

УДК 536.1/.62/.63; 665.1/.3

Экспериментальные исследования интенсивности теплообмена в вязких многокомпонентных многофазных средах

Д-р техн. наук А. В. ФЕДОРОВ¹, д-р техн. наук И. В. БАРАНОВ¹, канд. хим. наук С. М. ВОЛКОВ²,
Ш. К. ТАГИЕВ², А. В. ЕФИМОВ², канд. техн. наук Н. Н. РОМАНОВ³, А. А. ФЕДОРОВ¹,
канд. техн. наук М. А. СИМОНОВА⁴

¹Университет ИТМО

²Всероссийский научно-исследовательский институт жиров

³Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России

⁴Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

E-mail: afedorov@itmo.ru

Рассматриваются и обсуждаются результаты экспериментальных исследований по изучению интенсивности процессов теплопереноса в органических вязких средах: растительное масло; мисцелла растительного масла; глицерин; смазывающие охлаждающие жидкости. Для проведения экспериментов предложен аппаратно-программный комплекс для автоматизации исследований по изучению теплопередачи образцов в вязких жидких средах, посредством измерения статических и динамических температурных характеристик. Получены зависимости коэффициента теплоотдачи от перегрева ядра в органических вязких средах на основании экспериментальных данных. Предлагаемый метод исследования интенсивности теплообмена базируется на теории регулярного теплового режима и основан на расчете теплоотдачи при остывании тела простой геометрической формы — металлического шара. Данный метод является экспрессным, а также позволяет работать с взрывоопасными и легковоспламеняющимися жидкостями, содержащими органические растворители. Исследование показало возможность изучения процесса теплоотдачи в однофазных, двухфазных средах, включая область фазового перехода. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании оборудования для производства и переработки масложировых продуктов.

Ключевые слова: вязкая среда, растительное масло, теплота, теплоотдача, перегрев, метод регулярного режима.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 19.10.2020, принята к печати 16.11.2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-4-91-99

Язык статьи — русский

Для цитирования:

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

Experimental studies on the intensity of heat transfer in organic viscous media

D. Sc. A. V. FEDOROV¹, D. Sc. I. V. BARANOV¹, Ph. D. S. M. VOLKOV², Sh. K. TAGIEV², A. V. EFIMOV²,
Ph. D. N. N. ROMANOV³, A. A. FEDOROV¹, Ph. D. M. A. SIMONOVA⁴

¹ITMO University

²All-Russian research Institute of fats

³Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia

⁴Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University

E-mail: afedorov@itmo.ru

The results of experimental studies on the intensity of heat transfer processes in organic viscous media are considered and discussed: vegetable oil; miscella of vegetable oil; glycerol; lubricating coolants. An hardware and software complex for automatization of the studies on heat transfer in viscous liquids media by the measurements of static and dynamic temperature characteristics is proposed for the experiments. The experimentally found dependencies of heat transfer coefficient on core overheating in organic viscous media are shown. The proposed method is based on the theory of a regular thermal regime and is based on the calculation of heat transfer during cooling of a body of a simple geometric shape — a metal ball.

This is an express method and it also allows working with explosive and flammable liquids containing organic solvents. The research demonstrated the possibility of analyzing the process of heat transfer in single-phase and double-phase media, including phase transition zone. The results obtained can be useful in designing equipment for the production and processing of fat and oil products.

Keywords: viscous medium, vegetable oil, heat, heat transfer, overheating, regular mode method.

Article info:

Received 19/10/2020, accepted 16/11/2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-4-91-99

Article in Russian

For citation:

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

Введение

Необходимость в исследованиях процессов переноса энергии и массы в вязких многокомпонентных средах вызвана потребностью в формировании теоретических представлений, которые используются как на стадии проектирования оборудования, так и при совершенствовании существующих технологий. Так называемые вязкие среды, то есть состоящие из веществ с высокой вязкостью, в огромном количестве представлены как в природе, так и в технике. Несмотря на достаточную изученность, продолжается исследование их свойств, при этом цели могут быть самыми разнообразными.

Основными особенностями вязких сред является существенная неравномерность физических свойств, которые определяют активность взаимодействия слоев и отдельных объемов жидкости. Присутствие газообразной и твердой фаз вносит еще большую сложность в расчеты, даже на стадии постановки задачи. Твердой фазой могут быть или фрагменты этой же жидкости, находящиеся в твердом состоянии, или иные сопутствующие и привнесенные вещества. В вязких средах особенно ярко проявляется взаимное влияние процессов переноса. Сложно утверждать, что является главным, определяющим, или как принято утверждать, побуждающим воздействием: перенос массы или энергии. Или же наоборот, что препятствует интенсивному теплообмену. Существенная зависимость вязкостных свойств от температуры предопределяет сложность формирования расчетных соотношений.

Наш научный интерес сконцентрирован в области технологий извлечения, переработки, хранения и использования растительных жиров. Растительные жиры и продукты их переработки относятся к вязким жидкостям, во всем диапазоне режимных параметров. Как показывает практика, имеющихся на сегодня данных недостаточно для полного представления о процессах при нагреве, перемещении, перемешивании и даже при обычном хранении данных веществ.

В литературных источниках представлена информация, которая в основном касается исследований теплофизических свойств [1]–[3], хотя и в достаточно широком диапазоне параметров. Есть работы, в которых предлагаются соотношения для оценки переносных свойств [4, 5]. Несомненно, полезной остается, представленная в монографии [6], информация. Не потеряли актуальности, ставшие на практике классическими, такие издания как

[7]. Однако, появляются новые сорта и виды растительного сырья. Промышленность осваивает новые жиродержащие продукты, которые востребованы на рынке. В переработке растительных масел интересной является область технических жиров. При производстве глицерина и моющих средств преобладает длительное температурное воздействие в высоковязких средах. В машиностроении и металлообработке используются смазывающие охлаждающие жидкости, в которых может применяться составляющие из растительных жиров.

В целом, по стране извлекаются из масличного сырья, перерабатываются, хранятся, перекачиваются, используются в технологических процессах внушительные объемы растительных жиров, а диапазон режимных параметров очень разнообразен. Производство и переработка растительных жиров продолжает увеличиваться.

Логистические потоки требуют максимально возможное сохранение продукции в заданном качестве без изменения состава, при этом растительное масло подвергается механическим, температурным и другим воздействиям. В сфере общественного питания применяются технологии, в которых растительные жиры подвергаются интенсивному тепловому воздействию, иногда многократно.

Именно состав жиров и жировых продуктов существенно влияет на формирование физических и физико-химических свойств. Поэтому публикации [8]–[10] представляют повышенный интерес и подтверждают актуальность выбранной нами темы исследований. Работа [11] посвящена анализу теплопередачи вязкой несжимаемой жидкости при совместном переносе тепловой энергии естественной конвекцией и излучением в открытой полости. В публикации [12] приведен анализ пассивных методов интенсификации теплопередачи для жидкостей высокой вязкости.

Нами в ранее опубликованных материалах [12] сделаны шаги в направлении комплексных исследований, целью которых является установление связи между структурами веществ и их тепловыми характеристиками.

Передовые технологии реализуются с применением высокопроизводительного оборудования. В оборудовании имеются высокие удельные плотности тепловых потоков, которые совершенно иначе влияют на формирование гидродинамической обстановки нежели традиционные. Обработываемые вязкие среды создают высокие градиент температур, направленный по нормали к те-

плоотдающей поверхности Вязкие жидкости сдерживают теплопередачу и массообмен.

Использование результатов исследований в промышленных условиях может стать созданием программного обеспечения систем управления технологическими процессами. Современные средства контроля и измерения параметров технологических процессов требуют адекватных математических моделей, в которых в свою очередь должны использоваться надежные формулы и зависимости.

Известно, что наиболее ценную информацию дают эксперименты. В данном исследовании поставлена задача получения новых данных по интенсивности теплоотдачи от греющей поверхности к жидкой среде. В качестве исследуемых сред выбраны вещества, для которых подобные исследования проводятся впервые для рассматриваемого диапазона режимных параметров.

Схема экспериментальной установки и методика проведения эксперимента

Созданная нами ранее лабораторная установка для изучения интенсивности теплоотдачи была модернизирована, что позволило резко увеличить объем проводимых работ. В основу установки положен «альфа-калориметр», разработанный Г. М. Кондратьевым [14]. На основе регулярного режима целый ряд приборов и методов исследования теплотехнических свойств веществ [15].

Структурная схема используемого нами исследовательского комплекса приведена на рис. 1. Современные средства обработки и преобразования информации позволяют автоматизировать процедуру измерений. В качестве устройств сбора и обработки данных (УСО) применялись промышленные универсальные системы удаленного доступа фирмы

ICP DAS серии I-7000 с широкими возможностями по наращиванию как входных, так и выходных аналоговых и дискретных каналов, а также подключению внешних таймеров и других устройств контроля и управления.

Первоначально специализированное программное обеспечение было создано на базе Microsoft Visual Basic Application (VBA), с использованием Microsoft Excel. Была предусмотрена возможность перенастройки ПО под разные варианты построения комплекса с учетом конкретного комплекта применяемых УСО, временных характеристик и математической обработки, обусловленных техническими требованиями проведения исследований и обработки полученных данных. Причем программный продукт писался под «ключ», то есть со всеми необходимыми диалоговыми пользовательскими окнами и защитами от неправильных действий пользователя. Затем программное обеспечение было переработано под более универсальный язык C++. Структурная схема исследовательского комплекса показана на рис. 2.

Аппаратно-программный комплекс для автоматизации исследований по изучению теплопередачи образцов в вязких жидких и средах посредством измерения статических и динамических температурных характеристик состоит из следующих основных элементов. Персональный компьютер с подключением внешних устройств сбора данных в виде аналого-цифрового многоканального преобразователя (АЦП), присоединяемый по каналу RS-485 через конвертер интерфейсов RS-232 — RS-485. Для реализации задачи ввода данных о температуре образца и окружающей среды применялся 24 разрядный АЦП модели ICP I-7018R, с возможностью подключения до восьми датчиков. В качестве датчиков использовались

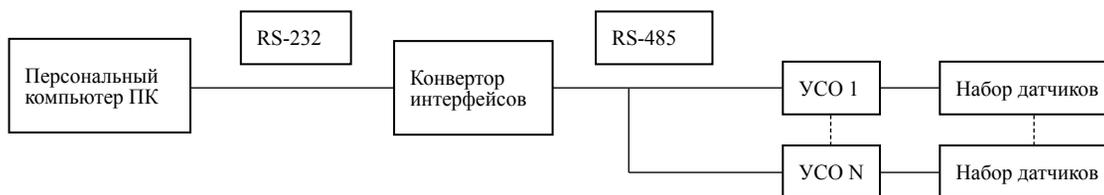


Рис. 1. Структурная схема исследовательского комплекса

Fig. 1. Schematic structure of research complex

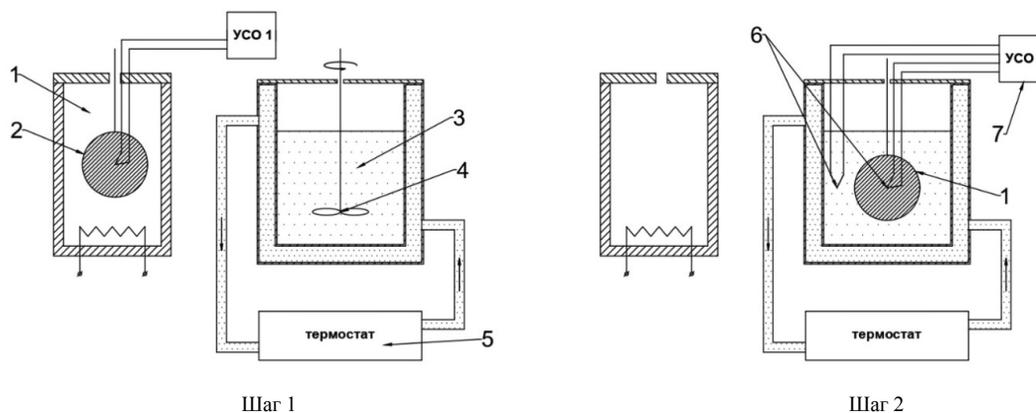


Рис. 2. Основные рабочие узлы экспериментальной установки: 1 — нагревательная камера; 2 — ядро; 3 — исследуемая жидкость; 4 — перемешивающее устройство; 5 — система термостатирования; 6 — датчики температуры (термопары); 7 — устройство сбора и обработки данных (УСО)

Fig. 2. Main working parts of the experimental unit: 1 — heating chamber; 2 — core; 3 — liquid under investigation; 4 — mixer; 5 — thermostating system; 6 — temperature sensors (thermocouples); 7 — data collection and processing unit

термопары хромель-алюмель тип К (возможный измеряемый диапазон температур от -270°C до 1372°C).

Процедуру отдельного измерения можно условно разделить на три шага: подготовительный, измерительный и вычислительный. Вначале в измерительный сосуд помещается исследуемая жидкость. Схема основных рабочих узлов экспериментальной установки показана на рис. 2. Системой термостатирования жидкость поддерживается при заданной температуре, с точностью $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. На подготовительном шаге для ускорения процедуры и максимально возможной равномерности температур внутри объема жидкости предусмотрена мешалка, которая далее на измерительной стадии не используется. В это же время, рабочее ядро помещается в нагревательную камеру, где его температура достигает заданной величины. Для обеспечения лучшей равномерности температурного поля внутри ядра, стимулировать нагревание не следует. Далее ядро извлекается из нагревательной камеры и после так называемой тепловой паузы, необходимой для выравнивания температур, помещается в исследуемую среду. Начинается вторая шаг — измерительный. Измеряется изменение перегрева ядра относительно температуры окружающей среды — исследуемой жидкости. После третьего шага — вычислительного, получается зависимость интенсивности теплоотдачи от исходных параметров и перегрева. Такая схема установки позволяет проводить исследования даже со взрывоопасными и пожароопасными жидкостями, какими, например являются масляные мисцеллы и при этом, хотя и косвенно использовать электрообогрев. Метод прост и практичен в реализации, с его помощью можно выполнить большой объем измерений.

Ключевой элемент схемы — ядро, представляющий собой шар из меди, форма которого обеспечивает минимальную поверхность при данном объеме. При всех прочих условиях время процесса или остывания будет максимальным. Медь дает лучшую равномерность температурного поля за счет высоких теплопроводящих свойств. Температура ядра измеряется с помощью термопары в одной точке, в которой она максимально соответствует среднеобъемной Глубина заделки термопары вычислена по формуле для неравномерности температурного поля из [14], и она составляет 0,28 величины радиуса шара

Вычислительная часть реализована по следующему алгоритму. В расчетной схеме из теории регулярного теплового режима принят экспоненциальный закон изменения перегрева ядра относительно исследуемой жидкости. Весь процесс с момента погружения ядра до его полного остывания разделяется на элементарные, малые промежутки времени, причем для каждого из них принимается постоянство коэффициента теплоотдачи. Исходя из этого, по измеренным значениям изменения перегрева, сначала вычисляется температура остывания с учетом неравномерности температурного поля. Затем по известным значениям теплофизических свойств ядра рассчитывается так называемый коэффициент теплоотдачи, который характеризует интенсивность теплообмена.

В процессе проведения измерений, сбора и обработки полученных данных возникал ряд дополнительных требований к программному обеспечению. К примеру,

при проведении качественного анализа сравнения данных различных экспериментов, выявилась насущная потребность в получении сравнительных графиков, представляемых в виде единых диаграмм. Программный продукт обладает процедурами и элементами управления, позволяющими непосредственно из программы осуществлять функцию экспорта необходимых диаграмм и таблиц в созданные файлы редактора Microsoft Word. Все это способствует ускорению процесса обработки в проведении больших серий экспериментов.

На этом комплексе был проведен ряд экспериментальных исследований для сред и веществ, взятых из различных стадий технологических процессов масложирового производства: масло растительное экстракционное, масло растительное прессовое, масло растительное рафинированное, мисцелла (раствор растительного масла в органическом растворителе). Также были исследованы образцы продуктов переработки: майонез, фритюрное масло. Были проведены опыты с так называемыми техническими материалами, получаемыми из растительных масел: глицерин, смазочно-охлаждающие жидкости СОЖ, мыло (мыльная основа).

Исследования проводились для диапазонов температур исследуемой среды, которые охватывают практические технологические режимы. Верхним пределом были температуры от 130°C до 190°C , хотя для некоторых образцов это могло быть ниже. Так как все исследуемые материалы термолабильны, ограничением были температуры, при которых в них происходят необратимые превращения. Соответственно нижним пределом температуры является минимальный тепловой напор, при котором можно надежно фиксировать тепловой поток.

Результаты и обсуждение

Для растительного масла проведена самая большая серия экспериментов, 16 образцов, жирнокислотный состав отдельных образцов представлен в табл. 1.

Данные по жирнокислотному составу образцов, представленные в табл. 1, были получены в соответствии с ГОСТ Р 51486–99, ГОСТ Р 51483–99 и ГОСТ 31663–2012

Таблица 1

Жирнокислотный состав образцов нерафинированного подсолнечного масла (относ.%)

Table 1

Fatty acids composition of unrefined sunflower oil samples (%)

Условное обозначение жирных кислот	Обр. № 1	Обр. № 2	Обр. № 3	Обр. № 5	Обр. № 14	Обр. № 15	Обр. № 16
C14:0	—	—	—	—	—	0,1	—
C16:0	6,5	6,2	6,1	6,0	6,1	6,2	6,1
C16:1	—	—	—	—	—	0,1	0,1
C18:0	2,3	2,9	2,5	3,1	3,0	3,3	3,0
C18:1	28,1	26,4	27,1	20,8	18,8	27,0	28,4
C18:2	62,5	64,3	63,6	69,1	70,1	61,2	61,2
C18:3	—	0,1	0,1	—	—	0,1	0,1
C20:0	0,3	0,2	0,4	0,2	0,3	0,3	0,3
C20:1	0,1	—	—	0,1	—	0,2	0,2
C22:0	0,2	0,4	0,2	0,7	1,3	0,6	0,7
C24:0	—	—	—	—	—	0,1	—

на газо-жидкостном хроматографе «Bruker-Scion 436 GS» с использованием капиллярной колонки BR — Swax (catal. # BR 89377) длиной 30 м, диаметром 0,25 мм и активной фазой на основе полиэтиленгликоля.

На рис. 3 представлен характерный график, выполненный по результатам расчетов экспериментальных данных на примере образца № 5, отражающий зависимость интенсивности теплоотдачи от теплового напора и температуры самого растительного масла.

Установлено, что зависимости носят ярко выраженный линейный характер, что упрощает использование полученных результатов на практике. Исследования по растительным маслам, в особенности для малых тепловых напоров интересны для построения расчетных соотношений при конструировании теплообменного оборудования в технологических процессах производства и переработки.

Проведены эксперименты для мисцеллы, состоящей из подсолнечного масла и органического растворителя, в качестве которого использовался гексан, результаты представлены на рис. 4. Область исследования захватывала фазовый переход — кипение мисцеллы для некоторых концентраций.

Для мисцеллы также полностью подтвердились данные, полученные ранее, при этом, для мисцелл концентрацией 25% характерен экстремум кривой, который отражает первую критическую точку кипения. Как правило, эта точка является границей перехода от пленочного к пузырьковому режиму кипения жидкости.

Эти данные могут быть полезны при построении теплового режима работы дистилляционного оборудования при экстракционном способе производства растительных масел. Так с помощью наших экспериментов можно подтвердить следующее: на первых ступенях дистилляции мисцеллы при низких концентрациях мисцеллы нецелесообразно увеличивать локальный и средний температурный напор выше 30–50 °С. Это приводит к излишнему расходу теплоносителя и перегреву масла, содержащегося в мисцелле. С другой стороны, при низких температурных напорах интенсивность теплоотдачи крайне невелика, так как основной механизм переноса теплоты в вязких жидкостях однозначно связан с температурными градиентами и массоперечай поэтому температурный напор должен быть не менее 10–15 °С.

Для майонеза, как особо вязкой среды, также отмечена область резкого изменения интенсивности отвода теплоты. Майонез был произведен в РФ по ГОСТ 31761–2012, с массовой долей жира 67%, температурный напор 17,4 °С. Результаты представлены на рис. 5. В литературных источниках также представлены данные по тепловым характеристикам эмульсионных продуктов [16].

Проведение экспериментов было затруднительным, т. к. при относительно высоких температурах в материале происходят структурные изменения составляющих. А при малых температурных напорах возрастает погрешность метода измерений. Приведенные результаты дают возможность оценить качественную картину, но пока не дают реального их применения. Майонез — это тонкодисперсный однородный эмульсионный продукт и процессы переноса в нем более сложны, чем в других исследуемых нами средах. Считаем возможным продолжить исследования.

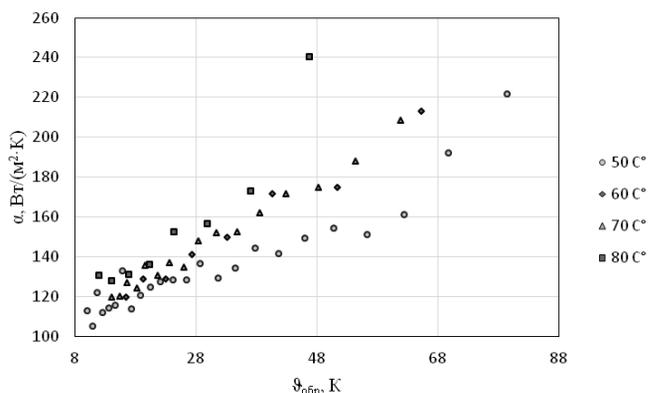


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от перегрева ядра в подсолнечном масле

Fig. 3. The dependence of heat transfer coefficient on the core overheating in sunflower oil

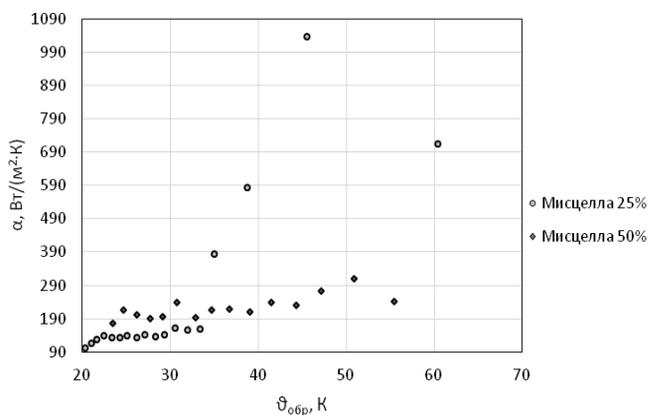


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи от перегрева ядра в мисцелле при условиях: 1 — концентрация мисцеллы 25% и температура 40 °С; 2 — концентрация 50% и температура 60 °С

Fig. 4. The dependence of heat transfer coefficient on the core overheating in miscella under: 1 — miscella concentration of 25% and temperature of 40 °С; 2 — miscella concentration of 50% and temperature of 60 °С

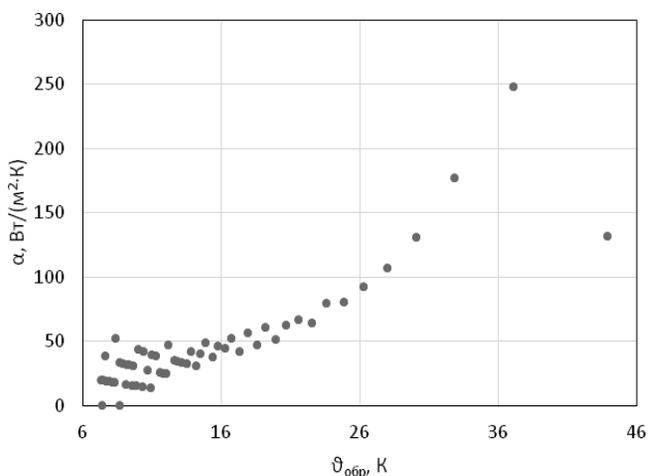


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплоотдачи от перегрева ядра в эмульсионном продукте (майонез)

Fig. 5. The dependence of heat transfer coefficient on the core overheating in emulsion (mayonnaise)

Таблица 2

Основные характеристики качества глицерина

Table 2

Main characteristics of glycerin quality

№	Показатели	Норматив	Испытание
1	Внешний вид раствора	Чистый	Чистый
2	Идентификация	Соответствует	Соответствует
3	Массовая доля основного вещества, %	99,8	99,83
4	Влажность, %	0,5	0,2
5	Жирные кислоты, %	0,025	0,0022
6	Cl, ppm	< 10	3,85
7	Цвет, Alpha	≤ 10	< 10
8	Остаток после сжигания, %	≤ 0,01	< 0,01
9	Сульфаты, %	≤ 0,002	< 0,002
10	Хлорированные соединения, %	≤ 0,003	< 0,003
11	Диэтиленгликоль, %	≤ 0,1	Отсутствует
12	Этиленгликоль, %	≤ 0,1	Отсутствует
13	Отдельные примеси, %	≤ 0,1	< 0,1
14	Общие примеси, %	≤ 1,0	< 1,0

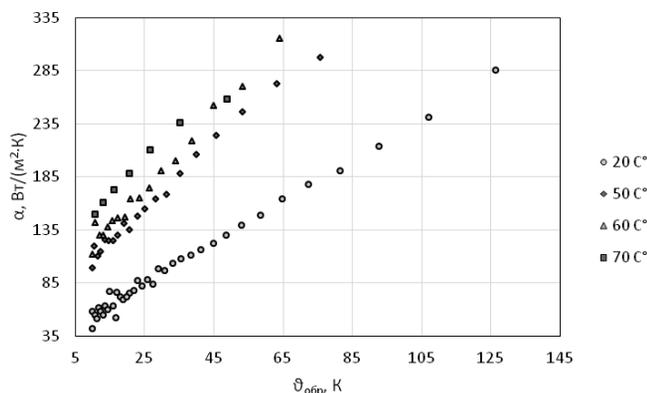


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплоотдачи от перегрева ядра в глицерине

Fig. 6. The dependence of heat transfer coefficient on the core overheating in glycerin

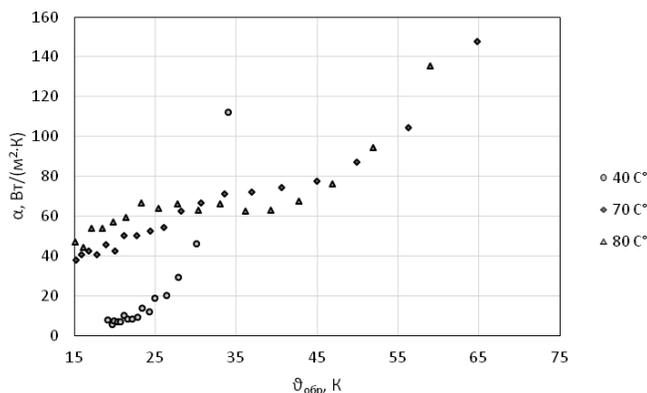


Рис. 7. Зависимость коэффициента теплоотдачи от перегрева ядра в мыльной основе

Fig. 7. The dependence of heat transfer coefficient on the core overheating in soap base

Кроме прямого пищевого применения, растительное масло используется для технических целей. Процессы теплообмена в этих жидкостях в технологических процессах существенно влияют на их энергоёмкость. На первом плане можно выделить глицерин, как продукт переработки растительного масла. Глицерин представляет интерес как теплопередающая среда. Показатели исследуемого образца представлены в табл. 2.

На графических зависимостях для глицерина, показанных на рис. 6, отмечена область интенсивного отвода теплоты, характерная для высоких значений температуры исследуемой среды.

Здесь основной характеристикой становится удельная плотность теплового потока. Интенсивность теплоотдачи достаточно высока и существенно зависят как от температуры стенки, теплового напора и температуры самой среды. Характер кривых линейный, аппроксимация таких кривых не вызывает затруднений и тенденции по теплоотдаче согласуются с данными, приведенными в публикации [17]. Полученные результаты могут использоваться не только в производстве, но и в лабораторной практике, там, где в качестве теплоносителя применяется глицерин или теплоносители на его основе.

Для мыла (мыльной основы) проведено большое количество экспериментов. Мыльная основа была получена с действующего производства в Санкт-Петербурге, на рис. 7 представлены результаты эксперимента. Установлены две области с резким изменением — «изломом» кривой. Имеется две критические точки. По нашему мнению, при одной из них — при температуре около 100 °C внутри среды происходит фазовый переход воды, а при другой, возможно, структурное перестроение самой мыльной основы. Для подтверждения выводов требуются дальнейшие исследования с использованием современной аналитической техники. Полученные в настоящее время данные уже могут использоваться при расчете режимных параметров оборудования для производства моющих средств.

Есть еще значительная группа технических продуктов, в которые в том или ином виде входят продукты переработки растительных масел. Это смазывающие и охлаждающие жидкости. Проведены эксперименты со смазывающей охлаждающей жидкостью, имеющей следующие характеристики в табл. 3.

Для этих жидкостей, в соответствии с их предназначением, характерны высокие коэффициенты теплоотдачи, поэтому потребовалось внести изменения в конструкцию датчика-образца, а именно изменение его формы и размеров, для того чтобы обеспечить значительно большее начальное теплосодержание. Расчеты показали, что диаметр должен быть не менее 50 мм, а масса — не менее 1 кг. Такой образец был изготовлен из меди. Форма — шар, диаметр 65 мм. Проведены новые серии экспериментов, результат представлен на рис. 8.

Данные адекватно согласуются с результатами, проводимыми другими исследователями для аналогичных жидкостей, в частности в монографии [18]. Имеется ярко выраженная критическая область, причем при увеличении концентрации происходит ее смещение в область более высоких температур. Результаты могут использоваться при разработке рецептур новых и специализированных смазывающих охлаждающих жидкостей.

Таблица 3

Основные характеристики качества смазывающей охлаждающей жидкости (Модус-М)

Table 3

Main characteristics of coolant lubricant quality (Modus-M)

№	Показатели	Норматив	Испытание
Концентрат			
1	Внешний вид	Однородная маслянистая жидкость от коричневого до темно-коричневого цвета	Однородная маслянистая жидкость коричневого цвета
2	Запах	Специфический, не раздражающий	Специфический, не раздражающий
3	Плотность при 20 °С, кг/м ³	900–1000	919
4	Содержание воды, %, не более	7	2,6
5	Кислотное число, мг КОН/г, не более	30	6,8
6	Стабильность при низких температурах (–50 °С)	Выдерживает	Выдерживает
3%-ный раствор			
7	Внешний вид	Жидкость молочного цвета	Жидкость молочного цвета
8	Водородный показатель, рН	8,5–10,0	9,4
9	Склонность к пенообразованию, см ³ , не более	650	560
10	Устойчивость пены, см ³ , не более	420	0
11	Коррозионная агрессивность по отношению к черным металлам	Выдерживает	Выдерживает
12	Скорость эмульгирования (объем самопроизвольно незаэмульгированного продукта из 100 см ³), см ³ , не более	45	Следы
13	Влияние жесткой воды	Выдерживает	Выдерживает

Заключение

Примененный нами метод исследования позволяет получить качественные зависимости, по которым представляется возможность установления функциональной связи между параметрами жидкости и условиями теплообмена. Причем, наиболее удобную форму имеют так называемые относительные величины. Полученные данные мы называем коэффициентами теплоотдачи, какowymi они и являются, но эти значения коэффициентов теплоотдачи напрямую не могут использоваться для расчетов оборудования, т. к. они получены для существенно нестационарных тепловых условий. А на производстве имеют место в основном стационарные тепловые процессы, нестационарные наблюдаются при пуске и остановке оборудования.

Проведенные нами исследования показали возможность изучения процесса теплоотдачи в однофазных, двухфазных средах, включая область фазового перехода. Кроме того, исследуемое растительное масло в отдельных опытах содержало твердые частицы — остатки ядра масличного материала, мыльная основа тоже имела твердые вкрапления. Поэтому можно констатировать, что в опытах исследовались многофазные среды. В принципе, делались попытки расширить исследования и на сыпучие материалы. Но это направление отдельного исследования.

Всего было проведено около двухсот экспериментов. Мы приводим лишь часть из них, наиболее характерных для каждой группы продуктов. Получены результаты в виде графических зависимостей коэффициентов теплоотдачи от теплового напора, которые с успехом могут использоваться при оценке технологических режимов и создании нового оборудования, а именно: при расчете геометрии и площадей поверхностей теплообмена; при

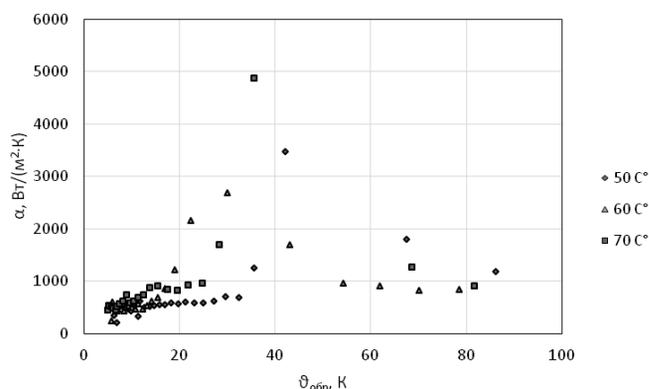


Рис. 8. Зависимость коэффициента теплоотдачи от перегрева ядра в смазывающей охлаждающей жидкости

Fig. 8. The dependence of heat transfer coefficient on the core overheating in coolant lubricant

изменении температурного режима обработки материала; при изменении фазового состава обрабатываемого материала; при составлении рецептур новых продуктов; при определении истинного энергопотребления агрегатов и эффективности работы.

Рациональное построение технологического процесса обязательно должно содержать комплекс мер по энергосбережению. В условиях нарастающего энергетического дефицита, вызванного бурным развитием всех сфер нашей жизни и одновременным сдержанным ростом производства энергии, внедрение энергосберегающих технологий в таких энергоемких отраслях, как пищевая, может, безусловно, повысить конкурентоспособность производств.

Литература

References

1. Гинзбург А. С., Громов М. А., Красовская Г. И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов: справочник. М.: Агропромиздат, 1990. 287 с.
2. Остриков А. Н., Горбатова А. В., Копылов М. В., Аникин А. А. Анализ теплофизических характеристик рапсового масла // ТП ПП АПК. 2017. № 5 (19).
3. Юсупов Ш. Т., Тагоев С. А., Сафаров М. М. Влияние растворителей на поведение теплопроводности и теплоемкости хлопкового масла в широком интервале температур и давлений / Под ред. А. Г. Шашкова. Душанбе, 2007. 91 с.
4. О'Брайен Р. Жиры и масла. Производства, состав и свойства, применение 2-го изд. / Пер. с англ. Широкова В. Д., Бабейкиной Д. А., Селивановой Н. С., Магды Н. В. СПб.: Профессия, 2007. 752 с.
5. Сафаров М. М. Теплофизические свойства растительных масел / М. М. Сафаров, Ш. Т. Юсупов, М. А. Зарипова, С. А. Тагоев. Душанбе, 2002. 80 с.
6. Suresh Babu Valeru, P. Nageswara Rao, K. N. S. Suman. Optimization of Vegetable Oil Properties in Machining Environment through CFD. // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). 2019, Vol. 8 Is. 12, p. 644–649.
7. Cruz-Forero D., González O., López L. Calculation of thermophysical properties of oils and triacylglycerols using an extended constituent fragments approach CT&F. // Ciencia, Tecnología y Futuro. 2012. Vol. 5 No. 1. P. 67–82.
8. Edwin E. Garcia Rojas, Jane S. R. Coimbra & Javier Telis-Romeiro. Thermophysical properties of cotton, canola, sunflower and soybean oils as a function of temperature. // International Journal of Food Properties. 2013. 16:7. 1620–1629. DOI: 10.1080/10942912.2011.604889
9. Sonkamble. A. A., Sonsale. R. P., Kanshette, M. S. et al. Relaxation dynamics and thermophysical properties of vegetable oils using time-domain reflectometry. // J. Eur. Biophys. 2017. Vol. 46, 283–291.
10. Rodrigues A. R., Paiva A., Marco Gomes da Silva, Simões P., Barreiros S. Continuous enzymatic production of biodiesel from virgin and waste sunflower oil in supercritical carbon dioxide. // Journal of Supercritical Fluids. 2001, V. 20, pp. 245–255.
11. Saleem M., Hossain M. A., Suvash C. Saha, Gu Y. T. Heat transfer analysis of viscous incompressible fluid by combined natural convection and radiation in an open cavity. // Mathematical Problems in Engineering. 2014. vol. 412480. <https://doi.org/10.1155/2014/412480>
12. Ван В., Makeev А. Н. Анализ пассивных методов интенсификации теплопередачи для жидкостей высокой вязкости. // Бюллетень науки и практики. Технические науки. 2018. Т. 4. No 3.
13. Баранов И. В., Федоров А. В., Новоселов А. Г., Тамбулатова Е. В., Крылов В. А., Федоров А. А., Волков С. М. Исследование взаимосвязи реологических и теплофизических свойств подсолнечных масел с их структурой // V МНТК «Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ». 23–24 мая 2019 г.: материалы конференции. СПб.: Университет ИТМО, 2019. С. 79–81.
14. Кондратьев Г. М. Тепловые измерения: уч. пособие для вузов. М.-Л: Mashgiz, 1957. 244 с.
15. Платунов Е. С. Теплофизические измерения и приборы. Л.: Машиностроение, 1986. 256 с.
16. Юдина И. Ю., Кременевская М. И., Трапезникова А. С., Глазова, А. Э., Долгих К. И. Создание и исследование ряда пла-
1. Ginzburg A. C., Gromov M. A., Krasovskaya G. I. Thermophysical characteristics of food products: Handbook. Moscow, Agropromizdat, 1990. 287 p. (in Russian)
2. Ostrikov A. N., Gorbatova A. V., Kopylov M. V., Anikin A. A. Analysis of thermophysical characteristics of rapeseed oil. *Technologies of the food and processing industry of Agro-industrial complex*. 2017. No 5 (19). (in Russian)
3. Yusupov Sh. T., Tagoev S. A., Safarov M. M. influence of solvents on the behavior of thermal conductivity and heat capacity of cottonseed oil in a wide range of temperatures and pressures / ed. by A. G. Shashkov. Dushanbe, 2007. 91 p. (in Russian)
4. O'Brien R. Fats and oils. Production, composition and properties, application of the 2nd ed. Shirokova V. D., Babeikina D. A., Selivanova N. S., Magda N. V. SPb. Profession, 2007. 752 p. (in Russian)
5. Safarov M. M. Thermophysical properties of vegetable oils / M. M. Safarov, Sh. T. Yusupov, M. A. Zaripova, S. A. Tagoev. Dushanbe, 2002. 80 p. (in Russian)
6. Suresh Babu Valeru, P. Nageswara Rao, K. N. S. Suman. Optimization of Vegetable Oil Properties in Machining Environment through CFD. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 2019, Vol. 8 Is. 12, p. 644–649.
7. Cruz-Forero D., González O., López L. Calculation of thermophysical properties of oils and triacylglycerols using an extended constituent fragments approach CT&F. *Ciencia, Tecnología y Futuro*. 2012. Vol. 5 No. 1. P. 67–82.
8. Edwin E. Garcia Rojas, Jane S. R. Coimbra & Javier Telis-Romeiro. Thermophysical properties of cotton, canola, sunflower and soybean oils as a function of temperature. // International Journal of Food Properties. 2013. 16:7. 1620–1629. DOI: 10.1080/10942912.2011.604889
9. Sonkamble A. A., Sonsale R. P., Kanshette M. S. et al. Relaxation dynamics and thermophysical properties of vegetable oils using time-domain reflectometry. *J. Eur. Biophys*. 2017. Vol. 46, 283–291.
10. Rodrigues A. R., Paiva A., Marco Gomes da Silva, Simões P., Barreiros S. Continuous enzymatic production of biodiesel from virgin and waste sunflower oil in supercritical carbon dioxide. *Journal of Supercritical Fluids*. 2001, V. 20, pp. 245–255.
11. Saleem M., Hossain M. A., Suvash C. Saha, Gu Y. T. Heat transfer analysis of viscous incompressible fluid by combined natural convection and radiation in an open cavity. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014. vol. 412480. <https://doi.org/10.1155/2014/412480>
12. Van V., Makeev A. N. Analysis of passive methods of heat transfer intensification for high-viscosity liquids. *Bulletin of science and practice. Technical science*. 2018. Vol. 4. No 3. (in Russian)
13. Baranov I. V., Fedorov A. V., Novoselov A. G., Tambulatova E. V., Krylov V. A., Fedorov A. A., Volkov S. M. Investigation of the relationship of rheological and thermophysical properties of sunflower oils with their structure. *V ISTC «Modern methods and means of research of thermophysical properties of substances»*. May 23–24, 2019: proceedings of the conference. SPb.: ITMO University, 2019, Pp. 79–81. (in Russian)
14. Kondratiev G. M. Thermal measurements: textbook for universities. M–L: Mashgiz, 1957. 244 p. (in Russian)
15. Platunov E. C. Thermophysical measurement and devices. L: mechanical engineering, 1986. 256 p. (in Russian)
16. Yudina I. Yu., Kremenevskaya M. I., Trapeznikova A. S., Glazova A. E., Dolgikh K. I. Creation and research of a number of

- стических продуктов с добавлением модифицированного яичного белка. // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2017 (1):52–58.
17. Mohamed E. Ali. Free convection heat transfer from the outer surface of vertically oriented helical coils in Glycerol-Water solution. // *Heat and Mass Transfer*. 2004. vol. 40. No. 8. pp. 615–620.
18. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник / Под общ. ред. Л. В. Худобина. М.: Машиностроение, 2006. 544 с.
- plastic products with the addition of modified egg protein. *Scientific Journal of NRU ITMO. Series: Processes and devices of food production*. 2017 (1):52–58. (in Russian)
17. Mohamed E. Ali. Free convection heat transfer from the outer surface of vertically oriented helical coils in Glycerol-Water solution. *Heat and Mass Transfer*. 2004. vol. 40. No. 8. pp. 615–620.
18. Lubricating and cooling technological means and their application in cutting processing: Handbook / Under the General editorship of L. V. Khudobin. M.: Mechanical engineering, 2006. 544 p. (in Russian)

Сведения об авторах

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

Баранов Игорь Владимирович

Д. т. н., профессор, директор мегафакультета биотехнологий
и низкотемпературных систем Университета ИТМО, 191002,
Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, ivbaranov@itmo.ru,
ORCID ID 0000-0003-0595-368X

Волков Сергей Михайлович

К. х. н., старший научный сотрудник Всероссийского
научно-исследовательского института жиров, 191119,
Санкт-Петербург, ул. Черняховского, 10,
volkovsm@vniig.org

Тагиев Шафи Камильевич

Заведующий лабораторией А и ВТ Всероссийского
научно-исследовательского института жиров, 191119,
Санкт-Петербург, ул. Черняховского, 10, labvt@vniig.org,
ORCID ID 0000-0001-6938-0687

Ефимов Андрей Владимирович

Ведущий инженер лаборатории А и ВТ Всероссийского
научно-исследовательского института жиров, 191119,
Санкт-Петербург, ул. Черняховского, 10, efimov@vniig.org,
ORCID ID 0000-0003-1137-3665

Романов Николай Николаевич

К. т. н., доцент, Санкт-Петербургского университета
государственной противопожарной службы МЧС России,
191245, Санкт-Петербург, Московский пр. 149,
nik57nik@mail.ru, ORCID ID 0000-0001-8254-9424

Федоров Алексей Александрович

Аспирант факультета биотехнологий Университета ИТМО,
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9,
alex2829735@yandex.ru, ORCID ID 0000-0003-3860-7708

Симонова Марина Александровна

К. т. н., доцент, доцент Высшей школы техносферной
безопасности Инженерно-строительного института,
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург,
Политехническая улица, 29, masima82@inbox.ru,
ORCID ID 0000-0003-2716-0349

Information about authors

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

Baranov Igor V.

D. Sc., Professor, Director of the mega Faculty of biotechnologies
and low-temperature systems of ITMO University, Russia,
191002, St. Petersburg, Lomonosova St. 9, ivbaranov@itmo.ru,
ORCID ID 0000-0003-0595-368X

Volkov Sergey M.

Ph. D., Senior researcher of All-Russian research
Institute of fats, Russia, 191002,
St. Petersburg, Chernyakhovsky St. 10,
volkovsm@vniig.org

Tagiev Shafi K.

Head of the laboratory Automation and computer engineering. All-
Russian research Institute of fats, Russia, 191002,
St. Petersburg, Chernyakhovsky St. 10, labvt@vniig.org,
ORCID ID 0000-0001-6938-0687

Efimov Andrey V.

Principal engineer of the laboratory Automation and computer
engineering. All-Russian research Institute of fats, Russia, 191002,
St. Petersburg, Chernyakhovsky St. 10, efimov@vniig.org,
ORCID ID 0000-0003-1137-3665

Romanov Nikolay N.

Ph. D., Associate Professor, Associate Professor of the Saint-
Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia,
Russia, 191245, St. Petersburg, Moskovsky Pr. 149,
nik57nik@mail.ru, ORCID ID 0000-0001-8254-9424

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

Simonova Marina A.

Ph. D., Associate Professor, Associate Professor
of the Higher school of technosphere safety of the Institute
of civil Engineering, Peter the Great Saint Petersburg
Polytechnic University, Russia, 195251, St. Petersburg,
Politechnicheskaya St. 29, masima82@inbox.ru,
ORCID ID 0000-0003-2716-0349