

УДК 536.2.081.7

## Определение теплофизических свойств водно-солодовой суспензии

А. Ю. КУЗНЕЦОВ\*, д-р техн. наук А. Г. НОВОСЁЛОВ

Университет ИТМО

\*E-mail: sasha\_2731@mail.ru

*Разработка и проектирование высокоэффективных, универсальных конструкций тепло-массообменного оборудования, предназначенного для реализации современных технологий производства спиртовой и безалкогольной продукции невозможна без всестороннего изучения теплофизических свойств исходной рабочей среды в процессе ее трансформации в целевой продукт. Так, важнейшей и в то же время энергозатратной стадией процесса пивоварения является водно-тепловая обработки измельченного солода. Водно-тепловая обработка измельченного солода напрямую влияет на органолептические свойства пива и его объем. В данной работе представлены: методы и принципы исследования, а также основные результаты исследования теплофизических свойств солодовых суспензий. Исследовались суспензии, приготовленные из следующих фракций: <0,18 мм; 0,18–0,25 мм; 0,25–0,3 мм; 0,3–0,425 мм; 0,425–0,5 мм; 0,5–0,71 мм; 0,71–1,00 мм, для каждого из гидромодулей (1:2,5; 1:3; 1:3,5; 1:4; 1:5). Получены значения коэффициента теплопроводности, удельной теплоемкости и коэффициента температуропроводности, для всех объектов исследований, при температуре 20 °С. На основании этих данных построены характеристики для всех исследованных объектов исследований, в которых отображено изменение теплофизических свойств от гидромодуля и фракционного состава. Установлено, повышение содержания воды в суспензии или выбор большего гидромодуля ведет к повышению коэффициента теплопроводности, коэффициента температуропроводности и удельной теплоемкости суспензии. При этом влияние среднего размера фракции на теплофизические свойства водно-солодовой суспензии является минимальным. Результаты исследований позволят существенно уточнить расчетные зависимости, связанные с разработкой и проектированием высокоэффективных, универсальных конструкций тепло-массообменного оборудования, предназначенного для реализации современных технологий производства спиртовой и безалкогольной продукции.*

**Ключевые слова:** гидромодуль, фракция, теплоемкость, коэффициент температуропроводности, коэффициент теплопроводности.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 11.03.2025, одобрена после рецензирования 16.04.2025, принята к печати 23.04.2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-3-83-89

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Кузнецов А. Ю., Новосёлов А. Г. Определение теплофизических свойств водно-солодовой суспензии. // Вестник Международной академии холода. 2025. № 3. С. 83–89. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-3-83-89

## Determination of thermophysical properties of water-malt suspension

A. Y. KUZNETSOV\*, D. Sc. A. G. NOVOSELOV

ITMO University

\*E-mail: sasha\_2731@mail.ru

*The development and design of highly efficient, universal designs of heat and mass transfer equipment to implement modern technologies for the production of alcoholic and non-alcoholic beverages is impossible without a comprehensive study of the thermophysical properties of the initial working medium in the process of its transformation into the target product. Thus, the most important and at the same time energy-consuming stage of the brewing process is the water-heat treatment of crushed malt. Water-heat treatment of crushed malt directly affects the organoleptic properties of beer and its volume. This paper presents: research methods and principles, as well as the main results for the study of thermophysical properties of malt suspensions. The suspensions prepared from the following fractions were studied: < 0.18 mm; 0.18–0.25 mm; 0.25–0.3 mm; 0.3–0.425 mm; 0.425–0.5 mm; 0.5–0.71 mm; 0.71–1.00 mm, for each of the hydraulic modules (1:2.5; 1:3; 1:3.5; 1:4; 1:5). The values of the thermal conductivity coefficient, specific heat capacity and thermal diffusivity coefficient were obtained for all research objects at a temperature of 20 °C. Based on these data, characteristics were determined for all the studied objects, which displayed the change in thermophysical properties from the hydraulic module and fractional composition. It was found that an increase in the water content in the suspension or the choice of a larger hydraulic module leads to an increase in the thermal conductivity coefficient, thermal diffusivity coefficient, and specific heat capacity of the suspension. At the same time, the effect of the average fraction size on the thermophysical properties*

*of the water-malt suspension is minimal. The research results allow to clarify significantly the calculation dependencies associated with the development and design of highly efficient, universal designs of heat and mass transfer equipment to implement modern technologies for the production of alcoholic and non-alcoholic beverages.*

**Keywords:** hydromodule, fraction, heat capacity, thermal diffusivity coefficient, thermal conductivity coefficient.

#### Article info:

Received 11/03/2025, approved after reviewing 16/04/2025, accepted 23/04/2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-3-83-89

Article in Russian

#### For citation:

Kuznetsov A. Y., Novoselov A. G. Determination of thermophysical properties of water-malt suspension. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2025. No 3. p. 83-89. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-3-83-89

## Введение

Производство современного оборудования пиваренной промышленности, неразрывно связано с работой конструкторов и технологов по разработке энергоэффективного оборудования, одним из путей повышения энергоэффективности процесса является интенсификация технологического процесса. Интенсификация технологического процесса заключается в увеличении выхода целевых компонентов на каждой ее стадии, при меньших затратах энергии и времени, а также упрощении машинно-аппаратурных схем производства и более рациональной подготовке исходного сырья к началу технологического процесса.

Таким образом, разработка универсального, технологического оборудования, которое позволит осуществлять в нем несколько стадий технологического процесса, а также откроет возможность для снижения среднего размера частиц помола является актуальной задачей.

Был проведен литературный обзор, в ходе которого было выявлено, что разработки в данном направлении проводились и подобный подход к разработке современного оборудования был представлен в работах [1, 2]. Где был рассмотрен кожухотрубный струйно-инжекционный аппарат (КСИА), как универсальное оборудование. Безусловно, для выполнения расчетов по данному оборудованию потребуется изучить свойства среды, которые могут меняться при температурной обработке, а также в зависимости от фракционного состава и от массовой доли помола в суспензии. Этот вопрос рассматривался в работе [3], где представлены реологические исследования водно-солодовой суспензии. Значения коэффициентов динамической вязкости, которые были получены позволяют осуществить гидродинамический расчет КСИА, который необходим для затирания и варки суслу.

Разработка нового оборудования требует определенных знаний о трансформации и свойствах исходного сырья, при осуществлении проведения технологического процесса [4]. Каждый технологический процесс представляет собой совокупность физико-химических процессов, которые, определяются гидродинамическими, тепловыми, массообменными и биохимическими процессами. Тепловые, массообменные и биохимические расчеты в полной мере зависят теплофизических свойств рабочей среды, зависящие от количественного и качественного состава, образующих ее, химических элементов. Кроме этого, знание физических свойств рабочей среды позволяет разработчикам технологий производства

и проектировщикам технологического оборудования технически грамотно оценивать энергетические затраты на производство условной единицы продукции.

Одним из малоисследованных направлений, касающихся влияния размера твердых частиц на физические свойства суспензий, является определение влияния размера частиц фракции на теплофизические свойства солодовых суспензий.

## Цели и задачи исследования

Целью работы является разработка методики определения теплофизических свойств водно-солодовой суспензий в широком диапазоне фракций, а также определение влияния гранулометрического состава и гидромодуля на реологические свойства водно-солодовой суспензии.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- провести литературный обзор и его анализ, осуществить выбор методов и лабораторного оборудования для исследования теплофизических свойств водно-солодовой суспензии;
- выполнить построение графиков зависимости теплофизических характеристик: теплопроводности, температуропроводности и удельной теплоемкости от гидромодуля;
- выполнить исследование по влиянию гранулометрического (фракционного) состава на теплофизические характеристики: теплопроводность, температуропроводность и теплоемкость водно-солодовой суспензий для ряда фракций помолов менее 1 мм.

## Материалы и методы исследований

Исследуемой средой является водно-солодовая суспензия со следующими гидромодулями: 1:2.5; 1:3; 1:3.5; 1:4; 1:5. Для создания суспензий использовался помол солода, который получили после отсева на ситах со следующим размером ячеек: 1 мм; 0,71 мм; 0,5 мм; 0,425 мм; 0,3 мм; 0,25 мм; 0,18 мм. Рассев необходим для разделения помола по фракциям.

Одним из наиболее точных и удобных для расчета способом определения теплофизических характеристик является метод нестационарного плоского источника тепла. Поэтому решено было использовать анализатор теплофизических коэффициентов *Hot Disk*, который является абсолютным способом определения теплофизических характеристик к единице объема исследуемого образца [5]–[7].

В ходе экспериментов на водно-солодовой суспензии, замечено, что она достаточно быстро расслаивается. Данный фактор влияет на точность полученных данных, так как при расслоении кэптоновый плоский датчик оказывался в воде. Это подтвердил также анализ полученных данных, так теплопроводность соответствовало показаниям воды для данной температуры согласно справочным данным. Анализатор теплофизических коэффициентов *Hot Disk* позволяет проводить исследование теплофизических характеристик не только жидкостей, но и помолов. В связи с этим было принято решение исследовать теплофизические свойства помола солода, а затем произвести расчет теплофизических характеристик для водно-солодовой суспензии через зависимости (1)–(3).

В ходе литературного обзора было обнаружено несколько способов расчета теплофизических характеристик жидкостей, но нельзя говорить об абсолютной точности расчетных данных, однако, нельзя считать данные способы неприемлемыми [8].

Теплопроводность водно-солодовой суспензии  $\lambda_{nf}$  можно рассчитать по формуле Максвелла [9]:

$$\lambda_{nf} = \lambda_f \left[ \frac{\lambda_p + 2\lambda_f - 2\varphi(\lambda_f - \lambda_p)}{\lambda_p + 2\lambda_f + \varphi(\lambda_f - \lambda_p)} \right], \quad (1)$$

где  $\lambda_f$  — теплопроводность жидкости (воды), при температуре проведения экспериментов  $t=20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_f=0,603\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , [10];  $\lambda_p$  — теплопроводность твердого тела (помола солода),  $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $\varphi$  — объемная концентрация, рассчитываемая по формуле:

$$\varphi = \frac{V_p}{V_f} = \frac{m_p/p_p}{V_f}, \quad (2)$$

где  $V_p$  — объем твердого тела (помола солода),  $\text{м}^3$ ;  
 $V_f$  — объем жидкости (воды),  $\text{м}^3$ .

При смешивании воды и помола солода, для создания водно-солодовой суспензии немаловажным, с технологической точки зрения, является соблюдение гидромодуля (отношение массы помола к объему воды).

В работе [11] авторы отмечают, что удельную теплоемкость напитков, которые состоят из помола и воды, можно рассчитать через формулу (3):

$$C = C_{п}x_{п} + C_{в}x_{в}, \quad (3)$$

где  $C_{п}$ ,  $C_{в}$  — удельные теплоемкости помола и воды,  $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ , соответственно;  $x_{п}$ ,  $x_{в}$  — массовые доли помола и воды, соответственно.

Согласно формуле (3) для расчета удельной теплоемкости водно-солодовой суспензии необходимо знать

массовые доли составляющей суспензии и их удельные теплоемкости. Удельная теплоемкость воды при  $20\text{ }^\circ\text{C}$  составляет  $4183\text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$  [10]. Удельная теплоемкость помола солода была определена экспериментально на установке *Hot Disk*.

Так как удельная теплоемкость и теплопроводность известны, то температуропроводность рассчитывается через теплопроводность, используя известное соотношение (4) [12]:

$$\alpha = \frac{\lambda}{C \cdot \rho}. \quad (4)$$

### Результаты и их обсуждение

Для эксперимента измельченный солод помещался в ячейку, где радиус датчика (глубина пробы) для помола составил  $6,3\text{ мм}$ . Для каждой из 7 фракций было проведено по 5 экспериментов, а затем рассчитывалось среднее значение теплопроводности, которое представлено в табл. 1. График зависимости теплопроводности помола солода от среднего размера частиц фракции изображен на рис. 1.

Проведя обширный литературный обзор, можем отметить недостаток данных теплофизических характеристик помола солода или водно-солодовой суспензии. Однако, данные, которые обнаружены могут быть применены для оценки корректности полученных экспериментальных и расчетных данных теплопроводности. Так, согласно источникам [13, 14] для немолотого ячменного солода  $\lambda_p=0,210\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

По графику, показанному на рис. 1, теплопроводность помола солода от среднего размера частиц может быть описано линейным уравнением.

Для расчета объемной концентрации по формуле (2) необходимо произвести исследование насыпной плотности помола солода  $p_p\text{ [кг/м}^3\text{]}$  для каждой из фракций. Она определялась на установке с воронкой, расположенной на фиксированной высоте, с мерным стаканом известного объема и шпателем для разравнивания стакана. Данные замеры производились на каждой из фракций, а полученные данные позволили построить график, показанный на рис. 2.

По графику, представленному на рис. 2. можем отметить линейную зависимость насыпной плотности помола солода от среднего размера частиц фракции. Повышение размера фракции ведет к снижению насыпной плотности из-за преобладания шелухи.

Данные по рассчитанным теплопроводности для солодовой суспензии из молотого солода различных фракций и гидромодулей представлены в табл. 2.

Таблица 1

Результаты измерений теплопроводности помола солода

Table 1

The results of measuring thermal conductivity of malt grinding

Размер частиц фракции, мм	<0,180	0,180–0,250	0,250–0,300	0,300–0,425	0,425–0,500	0,500–0,710	0,710–1,000
Средний размер частиц фракции, мм	0,09	0,215	0,275	0,3625	0,4625	0,605	0,855
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,146	0,155	0,142	0,150	0,164	0,153	0,135

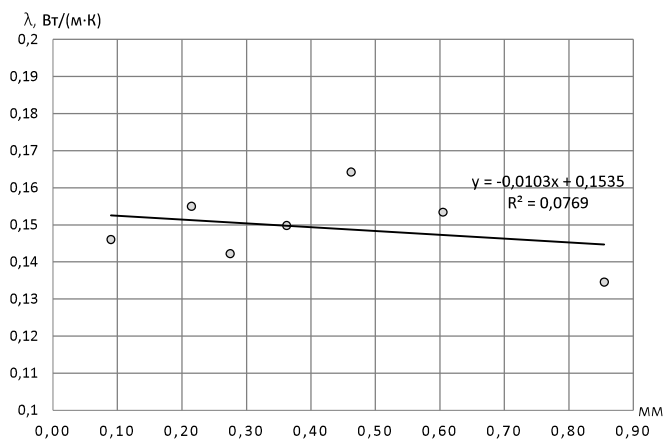


Рис. 1. График зависимости теплопроводности солода от среднего размера частиц фракции

Fig. 1. Dependence of malt thermal conductivity on the average particle size of the fraction

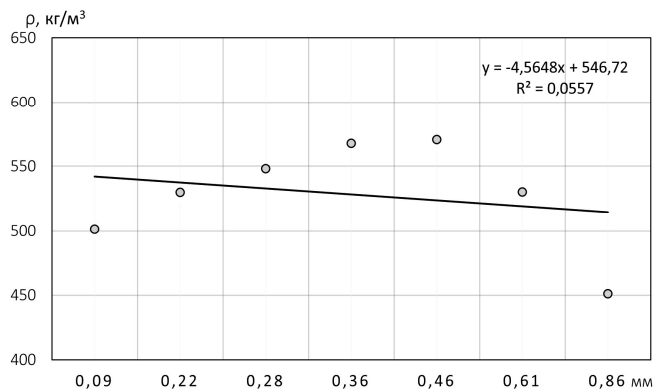


Рис. 2. График зависимости насыпной плотности помола солода от среднего размера частиц фракции

Fig. 2. Dependence of the bulk malt grinding density on the average particle size of the fraction

Таблица 2

Результаты расчета теплопроводности солодовой суспензии, произведённой из помола солода и воды

Table 2

The results of calculating the thermal conductivity of malt suspension produced from malt and water grinding

Гидромуль	0,09	0,215	0,275	0,3625	0,4625	0,605	0,855
1 к 2,5	0,444	0,447	0,442	0,445	0,451	0,447	0,439
1 к 3	0,462	0,465	0,461	0,463	0,469	0,465	0,458
1 к 3,5	0,477	0,480	0,475	0,478	0,483	0,479	0,473
1 к 4	0,488	0,491	0,487	0,490	0,494	0,491	0,485
1 к 5	0,507	0,509	0,506	0,508	0,511	0,508	0,503

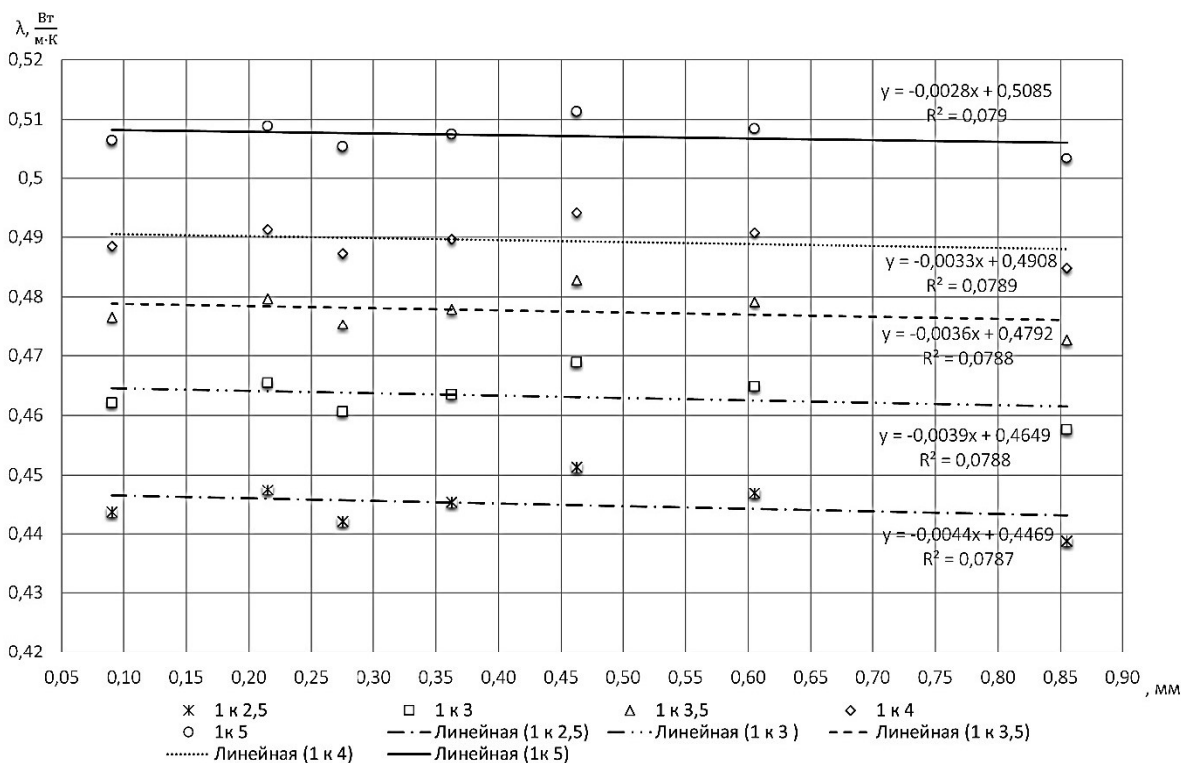


Рис. 3. График зависимости теплопроводности водно-солодовой суспензии от среднего размера частиц фракции

Fig. 3. Dependence of the thermal conductivity of aqueous malt suspension on the average particle size of the fraction

Таблица 3

Результаты экспериментов и расчетов по определению удельной теплоемкости водно-солодовой суспензии

Table 3

The results of experiments and calculations to determine the specific heat capacity of water-malt suspension

Гидромуль	0,09	0,215	0,275	0,3625	0,4625	0,605	0,855
1 к 2,5	3267,3	3268,0	3230,6	3290,0	3256,2	3251,7	3266,6
1 к 3	3381,7	3382,4	3349,6	3401,6	3372,0	3368,1	3381,1
1 к 3,5	3470,8	3471,4	3442,2	3488,4	3462,1	3458,6	3470,2
1 к 4	3542,0	3542,5	3516,3	3557,9	3534,2	3531,1	3541,5
1 к 5	3648,8	3649,3	3627,4	3662,1	3642,3	3639,7	3648,4

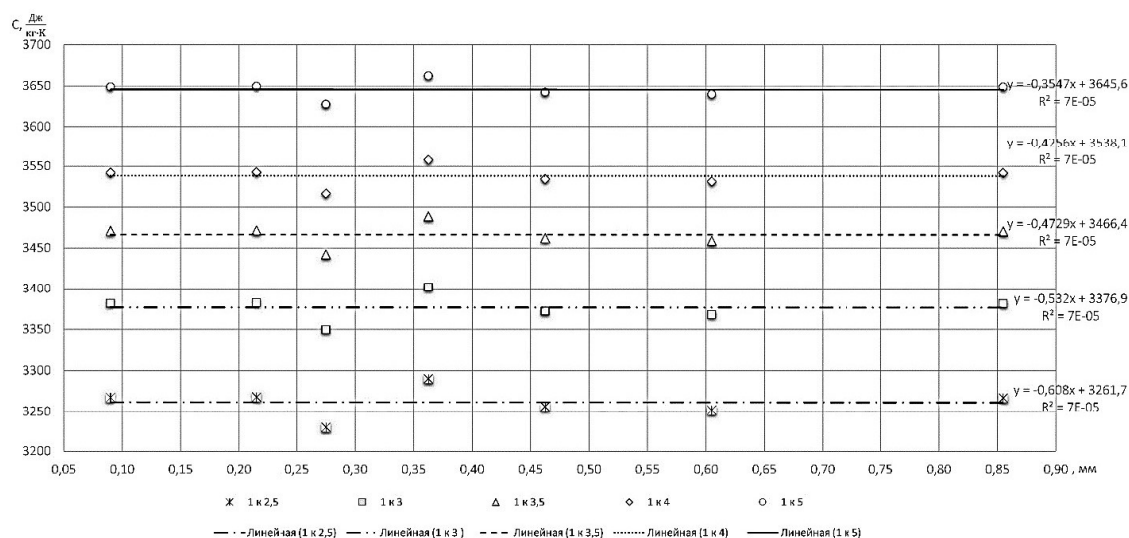


Рис. 4. График зависимости удельной теплоемкости водно-солодовой суспензии от среднего размера частиц фракции

Fig. 4. Dependence of the specific heat capacity of water-malt suspension on the average particle size of the fraction

Расчетные данные позволили построить графики зависимости теплопроводности водно-солодовой суспензии к среднему размеру частиц фракции, который изображен на рис. 3. В ходе литературного обзора данных по теплофизическим характеристикам водно-солодовых суспензий обнаружено не было. Были обнаружены результаты экспериментов исследования теплопроводности водно-угольной суспензии  $\lambda_{нф} = 0,41 - 0,81$  Вт/(м·К) [15]. Теплопроводность водно-угольной суспензии оказалась значительно выше теплопроводности угля.

Результаты экспериментов исследования теплопроводности показали, что теплопроводность помола солода находится в следующем диапазоне значений  $\lambda_p = 0,135 - 0,164$  Вт/(м·К), а теплопроводность водно-солодовой суспензии составила  $\lambda_{нф} = 0,442 - 0,511$  Вт/(м·К).

По графику, представленному на рис. 3. можем отметить линейную зависимость коэффициента теплопроводности водно-солодовой суспензии от размера частиц фракции. Повышение содержания воды в суспензии или выбор большего гидро модуля ведет к повышению коэффициента теплопроводности суспензии. При этом влияние размера фракции на коэффициент теплопроводности суспензии является минимальным.

Согласно формуле (3), были произведены расчеты теплоемкости водно-солодовой суспензии, которые представлены в табл. 3.

По полученным данным для каждого из гидро модулей были построены графики зависимости удельной теплоемкости водно-солодовой суспензии к среднему размеру частиц фракции, которые представлены на рис. 4.

Исходя из вышеприведенных данных, по уравнению 4 были рассчитаны температуропроводности для каждого из гидро модулей и фракций. По полученным данным, были построены графики зависимости температуропроводности водно-солодовой суспензии к среднему размеру частиц фракции, которые представлены на рис. 5.

По графикам, представленным на рис. 3, 4, 5 можем отметить линейную зависимость теплопроводности, удельной теплоёмкости и температуропроводности водно-солодовой суспензии от среднего размера частиц фракции. Повышение содержания воды в суспензии или выбор большего гидро модуля ведет к повышению теплопроводности, удельной теплоемкости и температуропроводности суспензии. При этом влияние размера частиц фракции на теплопроводности, удельную теплоемкость и температуропроводности суспензии является минимальным.



7. Goetze P. et al. Advances in measuring thermophysical properties of liquids by the transient plane source technique. // International Heat Transfer Conference Digital Library. Begel House Inc., 2018. DOI: 10.1615/IHTC16.tpm.023089
8. Цедерберг Н. В. Теплопроводность газов и жидкостей. Л.: Госэнергоиздат, 1963. 158 с.
9. Морозова М. А. Теплопроводность и вязкость наножидкостей.: дисс. канд. техн. наук. Новосибирск.: Институт теплофизики СО РАН. 2019. 103 с.
10. Чубик И. А., Маслов А. М. Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов. М.: Пищевая промышленность. 1970. 271 с.
11. Ботов М. И. и др. Аналитическое определение теплофизических характеристик пищевых жидкостей // Наука и бизнес: пути развития. 2018. № 1 (79). С. 13.
12. Пономарев С. В., Мищенко С. В., Дивин А. Г. Теоретические и практические основы теплофизических измерений. Тамбов.: Издательство «Физико-математическая литература». 2016. 41 с.
13. Гинзбург А. С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности. М.: Пищевая промышленность. 1966. 407 с.
14. Каххоров Ф. Б., Чимпайзов Ф. Н. Сорбционные и теплофизические свойства круп и зернопродуктов // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. 2023.11 (116). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/16300> (Дата обращения 11/03/2025).
15. Пинчук В. А., Жуков В. Е., Шарабура Т. А. Экспериментальные исследования теплопроводности водоугольных суспензий. Днепропетровск: Современная наука исследования, идеи, результаты, технологии. 2013. № 2. С. 149–155.
16. *tional Heat Transfer Conference Digital Library*. Begel House Inc., 2018. DOI: 10.1615/IHTC16.tpm.023089
8. Tseiderberg N. V. Thermal conductivity of gases and liquids. Leningrad: Gosenergoizdat, 1963. 158 p. (in Russian)
9. Morozova M. A. Thermal conductivity and viscosity of nanofluids. Ph. D. techn. sci. diss. Novosibirsk: Institute of Thermophysics SB RAS, 2019. 103 p. (in Russian)
10. Chubik I. A., Maslov A. M., Handbook of thermophysical characteristics of food products and semi-finished products. Moscow: Food industry. 1970. 271 p. (in Russian)
11. Botov M. I., ets. Analytical determination of thermophysical characteristics of food liquids. *Science and business: development paths*. 2018. No. 1 (79). p. 13. (in Russian)
12. Ponomarev S. V., Mishchenko S. V., Divin A. G. Theoretical and practical foundations of thermophysical measurements. Tambov: Publishing house «Physico-mathematical literature». 2016. 41 p. (in Russian)
13. Ginzburg A. S. Infrared technology in the food industry. Moscow: Food industry. 1966. 407 p.
14. Kakhkhorov F. B., Chimpaizov F. N. Sorption and thermophysical properties of cereals and grain products. *Universum: technical sciences: electron. scientific Journal*. 2023.11 (116). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/16300> (Accessed 11/03/2025).
15. Pinchuk V. A., Zhukov V. Ye., Sharabura T. A. Experimental studies of thermal conductivity of coal-water suspensions. Dnepropetrovsk: Modern science of research, ideas, results, technologies. 2013. № 2. pp. 149–155. (in Russian)

### Сведения об авторах

#### Кузнецов Александр Юрьевич

Аспирант Образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы», Университет ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, sasha\_2731@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9953-9203

#### Новосёлов Александр Геннадьевич

Д. т. н., профессор, доцент Образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы», Университет ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, agnovoselov@itmo.ru, ORCID: 0000-0002-1168-5362

### Information about authors

#### Kuznetsov Aleksandr Y.

Postgraduate student of the Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems», ITMO University, Russia, 191002, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, sasha\_2731@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9953-9203

#### Novoselov Alexander G.

D. Sc., Professor, Associate Professor of the Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems», ITMO University, 191002, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, Lomonosova, 9, agnovoselov@itmo.ru, ORCID: 0000-0002-1168-5362



Статья доступна по лицензии  
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»