

УДК 536.2.08;665.1/3

Метод нагреваемой нити для измерения теплопроводности вязких жидкостей

А. А. ФЕДОРОВ¹, канд. техн. наук В. А. КОРАБЛЕВ¹, д-р техн. наук А. В. ФЕДОРОВ^{1,2},
И. С. КОВАЛЬСКИЙ³, канд. хим. наук С. М. ВОЛКОВ², А. АНДРЕЕВА¹

¹Университет ИТМО,

²ВНИИЖиров

³ООО «НПЦ»Судовые электротехнические системы»

E-mail: aafedorov@itmo.ru

Метод нагреваемой нити применен для определения теплопроводности вязких жидкостей. Создана экспериментальная установка. В опытах с глицерином подтверждена работоспособность метода и достигнута достаточная точность измерений теплопроводности. Для мисцеллы подсолнечного масла концентрацией от 90 до 100% (массовая концентрация по растительному маслу) получены новые экспериментальные данные по теплопроводности в диапазоне температур от 25 до 125 °С. Установлено, что при увеличении температуры теплопроводность мисцелл уменьшается на 15–18%, а с увеличением массовой концентрации растительного масла – уменьшается на 5–6% во всем диапазоне заданных температур. Эти результаты необходимы в расчетах оборудования и процессов в производстве растительных масел, для совершенствования технологий с целью повышения качества продукции и снижения энергетических затрат. Представленная лабораторная установка может использоваться для измерения теплопроводности других вязких жидкостей и растворов.

Ключевые слова: теплопроводность, вязкая жидкость, метод нагреваемой нити, растительное масло, мисцелла подсолнечного масла.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 30.05.2022, одобрена после рецензирования 02.08.2022, принята к печати 13.08.2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-3-66-73

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Федоров А. А., Кораблев В. А., Федоров А. В., Ковальский И. С., Волков С. М., Андреева А. Метод нагреваемой нити для измерения теплопроводности вязких жидкостей // Вестник Международной академии холода. 2022. № 3. С. 66–73. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-3-66-73

The use of transient hot wire method to determine thermal conductivity of viscous liquids

A. A. FEDOROV¹, Ph. D. V. A. KORABLEV¹, D. Sc. A. V. FEDOROV^{1,2},
I. S. KOVALSKY³, Ph. D. S. M. VOLKOV², A. ANDREEVA¹

¹ITMO University

²All-Russian Scientific Research Institute of Fats

³LLC «SPC «Marine electrical systems»

E-mail: aafedorov@itmo.ru

The transient hot wire method is used to determine thermal conductivity of viscous liquids. An experimental setup was created for the research. In experiments with glycerol, the efficiency of the method was confirmed, and a sufficient accuracy of thermal conductivity measurements was achieved. For miscella of sunflower oil with a concentration of 90 to 100% (mass concentration of vegetable oil), new experimental data on thermal conductivity in the temperature range from 25 to 125 °C were obtained. It has been established that with an increase in temperature, the thermal conductivity of miscellas decreases by 15–18%, and with an increase in the mass concentration of vegetable oil, it decreases by 5–6% over the entire range of specified temperatures. These results are necessary in the calculations of equipment and processes in the production of vegetable oils, to improve technologies to improve product quality and reduce energy costs. The presented experimental setup can be used to measure the thermal conductivity of other viscous liquids and solutions.

Keywords: thermal conductivity, viscous liquid, transient hot wire method, vegetable oil, sunflower oil miscella.

Article info:

Received 30/05/2022, approved after reviewing 02/08/2022, accepted 13/08/2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-3-66-73

Article in Russian

For citation:

Fedorov A. A., Korablev V. A., Fedorov A. V., Kovalsky I. S., Volkov S. M., Andreeva A. The use of transient hot wire method to determine thermal conductivity of viscous liquids. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No 3. p. 66–73. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-3-66-73

Введение

В пищевой промышленности при технологических расчетах и конструировании оборудования очень часто необходимы достоверные сведения о теплопроводности обрабатываемых веществ. Технологии развиваются и в производство вовлекаются все новые обрабатываемые материалы, чаще всего многокомпонентные, по которым еще не проведены измерения теплофизических свойств в рабочем диапазоне режимных параметров. В особенности это касается теплопроводности вязких, трудно перемешиваемых жидкостей и процессов переноса в пленках. Именно теплопроводность определяет интенсивность и скорость передачи тепловой энергии в данных условиях. Теоретические методы расчета теплопроводности хотя и совершенствуются, но пока еще в полной мере не могут обеспечить требуемой точности и не носят обобщающего характера. К примеру, интересными и перспективными представляются теоретические работы [1, 2], но использовать их напрямую для других сред нужно с осторожностью [3]. Поэтому экспериментальное исследование теплопроводности материалов остается актуальной задачей.

Неоднократно проверенными и надежными методами для измерения теплопроводности стали динамические методы. Для вязких сред, таких как сиропы, авторы [4] использовали именно динамический метод. Одним из наиболее распространенных методов для измерения теплопроводности различных материалов является метод «нагреваемой нити». В некоторых информационных источниках его называют метод «нагретой проволоки», «горячей нити» и «горячей проволоки». В большинстве международных научных изданий применяются название «transient hot wire method». Добавление слова «transient» подчеркивает, что метод нагретой нити — это динамический метод определения теплопроводности.

Основательно и подробно история развития метода, начиная с 1871 г., описана авторами [5]. Суть этого метода предельно проста. Отрезок тонкой металлической проволоки, который далее будем называть нить, погружается в исследуемую среду. Через эту нить пропускается электрический ток и в ней выделяется тепловая энергия. При этом нагревающаяся нить рассеивает тепловую энергию в окружающую среду. В основу теории положено условие отсутствия в теплообмене конвекции и излучения, то есть тепловая энергия рассеивается в жидкость только за счет теплопроводности. Это действительно так, но только на небольшом начальном этапе нагрева, когда конвективные токи просто не успевают сформироваться. Причем вязкость жидкости как определяющий фактор конвективного теплообмена играет

здесь ведущую роль. В вязких жидкостях конвекция более затруднительна. Лучистой составляющей теплообмена пренебрегают вследствие невысокого уровня температуры и малого градиента температур между нитью и исследуемой жидкостью. Время эксперимента невелико, но при этом надо максимально точно зафиксировать динамику нагрева нити. Отличительной особенностью метода является то, что эта нить одновременно и нагреватель, и измеритель температуры. Для этого применяют нити из материала с высоким температурным коэффициентом электрического сопротивления α . Подробное практическое описание метода нагретой нити представлено в [6] и еще многократно повторялось различными исследователями. Измерительная и расчетная части метода нагретой нити применительно к исследованию теплопроводности фреонов описаны в [7]. Эти результаты с учетом оценки погрешности измерений были приняты рядом ученых как основа измерений, причем области применения метода очень разнообразны. Так, в работе [8] представлены исследования теплопроводности наножидкостей на основе воды и этиленгликоля. Интересной представляется работа [9], в которой представлены новые данные по теплопроводности фторуглеродов.

Ученые и инженеры совершенствуют и модифицируют метод нагреваемой нити, адаптируя его для новых условий. По мере развития техники измерений, совершенствования элементной базы, применяемых приборов, программного обеспечения этот метод становится все более удобным, а значит востребованным для многих отраслей техники. Так для исследования теплопроводности пищевых материалов, включая области высокого давления, авторами [10] создана оригинальная экспериментальная установка. На этой установке получены новые данные по жирам [11], в том числе и для растворов жиров [12]. Авторы работы [13] использовали метод нагреваемой нити для определения теплопроводности ряда пищевых растительных масел. В статье [14] приведены результаты исследования теплопроводности экологически безопасных смазывающих жидкостей на основе рапсового масла. Полученные результаты позволили улучшить технологию производства смазок и дать рекомендации по более правильным условиям применения этих смазок в сельском хозяйстве. Авторы [15] приводят результаты работы по созданию своей оригинальной установки и предлагают дополнительные критерии для определения максимально выгодного участка зависимости, описывающей изменение температуры нагретой нити. В работе [16] представлены теплофизические свойства экологически чистых и устойчивых смазочно-охлаждающих жидкостей. Эти данные очень важны для эффективной работы с труднообрабатываемыми мате-

риалами при минимальном количестве смазки. Метод нагреваемой нити применяется не только для измерения теплопроводности жидких сред, но и для исследования сыпучих сухих и влажных материалов. Так авторы [17] представили данные по теплопроводности огнеупорных материалов, а в работе [18] приведены данные по изучению теплопроводности муки из пшеницы. Есть успешные исследования по изучению теплопроводности порошкообразных материалов, например, геоматериалов [19]. Причем что особенно важно, получены результаты, учитывающие фазовые и структурные изменения в материалах.

Теория метода нагреваемой нити устанавливает особые требования к материалу и геометрии самой проволоки. Как уже отмечалось, материал нити должен обладать высоким температурным коэффициентом электрического сопротивления для того, чтобы более точно фиксировать изменение температуры. Среди наиболее доступных металлов таким свойством обладает медь. Нить должна быть достаточно тонкой, чтобы в окружающей ее жидкости не смогли эффективно выстроиться конвективные токи. Длина нити должна быть такой, чтобы в процессе исследования измерялось ее реальное электрическое сопротивление. Большинство практических исследований сходится в том, что отношение длины к диаметру проволоки должно быть много больше 100. Объем жидкости должен быть достаточно большим, чтобы рассеиваемая проволокой тепловая энергия не вызвала изменения ее температуры.

В качестве объектов исследования были выбраны обрабатываемые вещества масложирового производства. Под обрабатываемыми веществами, в данном случае, понимаются как сами растительные масла, так и их различные полупродукты, например, мисцеллы. Мисцелла — промежуточный продукт масложирового производства — представляет собой раствор растительного масла в органическом растворителе. Технология переработки масел и их мисцелл включает в себя множество различных тепло- и массообменных процессов и поэтому информация о теплофизических свойствах, в особенности о теплопроводности, крайне важна. Сложности в технологиях маслодобывания и маслопереработки возникают при использовании новых сортов подсолнечника. Изменение жирнокислотного состава, наличие или отсутствие тех или иных сопутствующих веществ в подсолнечном масле сказывается на его физических и физико-химических свойствах.

Подсолнечное масло в мире входит в лидирующую группу растительных масел, а в России на него приходится подавляющая часть, как производства, так и потребления. Именно поэтому, оно было выбрано в качестве объекта исследования как в чистом виде, так и в виде мисцелл, достоверных данных по теплопроводности которых в справочной литературе практически нет. Особенно интересны высококонцентрированные мисцеллы с концентрацией больше 90% по растительному маслу. Такие концентрации характерны для окончательной стадии дистилляции мисцеллы, где механизм переноса тепловой энергии в жидкости теплопроводностью играет ключевую роль. Даже незначительные недоработки в технологии дистилляции мисцеллы вызывают трудно-

сти на последующих стадиях переработки растительных масел, например, при рафинации и дезодорации. Локальные перегревы могут провоцировать образование глицидиловых соединений. Поэтому и возникает потребность в определении теплопроводности λ , как главного параметра процесса переноса тепловой энергии при окончательной дистилляции мисцелл.

Методы и объекты исследования

В качестве основных объектов исследования выступили глицерин (ЧДА), нерафинированное подсолнечное масло линолевого типа и его мисцеллы массовой концентрацией от 90 до 100% по растительному маслу. В качестве растворителя в мисцелле использовался *n*-гексан C_6H_{14} . Жирнокислотный состав подсолнечного масла представлен в табл. 1. Для определения жирнокислотного состава использовался газожидкостной хроматограф «Bruker-Scion 436 GS». При этом использовалась капиллярная колонка BR — Swax длиной 30 м, диаметром 0,25 мм, и активной фазой на основе полиэтиленгликоля. Физические свойства — плотность и теплопроводность объектов исследования приведены в табл. 2. Плотность приведена для общей характеристики исследуемых жидкостей.

Измерения теплопроводности проводилось при температурах от 25 до 125 °С. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки, реализующей метод нагреваемой нити на практике.

Рабочий узел с нитью помещается в стеклянный стакан с исследуемой жидкостью. Стакан в свою очередь помещается в термостат, для поддержания необходимого значения температуры. Для исследования в стакан помещается около 300 мл жидкости. Этого достаточно для температурной стабильности образца во время проведения измерения. Для обеспечения равномерного прогрева жидкости в стакан опущена механическая мешалка, которая работает только в паузе между измерениями, а для «успокоения» жидкости после перемешивания выдерживали паузу в течение 90 с и только после этого приступали к измерению теплопроводности. Для равномерного обогрева стакан помещается в дополнительную промежуточную емкость с термостатирующей жидкостью, которая перемешивается барботером, работающим от воздушного компрессора. Промежуточная емкость снаружи обогревается электронагревателем. Во время

Таблица 1

Жирнокислотный состав нерафинированного подсолнечного масла линолевого типа

Table 1

Fatty acid composition for unrefined sunflower oil of linoleic type

Название жирной кислоты	Условное обозначение	Содержание, %
Пальмитиновая	C 16:0	5,7
Стеариновая	C 18:0	3,4
Олеиновая	C 18:1	25,5
Линолевая	C 18:2	64,5
Арахидиновая	C 20:0	0,1
Бегеновая	C 22:0	0,8

Физические свойства объектов исследования

Table 2

Physical properties of the object for the research

Температура, °С	Плотность, кг/м ³			Теплопроводность, Вт/(м·К)		
	Глицерин [20, 22]	Н-гексан [20]	Нераф. подсолнечное масло [23]	Глицерин [20]–[22]	Н-гексан [24]	Нераф. подсолнечное масло [25, 26]
20	1260	659	916	—	0,124	0,166?
25	—	—	—	0,279	—	—
30	—	650	—	—	0,121	—
40	1250	640	903	—	0,118	—
50	—	631	—	0,283	0,115	0,159
60	1238	621	899	—	0,111	—
70	—	611	—	—	0,107	—
75	—	—	—	0,286	—	—
80	—	601	876	—	0,102	0,151
100	1208	579	862	0,289	—	—
120	1188	—	848	—	—	0,142
125	—	—	—	0,292	—	—

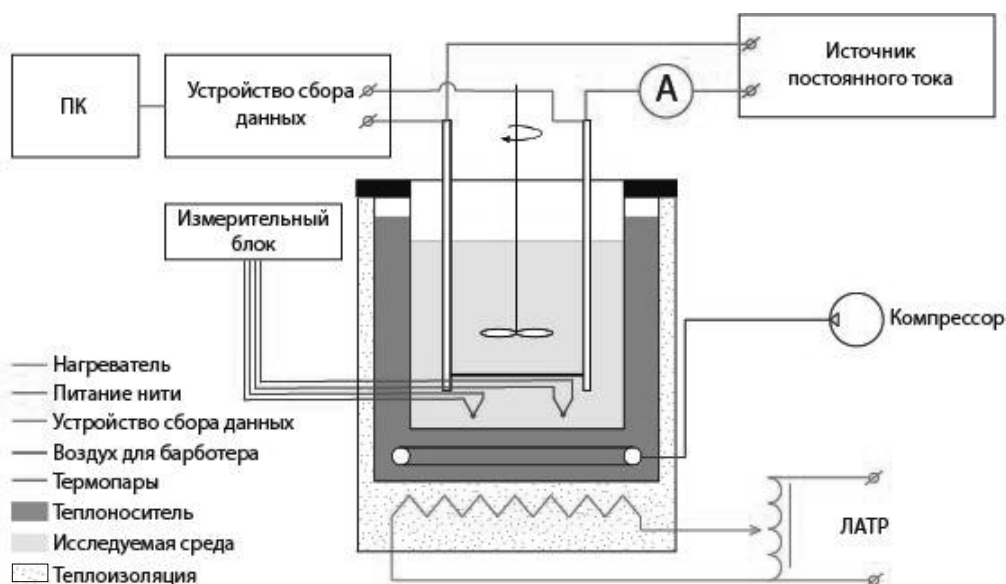


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. Experimental unit

измерительной фазы к рабочему узлу подводится электрический ток заданной величины от стабилизированного источника питания ТЭС-18. С помощью устройства сбора данных фиксируется изменение напряжения на рабочем узле. Устройство сбора данных подключается к компьютеру, в котором осуществляется обработка результатов измерений. Устройство сбора данных и программное обеспечение были созданы авторами специально для этой экспериментальной установки.

Фотография рабочего узла с нитью представлена на рис. 2. Собственно сама нить, помещается между двух держателей — медных токоподводящих электродов. Нить — это медная проволока диаметром 0,07 мм, не имеющая никаких покрытий. Длина нити определяется достаточной величиной электрического сопротивления для проведения измерений. Длина нити регулируется расстоянием между электродами. Опытным путем опреде-

лена длина нити — 45 мм. Токоподводящие электроды имеют сечение 3×3 мм и длину 100 мм. Учитывая их значительно большие геометрические размеры относительно самой нити, влиянием их сопротивления в процессе измерения можно пренебречь. Электроды закрепляются на пластине, изготовленной из электроизоляционного материала. Пластина имеет держатели для закрепления в стакане. Нижняя часть рабочего узла помещается в исследуемую среду — жидкость — так, чтобы нить располагалась в средней части объема. Верхняя часть рабочего узла закрепляется на кромке стакана, чтобы исключить ее перемещение в процессе эксперимента. К электродам подводится электрический ток и здесь же подключается устройство сбора данных. В рабочем узле также установлены две термопары для дополнительного надежного контроля температуры исследуемой жидкости.

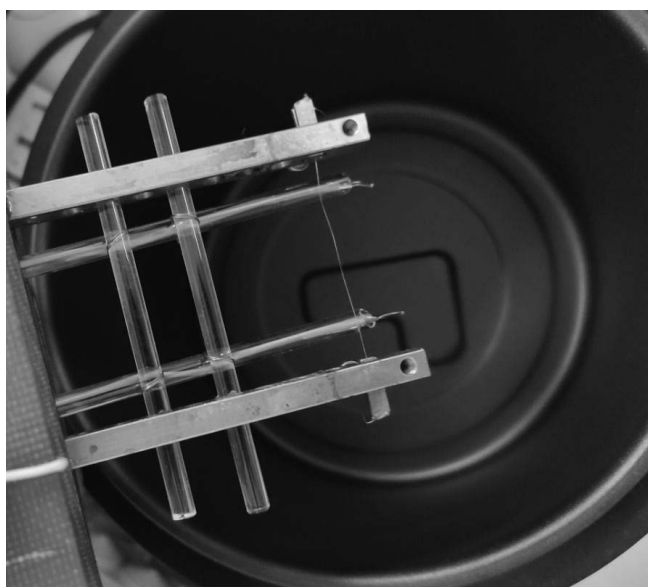


Рис. 2. Рабочий узел с нитью и термопарами
Fig. 2. Working point with wire and thermocouples

Устройство сбора данных предназначено для измерения изменения напряжения на электродах рабочего узла с нитью. Для этого был собран измерительный узел и разработано программное обеспечение к нему. Основным элементом его является аналого-цифровой преобразователь *ads1256* с разрядностью в 24 бита, который обеспечивает измерение падения напряжения на рабочем узле с точностью 0,2 мкВ и скоростью измерения 15 измерений в секунду. Управление АЦП и передача данных на ПК по интерфейсу *USART* реализовано на ПЛИК *ATmega328P*.

В основу алгоритма расчета метода нагреваемой нити входят положения тепловой модели, неоднократно использованной исследователями для множества материалов. Теоретические выкладки практически всех опубликованных работ идентичны и корректировки вносились только на условия конкретного образца. Можно воспользоваться формулами, приведенными в [10] со ссылкой на первоисточники. Дифференциальное уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах или уравнение Фурье выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau}. \quad (1)$$

При граничных и начальных условиях:

$$\tau = 0, \quad r > 0, \quad t = t_0 = 0. \quad (2)$$

$$\tau > 0, \quad r \rightarrow \infty, \quad t = 0. \quad (3)$$

$$\tau > 0, \quad r \rightarrow \infty, \quad t = -2\pi r \lambda \frac{\partial t}{\partial r} = Q = \text{const}, \quad (4)$$

где a — температуропроводность ($\text{м}^2/\text{с}$); λ — теплопроводность ($\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$); Q — удельный тепловой поток, приведенный к единице длины нити ($\text{Вт}/\text{м}$).

Для значений времени $\tau \gg r^2/4a$, приближенное решение уравнения (1) позволяет определить перегрев поверхности проволоки принимает при $r=r_0$:

$$\Delta t(r_0, r) = \frac{Q}{4\pi\lambda} \ln\left(\frac{4a\tau}{r_0^2 C}\right), \quad (5)$$

где $C=1,781$ — экспоненциальная постоянная Эйлера.

Принимая постоянство температуропроводности в малом температурном диапазоне, теплопроводность может быть выражена соотношением

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi} \cdot \frac{d(\ln\tau)}{d(\Delta t)}. \quad (6)$$

Теплопроводность может быть определена по удельной (линейной) мощности, подводимой к нагретой нити и тангенсу угла наклона S прямолинейного участка графика функции $\Delta t=f(\ln\tau)$.

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi} \cdot \frac{1}{S}. \quad (7)$$

Приведенная математическая модель реализована в виде программного алгоритма. Экспериментальная установка обеспечивает быстрый и точный сбор и обработку данных. Автоматизация эксперимента сокращает время на отдельные опыты и позволяет сосредоточить усилия на подготовке образцов. Информация в цифровом виде легко трансформируется и передается, данные могут быть сохранены и использованы в дальнейших исследованиях.

Результаты и обсуждение

На первом этапе экспериментальных исследований были проведены так называемые калибровочные опыты. Нужно было получить температурный коэффициент электрического сопротивления материала нити, а также установить пределы использования метода и его пригодность для проведения исследований. В качестве модельной жидкости для проведения калибровочных опытов был выбран глицерин, поскольку информация о его свойствах широко представлена в литературных источниках, и он обладает достаточно высокой вязкостью. Свойства глицерина приведены в табл. 2.

В результате первого калибровочного опыта в диапазоне температур от 25 до 125 °С получен средний температурный коэффициент электрического сопротивления материала нити — 0,0038 1/К. Результаты второго калибровочного опыта представлены на рис. 3. Погрешность полученных значений теплопроводности глицерина относительно справочных данных не превысила 6%.

На втором этапе экспериментальных исследований были проведены опыты по определению теплопроводности нерафинированного подсолнечного масла и его мисцелл массовой концентрацией от 90 до 100% по растительному маслу. На рис. 4 представлена зависимость теплопроводности объектов исследования от концентрации в исследуемом диапазоне температур.

Анализируя полученную зависимость концентрации от теплопроводности при различных температурах нерафинированного подсолнечного масла линолевого типа и его мисцелл видно, что с увеличением температуры от 25 до 125 °С теплопроводность уменьшается на 15–18%, что хорошо согласуется с подобными литературными данными. Экспериментально установлено, что с увеличением массовой концентрации мисцеллы подсолнечного масла в диапазоне от 90 до 100% его теплопроводность увеличивается на 5–6% во всем диапазоне температур измерения.

Полученные данные позволяют более точно выстраивать модели процессов на окончательной стадии дистилляции. Эти результаты предполагают возможность

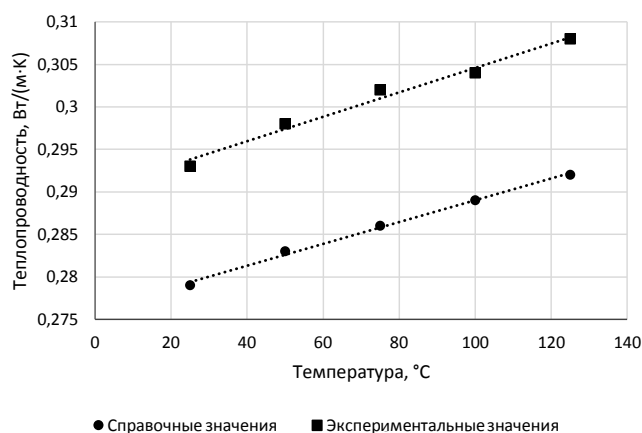


Рис. 3. Зависимость теплопроводности глицерина от температуры

Fig. 3. The dependency of glycerin heat conductivity on temperature

исследования взаимосвязи, которая преобладает между микроструктурой самих подсолнечных масел и возможностью передачи тепловой энергии. Однако, для понимания этого недостаточно только данных по изменению теплопроводности.

Полученные данные будут полезны в тепловых расчетах и при наличии конвекции, включая области фазовых превращений в обрабатываемой жидкости и на других стадиях масложирового производства. Например, при использовании так называемых двухслойных моделей переноса, подразумевающих наличие пристенного или пограничного микроподслоя, в котором предполагается перенос энергии только за счет теплопроводности.

Заключение

Было установлено, что значения теплопроводности при калибровке экспериментальной установки в этом исследовании были подобны результатам других авторов, разница составляет не более 6%. Значит, метод горячей нити является применимыми для жидкостей, имеющих близкие физические свойства. Такими могут быть рас-

Литература

1. Бучко Н. А. Энтальпийный метод численного решения задач теплопроводности в промерзающих или протаивающих грунтах. // Вестник Международной академии холода. 2009. № 2. С. 25–28.
2. Цветков О. Б., Митропов В. В., Лантев Ю. А. Теплопроводность жидких гидрофторхлорпроизводных олефинов. Корреляции и априорные оценки // Вестник международной академии холода. 2021. № 3. С. 75–80. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-3-75-80
3. Федоров А. В., Баранов И. В., Волков С. М., Тагиев Ш. К., Ефимов А. В., Романов Н. Н., Федоров А. А., Симонова М. А. Экспериментальные исследования интенсивности теплообмена в вязких многокомпонентных многофазных средах // Вестник Международной академии холода. 2020. № 4. С. 91–99. DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-4-91-99

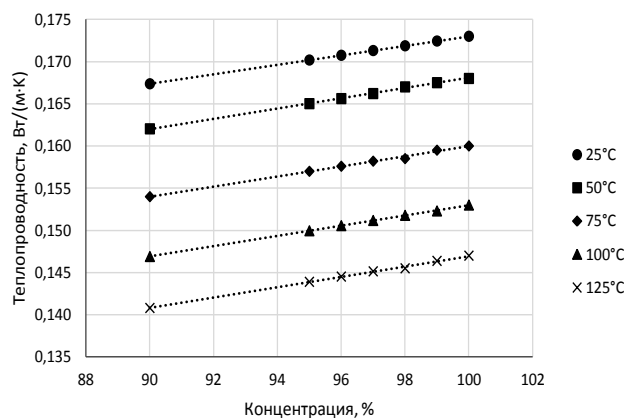


Рис. 4. Зависимость теплопроводности нерафинированного подсолнечного масла линолевого типа и его мисцелл от массовой концентрации масла в диапазоне температур от 25 до 125 °C

Fig. 3. The dependency of heat conductivity for unrefined sunflower oil of linoleic type and its miscellas on oil mass concertation in the temperature range of from 25 to 125 °C

тительные масла, их смеси, эмульсии на основе растительных масел. Возможно, это и смазывающие и смазывающе-охлаждающие жидкости на основе натуральных жиров и другие вязкие жидкости.

Экспериментально полученные значения теплопроводности мисцелл имеют решающее значение для практического проектирования, а также теоретических исследований и анализа, особенно в области теплопередачи и расчета поверхностей теплообмена. Для правильного моделирования процессов переноса исследуемых образцов знания только теплопроводности недостаточно. Необходим комплексный подход в анализе реологических и теплофизических свойств. Шаги в данном направлении уже сделаны и исследования теплопроводности в рамках данной работы — это часть комплексных исследований свойств растительных жиров и их полупродуктов (мисцелл).

Созданная экспериментальная установка и методика могут применяться для измерения теплопроводности других жидкостей и растворов в пищевой промышленности.

References

1. Buchko N. A. Enthalpy method of numerical solution of thermal conductivity problems in freezing or thawing soils. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2009. No. 2. pp. 25–28. (in Russian)
2. Tsvetkov O. B., Mitropov V. V., Laptev Yu. A. Thermal conductivity of liquid hydrofluorochloroderivatives of olefins. Correlations and a priori estimates. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021. No 3. p. 75–80. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-3-75-80 (in Russian)
3. Fedorov A. V., Baranov I. V., Volkov S. M., Tagiev Sh. K., Efimov A. V., Romanov N. N., Fedorov A. A., Simonova M. A. Experimental studies on the intensity of heat transfer in organic viscous media. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2020. No 4. p. 91–99. DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-4-91-99 (in Russian)

4. Тамбулатова Е. В., Платунов Е. С., Баранов И. В. Результаты исследований теплофизических свойств водных растворов сахарозы // Вестник международной академии холода. 2010. № 3. С. 41–46.
5. Assael M. J., Antoniadis K. D., Wakeham W. A. Historical evolution of the transient hot-wire technique // *International journal of thermophysics*. 2010. V. 31. no 6. P. 1051–1072. DOI: 10.1007/s10765-010-0814-9
6. Healy J. J., De Groot J. J., Kestin J. The theory of the transient hot-wire method for measuring thermal conductivity // *Physica B+C*. 1976. V. 82. No 2. P. 392–408 DOI: 10.1016/0378–4363 (76) 90203–5
7. Richard R. G., Shankland I. R. A transient hot-wire method for measuring the thermal conductivity of gases and liquids // *International journal of thermophysics*. 1989. V. 10. № 3. P. 673–686. DOI: 10.1007/BF00507988
8. Минаков А. В., Рудяк В. Я., Гузей Д. В., Пряжников М. И., Лобасов А. С. Измерение коэффициента теплопроводности наножидкостей методом нагреваемой нити // *Инженерно-физический журнал*. 2015. Т. 88. № 1. С. 148–160.
9. Побережский С. Ю., Симанков Д. С. Измерение тепловой активности фторуглеродов импульсным методом горячей нити // *Современные проблемы науки и образования*. 2012. № 6. С. 74–74.
10. Шамсетдинов Ф. Н., Зарипов З. И., Садыков А. Х., Мухамедзянов Г. Х. Экспериментальная установка для исследования теплопроводности органических соединений при повышенных давлениях // *Вестник Казанского технологического университета*. 2011. № 14. С. 230–234.
11. Бикташев Ш. А., Накипов Р. Р., Габитов И. Р., Усманов Р. А., Зарипов З. И. Коэффициенты теплопроводности рыбьего жира в диапазоне температур 298–363 К и давлений до 30 МПа // *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. Т. 17. № 4. С. 106–108.
12. Габитов И. Р., Накипов Р. Р., Бикташев Ш. А., Зарипов З. И., Усманов Р. А., Амирханов Р. Д. Теплофизические свойства бинарной смеси этиловый спирт — рапсовое масло // *Вестник Казанского технологического университета*. Т. 17. № 6. 2014. С. 113–116.
13. Turgut A., Tavman I., Tavman S. Measurement of thermal conductivity of edible oils using transient hot wire method // *International journal of food properties*. 2009. V. 12. No. 4. P. 741–747. DOI: 10.1080/10942910802023242
14. Božiková M., Hlaváč P. Thermophysical and rheologic properties of biooil samples // *Journal of Central European Agriculture*. 2013. 14 (3). P. 279–290. DOI: 10.5513/JCEA01/14.3.1318
15. Alvarado S., Marín E., Juárez A. G., Calderón A., Ivanov R. A hot-wire method based thermal conductivity measurement apparatus for teaching purposes // *European journal of physics*. 2012. V. 33. no. 4. P. 897. DOI: 10.1088/0143–0807/33/4/897
16. Okafor A. C., Nwoguh T. O. A study of viscosity and thermal conductivity of vegetable oils as base cutting fluids for minimum quantity lubrication machining of difficult-to-cut metals // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. V. 106. no. 3. P. 1121–1131. DOI: 10.1007/s00170-019-04611-3
17. Davis W. R. Hot-wire method for the measurement of the thermal conductivity of refractory materials // *Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods*. 1984. V. 1. P. 231–254.
18. Božiková M., Hlaváč P., Vozarova V., Beláň L. Experimental determination of soft wheat flour thermal parameters // *Acta*
4. Tambulatova E. V., Platunov E. S., Baranov I. V. Results of studies of thermophysical properties of aqueous sucrose solutions. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2010. No. 3. pp. 41–46. (in Russian)
5. Assael M. J., Antoniadis K. D., Wakeham W. A. Historical evolution of the transient hot-wire technique. *International journal of thermophysics*. 2010. V. 31. no 6. P. 1051–1072. DOI: 10.1007/s10765-010-0814-9
6. Healy J. J., De Groot J. J., Kestin J. The theory of the transient hot-wire method for measuring thermal conductivity. *Physica B+C*. 1976. V. 82. No 2. P. 392–408 DOI: 10.1016/0378–4363 (76) 90203–5
7. Richard R. G., Shankland I. R. A transient hot-wire method for measuring the thermal conductivity of gases and liquids. *International journal of thermophysics*. 1989. V. 10. № 3. P. 673–686. DOI: 10.1007/BF00507988
8. Minakov A. V., Rudyak V. Ya., Guzey D. V., Pryazhnikov M. I., Lobasov A. S. Measurement of the thermal conductivity coefficient of nanofluids by the heated thread method. *Engineering and Physics journal*. 2015. Vol. 88. No. 1. pp. 148–160. (in Russian)
9. Berezhsy S. Yu., Simakov D. S. Measurement of thermal activity of fluorocarbons by the pulsed method of hot thread. *Modern problems of science and education*. 2012. No. 6. pp. 74–74. (in Russian)
10. Shamssetdinov F. N., Zaripov Z. I., Sadykov A. H., Mukhamed zyanov G. H. Experimental setup for studying the thermal conductivity of organic compounds at elevated pressures. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2011. No. 14. pp. 230–234. (in Russian)
11. Biktashev Sh. A. Nakipov R. R., Gabitov I. R., Usmanov R. A., Zaripov Z. I. Thermal conductivity coefficients of fish oil in the temperature range of 298–363 K and pressures up to 30 MPa. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2014. Vol. 17. No. 4. pp. 106–108. (in Russian)
12. Gabitov I. R., Nakipov R. R., Biktashev Sh. A., Zaripov Z. I., Usmanov R. A., Amirkhanov R. D. Thermophysical properties of a binary mixture ethyl alcohol — rapeseed oil. *Bulletin of Kazan Technological University*. Vol. 17. No. 6. 2014. pp. 113–116. (in Russian)
13. Turgut A., Tavman I., Tavman S. Measurement of thermal conductivity of edible oils using transient hot wire method. *International journal of food properties*. 2009. V. 12. No. 4. P. 741–747. DOI: 10.1080/10942910802023242
14. Božiková M., Hlaváč P. Thermophysical and rheologic properties of biooil samples. *Journal of Central European Agriculture*. 2013. 14 (3). P. 279–290. DOI: 10.5513/JCEA01/14.3.1318
15. Alvarado S., Marín E., Juárez A. G., Calderón A., Ivanov R. A hot-wire method based thermal conductivity measurement apparatus for teaching purposes. *European journal of physics*. 2012. V. 33. no. 4. P. 897. DOI: 10.1088/0143–0807/33/4/897
16. Okafor A. C., Nwoguh T. O. A study of viscosity and thermal conductivity of vegetable oils as base cutting fluids for minimum quantity lubrication machining of difficult-to-cut metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. V. 106. no. 3. P. 1121–1131. DOI: 10.1007/s00170-019-04611-3
17. Davis W. R. Hot-wire method for the measurement of the thermal conductivity of refractory materials. *Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods*. 1984. V. 1. P. 231–254.
18. Božiková M., Hlaváč P., Vozarova V., Beláň L. Experimental determination of soft wheat flour thermal parameters. *Acta*

- Technologica Agriculturae. 2015. V. 18. no. 1. P. 6–9. DOI: 10.1515/ata-2015–0002
19. Merckx B., Dudoignon P., Garnier J. P., Marchand D. Simplified transient hot-wire method for effective thermal conductivity measurement in geo materials: microstructure and saturation effect // *Advances in Civil Engineering*. 2012. V. 2012. DOI:10.1155/2012/625395
 20. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Наука, 1972. 721 с.
 21. Ошина Л. А. Промышленные хлороорганические продукты. Справочник. М.: Химия, 1973. 656 с.
 22. Физические величины. Справочник. Под редакцией И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
 23. Плесовских В. А., Дубовик О. А., Безденежных А. А. Физико-химия и технология производства мыла. СПб.: Химиздат, 2007. 336 с.
 24. Бобылёв В. Н. Физические свойства наиболее известных химических веществ: Справочное пособие. РХТУ им. Д. И. Менделеева. М., 2003. 24 с.
 25. Чубик И. А., Маслов А. М. Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов. М.: Пищевая промышленность, 1970. 184 с.
 26. Гинзбург А. С., Громов М. А., Красовская Г. И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочник. М.: Пищевая промышленность, 1980. 288 с.
- Technologica Agriculturae*. 2015. V. 18. no. 1. P. 6–9. DOI: 10.1515/ata-2015–0002
19. Merckx B., Dudoignon P., Garnier J. P., Marchand D. Simplified transient hot-wire method for effective thermal conductivity measurement in geo materials: microstructure and saturation effect. *Advances in Civil Engineering*. 2012. V. 2012. DOI:10.1155/2012/625395
 20. Vargaftik N. B. Handbook of thermophysical properties of gases and liquids. 2nd ed., add. and reprint. Moscow: Nauka, 1972. 721 p. (in Russian)
 21. Oshina L. A. Industrial organochlorine products. Reference book. Moscow: Chemistry, 1973. 656 p. (in Russian)
 22. Physical quantities. Guide. Edited by I. S. Grigoriev, E. Z. Meilikhov. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 1232 p. (in Russian)
 23. Plesovskikh V. A., Dubovik O. A., Bezdenezhnykh A. A. Physico-chemistry and technology of soap production. St. Petersburg: Himizdat, 2007. 336 p. (in Russian)
 24. Bobylev V. N. Physical properties of the most famous chemicals: A reference guide. Russian State Technical University named after D. I. Mendeleev. Moscow, 2003. 24 p. (in Russian)
 25. Chubik I. A., Maslov A. M. Handbook of thermophysical characteristics of food products and semi-finished products. Moscow: Food industry, 1970. 184 p. (in Russian)
 26. Ginzburg A. S., Gromov M. A., Krasovskaya G. I. Thermophysical characteristics of food products. Reference book. Moscow: Food industry, 1980. 288 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Федоров Алексей Александрович

Аспирант факультета биотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, aafedorov@itmo.ru, ORCID ID 0000-0003-3860-7708

Кораблев Владимир Антонович

К. т. н., доцент факультета энергетики и экотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, vakorablev@itmo.ru, ORCID ID 0000-0002-6691-7140

Федоров Александр Валентинович

Д. т. н., доцент факультета биотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, afedorov@itmo.ru, ORCID ID 0000-0003-0030-3848

Ковальский Илья Сергеевич

Инженер-программист ООО «НПЦ «Судовые электротехнические системы» 196128, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6, ilya.kovalskiy@hotmail.com, ORCID ID 0000-0002-5096-134X

Волков Сергей Михайлович

К. х. н., старший научный сотрудник ВНИИЖиров, 191119, Санкт-Петербург, ул. Черняховского, 10, volkovsm@vniig.org, ORCID ID 0000-0002-6814-6140

Андреева Анастасия

Аспирант факультета биотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, aandreeva@itmo.ru, ORCID ID 0000-0002-4512-7932

Information about authors

Fedorov Aleksey A.

Postgraduate student of the Faculty of Biotechnology of ITMO University, Russia, 191002, St. Petersburg, Lomonosova St. 9, alex2829735@yandex.ru, ORCID ID 0000-0003-3860-7708

Korablev Vladimir A.

Ph. D., Associate Professor of Faculty of Energy and Ecotechnology of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, vakorablev@itmo.ru, ORCID ID 0000-0002-6691-7140

Fedorov Alexander V.

D. Sc., Associate Professor of the Faculty of Biotechnology of ITMO University, Russia, 191002, St. Petersburg, Lomonosova St. 9, afedorov@itmo.ru, ORCID ID 0000-0003-0030-3848

Kovalsky Ilya S.

Software engineer of LLC «SPC «Ship electrical engineering systems» 196128, St. Petersburg, Blagodatnaya str., 6, ilya.kovalskiy@hotmail.com, ORCID ID 0000-0002-5096-134X

Volkov Sergey M.

Ph. D., Senior researcher of All-Russian Research Institute of Fats, Russia, 191002, St. Petersburg, Chernyakhovsky St. 10, volkovsm@vniig.org, ORCID ID 0000-0002-6814-6140

Andreeva Anastasia

Postgraduate student of the Faculty of Biotechnology of ITMO University, Russia, 191002, St. Petersburg, Lomonosova St. 9, aandreeva@itmo.ru, ORCID ID 0000-0002-4512-7932

