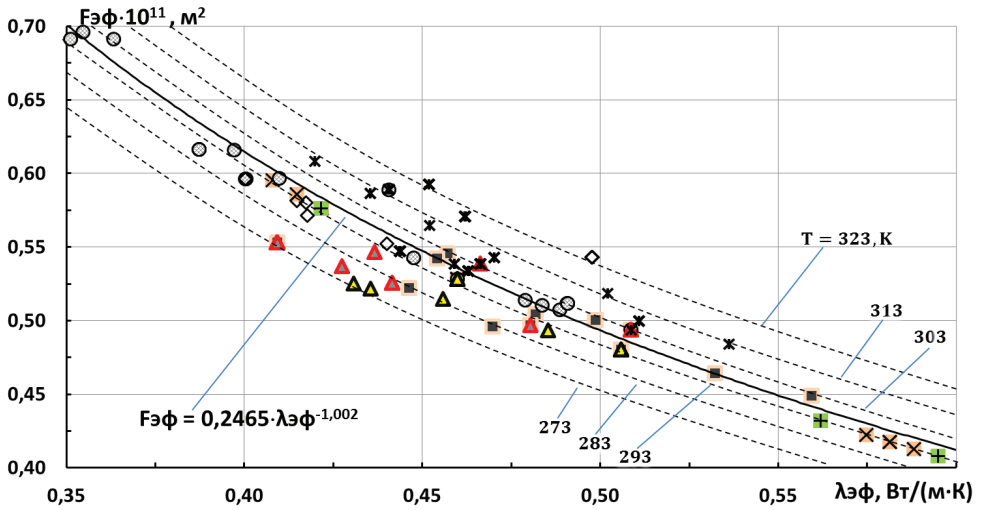


Рис. 4. Зависимость расчетных значений эффективной поверхности $F_{эф}$ от эффективной теплопроводности $\lambda_{эф}$ исследованного массива образцов: а) обобщение всего диапазона данных; б) для диапазона $\lambda_{эф} = 0.35\ldots0.6$.

Масса макроячейки

$$m = \rho \cdot V = 1030 \cdot 3.09 \cdot 10^{-16} = 31.85 \cdot 10^{-14}\ \text{кг}$$

Ассоциированная скорость частиц макроячейки:

$$w_r = \left(\frac{kT}{m}\right)^{0.5} = \left(\frac{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 273}{31.85 \cdot 10^{-14}}\right)^{0.5} = 1.09 \cdot 10^{-4}\ \text{м/с}$$

Коэффициент релаксации:

$$K_r = \frac{1}{3} \cdot \frac{w_r}{c} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1.09 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 10^{8}} = 1.21 \cdot 10^{-13}$$

По упрощенному выражению формулы (2) определим внутреннюю эффективную поверхность материала:

$$F_{эф} = Fk_V k_T = \pi r^2 k_V k_T = 3.14 \cdot \left(4.20 \cdot 10^{-6}\right)^2 \cdot 0.1 = 0.55 \cdot 10^{-11}\ \text{м}^2.$$

Произведение объемного формфактора и температурного коэффициента находим по номограмме (рис. 1): $k_V k_T = 0.1$.

Расчетное значение коэффициента теплопроводности определяем по формуле (1); имея в виду, что $\lambda_{расч} = \lambda_{эф}$:

$$\lambda_{расч} = \frac{2kTr^2}{\hbar}\left(\rho c_p K_r + \frac{2kT}{Frk_V k_T \cdot \Delta T}\right) = \frac{2 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 273 \cdot \left(4.20 \cdot 10^{-6}\right)^2}{1.055 \cdot 10^{-34}} \cdot$$

$$\cdot \left(1030 \cdot 3307 \cdot 1.21 \cdot 10^{-13} + \frac{2 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 273 \cdot}{5.53 \cdot 10^{-11} \cdot 4.20 \cdot 10^{-6} \cdot 0.1 \cdot 1}\right) = 0.41\ \text{Вт/(м·К)}$$

Сравним полученное расчетное значение с экспериментальным:

$$\Delta = \frac{\lambda_б - \lambda_м}{\lambda_б} \cdot 100\% = \frac{0.44 - 0.41}{0.44} \cdot 100 = 6.8\%$$

Корреспондирование результата по $\lambda_{эф}$ вполне удовлетворительное.

Список литературы:

1. Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник. М.: Энергия, 1972. 560 с.
2. Гинзбург А.С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов: справочник. М: Пищевая промышленность, 1980. 288 с.
3. Чубик И.А., Маслов А.М. Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов. М.: Пищевая промышленность, 1970. 184 с.
4. Майков В.П. Расширенная версия классической термодинамики – физика дискретного пространства-времени. М.: МГУИЭ, 1997. 160 с.
5. Хейфец Л.И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых средах. М.: Химия, 1982. 320 с.
6. Умов Н.А. Уравнения движения энергии в телах // Избранные сочинения. М.: Гостехтеориздат, 1950. С. 151–200.
7. Schrödinger E. // Naturwiss. 1926. Bd. 14. S. 664–668.
8. Оствальд В. Энергия и ее превращения: пер. с нем. Н.С. Дрентельна. СПб.: Издание К.Л. Риккера, 1890. 26 с.
9. Планк М. Принцип сохранения энергии: пер. с нем. М.-Л.: Гостехтеориздат, 1938. 235 с.
10. Светлов Ю.В. Макроквантовый термодинамический метод расчётного анализа термовлажностных процессов в пористых материалах. М.: Инфра-М, 2015. 313 с.
11. Светлов Д.О., Исаев В.В., Светлов Ю.В. Эффективная теплопроводность материалов капиллярно-пористой и волокнистой структуры на основе макроквантового термодинамического метода // Технологии XXI века в пищевой, перерабатывающей и легкой промышленности. 2012. ЭНИ. № 6. Ч. 1. Раздел 2. 11 с.
12. Цубанов А.Г. Теплопередача: метод. указания. Минск: БГАТУ, 2007. 160 с.
13. Shafiur M., Rahman M.S. Food Properties Handbook: 2nd ed. Florida, USA: CRC Press/ T&F: Boca Raton, 2009. 867 p.
14. Спроул Р.Л. Теплопроводность твёрдых тел // Квантовая макрофизика. М.: Изд. «Наука», 1967, С. 104–116.
15. Никифоров Ю. Б., Светлов Ю. Применение макроквантового термодинамического метода при расчете параметров теплопроводности капиллярно-пористых пищевых материалов // Современное состояние естественных и технических наук. М.: Изд. «Спутник+», 2014. С. 109–115.

References:

1. Lykov A.V. Teplomassoobmen. Spravochnik (Heat and Mass Transfer. Handbook). – Moscow: Energiya, 1972. 560 p.
2. Ginzburg A.S. Teplofizicheskie harakteristiki pischevyx productov. Spravochnik (Thermo-physical properties of foodstuffs. Handbook). – Moscow: Pyschevaya promyshlennost, 1980. 288 p.
3. Chubik I.A., Maslov A.M. Spravochnik po teplofizicheskim harakteristikam pyshchevyh productov i polufabricatov. (Handbook of thermophysical characteristics of foodstuffs and half-stuffs). – Moscow: Pyschevaya promyshlennost, 1970. 184 p.
4. Maikov V.P. Rashyrennaya versiya klassicheskoy termodinamiki – fizika diskretnogo prostranstva-vremeni. (An extended version of classical thermodynamics. Physics of discret space-time). – Moscow: MGUIE, 1997. 160 p.
5. Heyfets L.I., Neimark A.B. Mnogofaznye processy v poristyh sredax. (Multiphase processes in porous substances). – Moscow: Khimiya, 1982. 320 p.
6. Umov N.A. Uravneniya dvijeniya energii v telah // Izbrannye sochineniya (Equations of energy motion in solids. Selected works) – Moscow: Gostehizdat, 1950. P. 151-200.
7. Schrödinger E. // Naturwiss. 1926. Bd. 14. S. 664–668.
8. Ostvald V. Energiya i ee prevrasheniya / Perevod s nemetskogo (Energy and its transformation. Translated from German). Sankt-Peretburg, 1890. 26 p.
9. Plank M. Printsyp sokhraneniya energii / Perevod s nemetskogo (Principal of energy conservation. Translated from German). M.L.: Gostekhteorizdat, 1938. 235 p.
10. Svetlov Yu.V. Makrokvantovyi termodinamicheskiy metod raschetnogo analiza termovlajnostnyh processov v poristyh materialah. (Macroquantum thermo dynamical calculation method of hydrothermal processes in porous materials). Moscow.: Infa-M, 2015. 313 p.
11. Svetlov D.O., Isaev V.V., Svetlov Yu.V. // Tehnologii XXI veka v pishchevoi, pererabatyvaushchei i legkoi promyshlennosti. 2012. № 6. Part 1. Razdel 2. 11 p.
12. Tsubanov A.G. Teploperedacha. Metod. ukazaniya. (Heat transfer. Guidelines). Minsk: BGATU, 2007. 160 p.
13. Shafiur M., Rahman M.S. Food Properties Handbook: 2nd ed. Florida, USA: CRC Press/ T&F: Boca Raton, 2009. 867 p.
14. Sprouel R.L. Teploprovodnost tverdyh tel / Sbornik «Kvantovaya makrofizika» (Thermal conductivity of solids. Quantum macrophysics collection). Moscow: Nauka, 1967. P. 104–116.

15. Nikiforov Yu.B., Svetlov Yu.V. Primeneniye makrokvantovogo termodinamicheskogo metoda pri raschete parametrov teploprovodnosti kapillyarno-poristykh pyschevyh materialov // Sbornik. «Sovremennoe sostoyanie estestvennyh i tekhnicheskih nauk» (Practical application of macroquantum thermodynamic method for thermal conductivity calculation of capillary-porous food materials. Collection: Modern state of natural and engineering sciences) – Moscow: Sputnik+, 2014. P. 109–115.