

Научная статья

УДК 66.098.4

DOI: 10.17586/2310-1164-2023-16-4-3-13

**Процессы молекулярного переноса в жидкостных питательных средах
дрожжевой и пивной отраслях промышленности.
Часть 3. Исследование теплофизических свойств водных растворов мелассы
и концентрата пивного суслу**

А.Г. Новоселов*, А.Ю. Логинов, И.В. Баранов, А.В. Чеботарь, С.А. Сорокин

*Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург
dekrosh@mail.ru

Аннотация. Исследовали теплофизические свойства водных растворов мелассы и концентрата пивного суслу с различным содержанием массы сухих веществ в широком диапазоне изменения температуры. Объектами изучения стали семь образцов водного раствора свекловичной мелассы с исходной концентрацией сухих веществ 77,7 масс.% и семь образцов концентрата пивного суслу с исходной концентрацией сухих веществ 81 масс.%. Диапазон изменения температуры составлял 10–70°C с дискретностью 10°C. Методами нестационарного плоского источника и дифференциальной сканирующей калориметрии определяли теплопроводность, удельную теплоемкость и температуропроводность исходных растворов. Экспериментально установлены численные значения перечисленных тепловых констант водных растворов свекловичной мелассы в диапазоне концентраций масс сухих веществ n от 16 до 70% при температурах от 293 до 353 К, и концентрата пивного суслу в диапазоне концентраций масс сухих веществ n от 10,2 до 72,4% при температурах 284–342 К. Приведены графические зависимости теплоемкости, теплопроводности и температуропроводности данных объектов исследований от температуры. Получены расчетные уравнения искомых показателей, представляющие интерес как с точки зрения фундаментальной науки о развитии теории жидкого состояния вещества, так и прикладной с позиций инженерных расчетов и проектирования биотехнологического оборудования.

Ключевые слова: аэробные процессы; теплофизические свойства; водный раствор мелассы; концентрат пивного суслу; теплопроводность; теплоемкость; температуропроводность

Original article

**Molecular transport processes in liquid nutrient media of yeast and beer industries.
Part 3. Thermophysical properties of aqueous solutions of beet molasses and beer
wort concentrate**

Alexander G. Novoselov*, Andrey Yu. Loginov, Igor V. Baranov, Anastasiia V. Chebotar, Sergey A. Sorokin

*ITMO University, St. Petersburg, Russia
dekrosh@mail.ru

Abstract. Thermophysical properties of aqueous solutions of molasses and beer wort concentrate with different dry matter content in a wide range of temperature changes were investigated. Seven samples of aqueous solution of beet molasses with an initial dry matter concentration of 77.7 wt.% and seven samples of beer wort concentrate with an initial dry matter concentration of 81 wt.% were studied. The temperature variation range was 10–70°C with a discreteness of 10°C. Thermal conductivity, specific heat capacity, and thermal diffusivity of the initial solutions were determined by unsteady plane source and differential scanning calorimetry methods. Numerical values of the above-mentioned thermal constants for aqueous solutions of beet molasses in the range of dry matter mass concentrations n of from 16 to 70% at the temperatures of from 293 to 353 K and of beer wort concentrate in the range of dry matter mass concentrations of from 10.2 to 72.4% at temperatures from 284 to 342 K have been experimentally established. Graphical dependences of heat capacity, thermal conductivity, and thermal diffusivity of these parameters on temperature are given. Design equations of the required parameters are obtained, which are of interest both from the point of view of fundamental science on the development of the theory for liquid state of matter, and from the applied point of view of engineering calculations and design of biotechnological equipment.

Keywords: aerobic processes; thermophysical properties; molasses aqueous solution; beer wort concentrate; thermal conductivity; heat capacity; thermal diffusivity

Введение

Продолжая серию публикаций, посвященных комплексному изучению процессов переноса импульса, тепловой энергии и массы в питательных средах биотехнологических производств, в этой части представлены исследования теплофизических свойств водных растворов свекловичной мелассы и концентрата пивного сусла.

Ранее авторы [1] обосновали необходимость проведения данных изысканий и представили экспериментальные результаты оценки одной из важнейших динамических характеристик – плотности. Полученные данные позволили связать технологический параметр, характеризующий содержание сухих веществ в водных растворах мелассы, а также водных растворов концентрата пивного сусла с физическим параметром, определяющим массу сухих веществ (СВ), находящихся в единице объема водного раствора, т. е. с плотностью ρ . Сопоставление численных значений плотности водных растворов мелассы и концентрата пивного сусла при сравнимых величинах содержания СВ в них показало совпадение. Это позволило идентифицировать растворы мелассы и концентрата пивного сусла, несмотря на то что оба эти продукта производятся из разного исходного сырья: меласса является отходом сахарного производства, а пивное сусло – полуфабрикатом в процессе получения пивной продукции из зернового сырья.

Для более объективного подхода к развитию теории жидкого состояния вещества и прогнозирования его физических свойств экспериментально были получены значения коэффициентов динамической и кинематической вязкости для широкого ряда температур и концентраций сухих веществ в исследуемых водных растворах, которые представлены в работе [2]. Особенность реологического поведения обоих объектов исследования заключается в том, что при скоростях сдвига менее 100 c^{-1} растворы проявляют псевдопластичные свойства, а при скоростях сдвига более 100 c^{-1} ведут себя как ньютоновские жидкости. В нашем случае важным является тот факт, что такое поведение характерно для обоих объектов исследования и косвенно подтверждает идентичность данных объектов.

В контексте изучения теплофизических свойств водных растворов свекловичной мелассы и концентрата пивного сусла важно подчеркнуть, что эти данные имеют высокую актуальность для промышленности. Эти исследования направлены на более глубокое понимание процессов молекулярного переноса в жидкостных питательных средах, которые являются ключевыми в биотехнологической промышленности [3]. Процессы передачи тепла и массы в таких средах имеют непосредственное влияние на качество и эффективность производства. Понимание взаимосвязи между температурой, концентрацией сухих веществ и теплофизическими характеристиками этих растворов содействует разработке более эффективных методов нагрева и охлаждения в промышленных производствах.

Цель данной работы – изучить теплофизические свойства водных растворов мелассы и концентрата пивного сусла в широком диапазоне изменения содержания растворимых сухих веществ и температуры. Результаты этих измерений позволят косвенно уточнить химический состав исследуемых жидкостей и, как следствие, идентичность их теплофизических свойств, проявляющихся в условиях термического воздействия на них в зависимости от изменения температуры [4].

Объекты исследований

Объектами исследований, как и предыдущих работах [1, 2], являлись водные растворы свекловичной мелассы (образцы с содержанием СВ 16,2; 32,5; 40,2; 51,9; 60,2; 69,9 масс.%, включая концентрацию исходного объекта 77,7 масс.%) и концентрата пивного сусла (образцы с содержанием СВ 10,2; 20,6; 30,1; 40,3; 50,1; 59,6; 72,4; 81 масс.%, где 81 масс.% являлась начальной). Диапазон изменения температур составил для обоих объектов исследования от 10 до 70°C с дискретностью 10°C .

Методика проведения эксперимента

Предварительно образец свекловичной мелассы нужной концентрации хранился в стерильном контейнере при температуре $+2^\circ\text{C}$. Перед началом эксперимента образец извлекался из контейнера стерильным шприцом объемом 5 мл и нагревался до комнатной температуры. Затем образец помещался в нижнюю часть измерительной ячейки из тефлона, которая устанавливалась на термостатическую платформу с уже закрепленным сенсором Kipton 7577 F1 в специальном держателе.

Сенсор устанавливался так, чтобы его спираль оказалась в центре нижней части измерительной ячейки. Обе части ячейки герметично соединялись двумя винтами, чтобы избежать смещения, и образовывали закрытый объем. Оставшийся объем образца вводился через одно отверстие в верхней части ячейки, выталкивая воздух через другое отверстие. Таким образом, измерительная спираль сенсора располагалась точно посередине образца.

Готовая измерительная ячейка накрывалась теплоизоляционным куполом согласно инструкции термостатической платформы для исключения теплотерь. После этого на платформе выставлялась необходимая температура измерения, и измерительная ячейка нагревалась печью или охлаждалась термоэлектрическим охладителем до заданной температуры. В процессе термостатирования измерительная ячейка с образцом проходит два этапа стабилизации температуры (рисунок 1). Сначала температура печи или термоэлектрического охладителя должна находиться в допустимом диапазоне колебаний температуры $\pm 0,5^\circ\text{C}$ в течение заданного времени стабилизации (30 мин) [5]. Затем перепад температур образца должен находиться в допустимом диапазоне отклонений температуры $0,5^\circ\text{C}$ для такого же времени стабилизации. Таким образом, после достижения требуемых значений температур можно проводить измерение теплофизических свойств образца при целевой температуре.

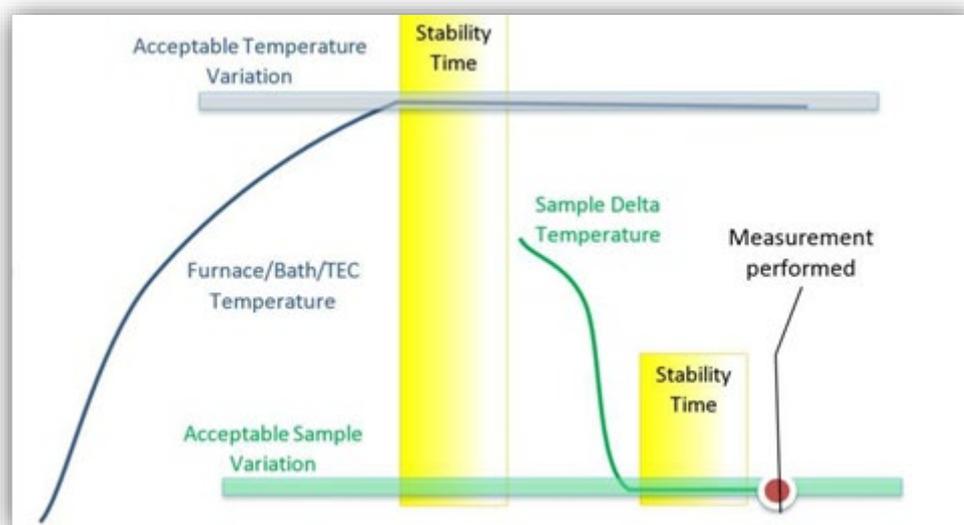


Рисунок 1 – Настройка стабильности температуры
Figure 1. Setting the temperature stability

Измерения образцов проводились в пределах температур от 20 до 80°C с интервалом в 10° . Перед каждым экспериментом определялись оптимальные значения времени измерения и мощности нагрева, влияющие на точность получаемых данных. Длительность измерений напрямую зависела от температуропроводности образца и глубины зондирования, которая не должна была превышать размеры ячейки, чтобы не исказить изотропность [6].

Тепловая мощность, подаваемая на датчик во время измерений, была постоянной и регулировалась таким образом, чтобы температура повышалась на 2–5 К. После установки параметров эксперимента температура образца стабилизировалась в течение 10 мин.

Каждый из экспериментов при определенной температуре включал в себя пять измерений, по результатам которых вычислялось среднее значение интересующих параметров. В ходе всего комплекса исследований были получены значения коэффициентов тепло- и температуропроводности образцов.

Для точности измерений коэффициента тепло- и температуропроводности на устройстве Hot Disc TPS 2500S (Швеция) требовались данные об объемной теплоемкости исследуемых образцов, которые подавались в соответствующее поле программного обеспечения анализатора тепловых констант. Объемная теплоемкость определялась на основе плотности образцов и их удельной теплоемкости, которая измерялась с использованием дифференциально-сканирующего калориметра Netzsch DSC-401F (Германия).

Образцы поместили в специальные алюминиевые тигли и разместили на рабочей ячейке прибора, после чего установили температурную программу с диапазоном нагрева от 5 до 95°C и скоростью нагрева 5 К/мин. Для калибровки использовали корундовый образец массой 50,9 мг. Полученные термограммы обработали при помощи программного обеспечения Netzsch Proteus®.

Результаты и обсуждение

Свекловичная меласса. В результате обработки экспериментальных данных были получены значения удельной теплоемкости водных растворов свекловичной мелассы, представленные на рисунке 2.

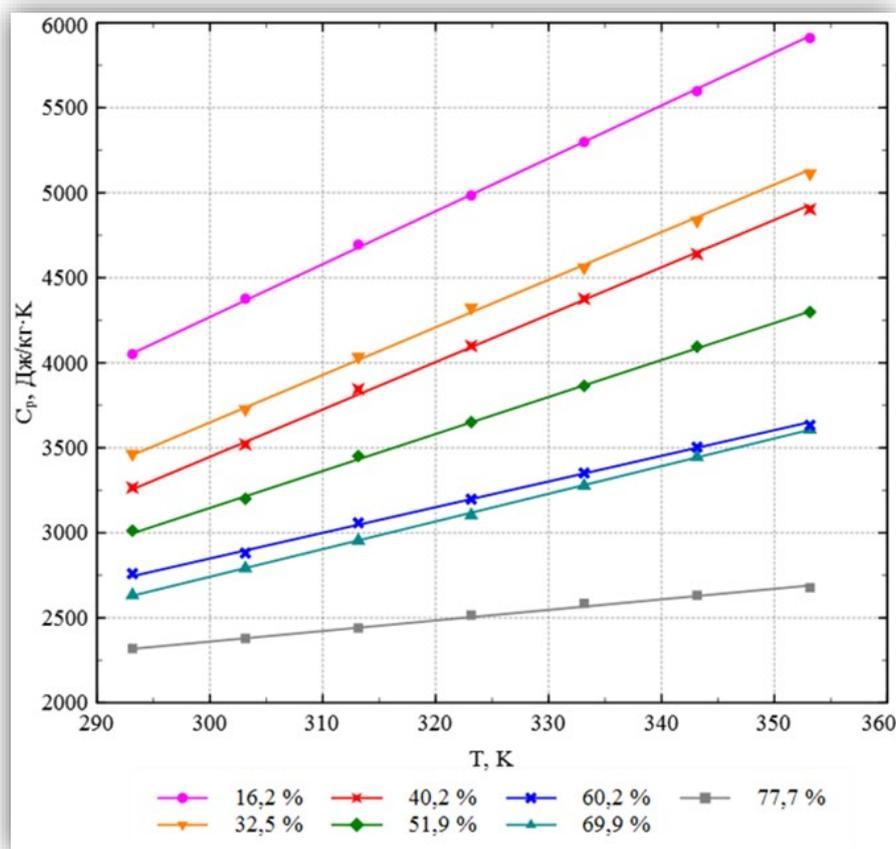


Рисунок 2 – Зависимость удельной теплоемкости водных растворов свекловичной мелассы от температуры при различном содержании сухих веществ

Figure 2. Dependence of specific heat capacity of beet molasse aqueous solutions on temperature at various dry matter content

Математическая обработка результатов измерений удельной теплоемкости водных растворов свекловичной мелассы в виде функциональной зависимости $C_p = f(n, T)$ позволила получить эмпирическое уравнение

$$C_p = 20,65 \cdot T - 38,24 \cdot n - 1077,8, \quad (1)$$

где T – температура, К;

n – содержание сухих веществ, масс. %.

Среднее относительное отклонение рассчитанных значений удельной теплоемкости по уравнению 1 от экспериментальных данных составляет $\pm 4,4\%$. Коэффициент корреляции Пирсона $r = 0,977$, что по шкале Чеддока говорит об установлении сильной взаимосвязи между переменными и не требует дополнительной статистической проверки полученного уравнения [7].

Дальнейшая обработка экспериментальных результатов позволила получить сводные таблицы данных по коэффициентам теплопроводности (λ , Вт/м·К) и температуропроводности (a , мм²/с). Средние значения, коэффициента теплопроводности в зависимости от температуры и концентрации сухих веществ, представлены в таблице.

Таблица. Коэффициенты теплопроводности водных растворов свекловичной мелассы
 Table. Thermal conductivity coefficients of aqueous solutions of beet molasses

Температура, К	Концентрация, %						
	16,2	32,5	40,2	51,9	60,2	69,9	77,7
293	0,5124	0,4884	0,4656	0,4385	0,4042	0,3699	0,3392
303	0,5057	0,4807	0,4529	0,4299	0,3979	0,3646	0,3450
313	0,4982	0,4685	0,4453	0,4241	0,3919	0,3592	0,3488
323	0,4936	0,4584	0,4320	0,4145	0,3859	0,3554	0,3502
333	0,4875	0,4515	0,4202	0,4067	0,3804	0,3506	0,3460
343	0,4785	0,4443	0,4096	0,3965	0,3753	0,3457	0,3406
353	0,4652	0,4281	0,4001	0,3866	0,3697	0,3398	0,3354

На рисунке 3 представлена графическая зависимость, отражающая данные таблицы.

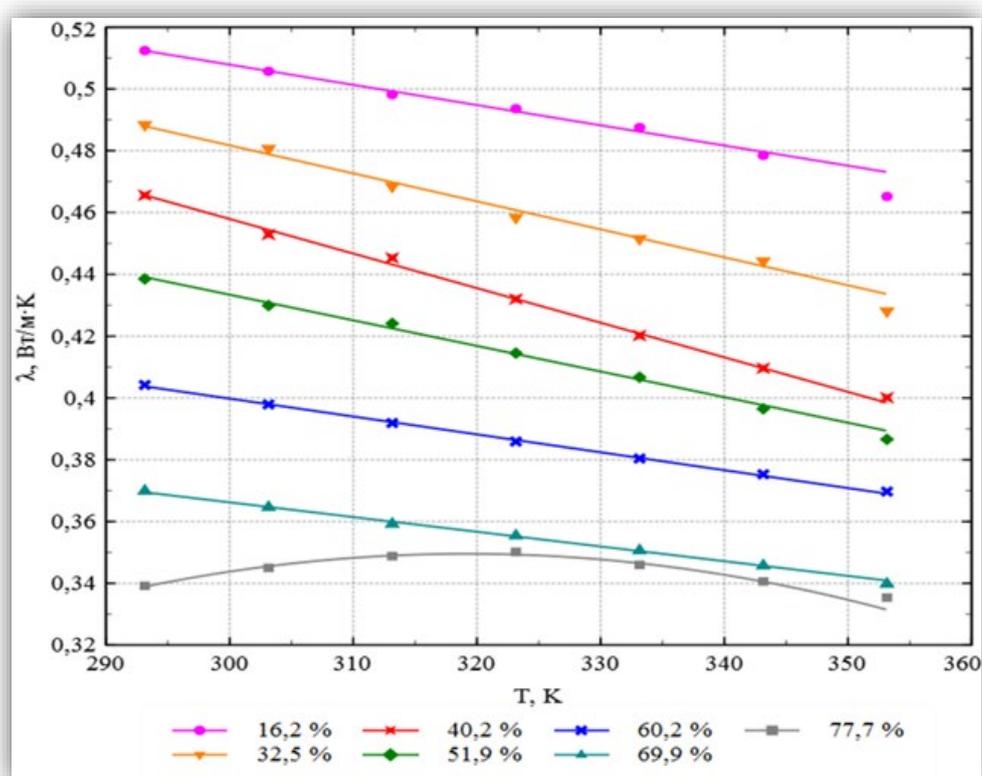


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента теплопроводности водных растворов свекловичной мелассы от температуры при различном содержании сухих веществ
 Figure 3. Dependence of thermal conductivity coefficient of beet molasses solutions on temperature at various dry matter content

Из графика видно, что при увеличении содержания сухих веществ в растворе коэффициент теплопроводности уменьшается, также наблюдается снижение этого коэффициента при повышении температуры. Это связано с тем, что при увеличении температуры возрастает кинетическая энергия молекул растворов мелассы, что приводит к росту амплитуды их колебаний. Однако при этом уменьшается плотность раствора и взаимодействие молекул жидкости между собой, что приводит к снижению теплопроводности [8].

Следует также отметить, что раствор с концентрацией 77,7% обладает особенной направленностью в теплопроводности. Это можно объяснить тем, что при низких температурах этот раствор имеет очень плотную консистенцию и ведет себя больше как твердое тело, чем как жидкость. Теплопроводность твердых тел, как правило, возрастает с увеличением температуры. Однако при нагреве

текучесть раствора увеличивается, и теплопроводность начинает проявлять свойства, характерные для жидкости [9].

Исходя из линейной зависимости, уравнение для расчета коэффициента теплопроводности раствора свекловичной мелассы можно представить следующим образом

$$\lambda = 0,791 - 7,871 \cdot 10^{-4} \cdot T - 2,513 \cdot 10^{-4} \cdot n, \tag{2}$$

где T – температура, К;

n – содержание сухих веществ, масс. %.

Уравнение (2) справедливо при значениях T от 293 до 353 К и n от 16 до 70%. Максимальное относительное отклонение составляет +4%. Коэффициент корреляции Пирсона $r = 0,99$, что говорит об установлении функциональной взаимосвязи между переменными.

Исследование показывает, что значения коэффициента температуропроводности, отображенные на рисунке 4, практически не зависят от концентрации раствора, но определенно связаны с изменением температуры: с увеличением температуры коэффициент температуропроводности уменьшается. После математической обработки данных было установлено, что наиболее точное описание полученных результатов обеспечивает экспоненциальная зависимость [10]. Это позволило получить следующее уравнение

$$a = 1,0344 \cdot e^{-0,00747 \cdot T}, \tag{3}$$

Формула (3) справедлива при значениях T от 293 до 353 К и n от 16 до 70%. Максимальное относительное отклонение составляет +10,4%. Коэффициент корреляции Пирсона $r = 0,96$, что говорит об установлении сильной взаимосвязи между переменными и не требует дополнительной статистической проверки полученного уравнения.

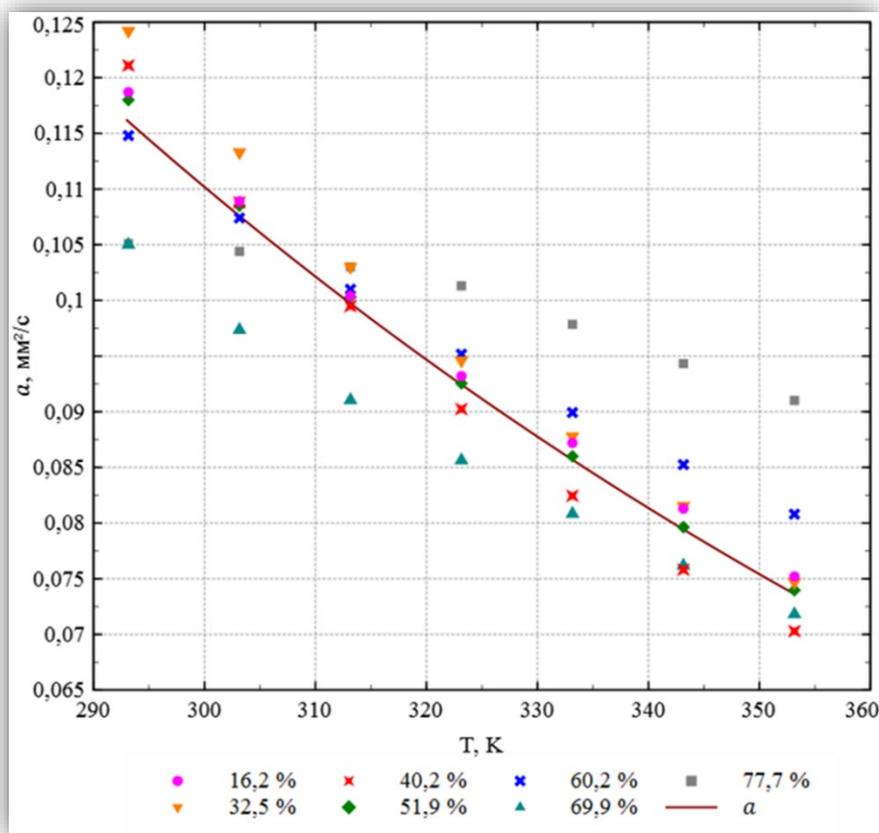


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента температуропроводности растворов свекловичной мелассы от температуры при различном содержании сухих веществ

Figure 4. Temperature dependence of thermal diffusivity coefficient of beet molasses solutions at various dry matter content

Пивное сусло. В результате теплофизических измерений были получены данные, позволившие построить графические зависимости удельной теплоемкости, а также коэффициентов теплопроводности и температуропроводности исследуемых образцов от температуры при различном содержании сухих веществ. Графическая зависимость удельной теплоемкости представлена на рисунке 5.

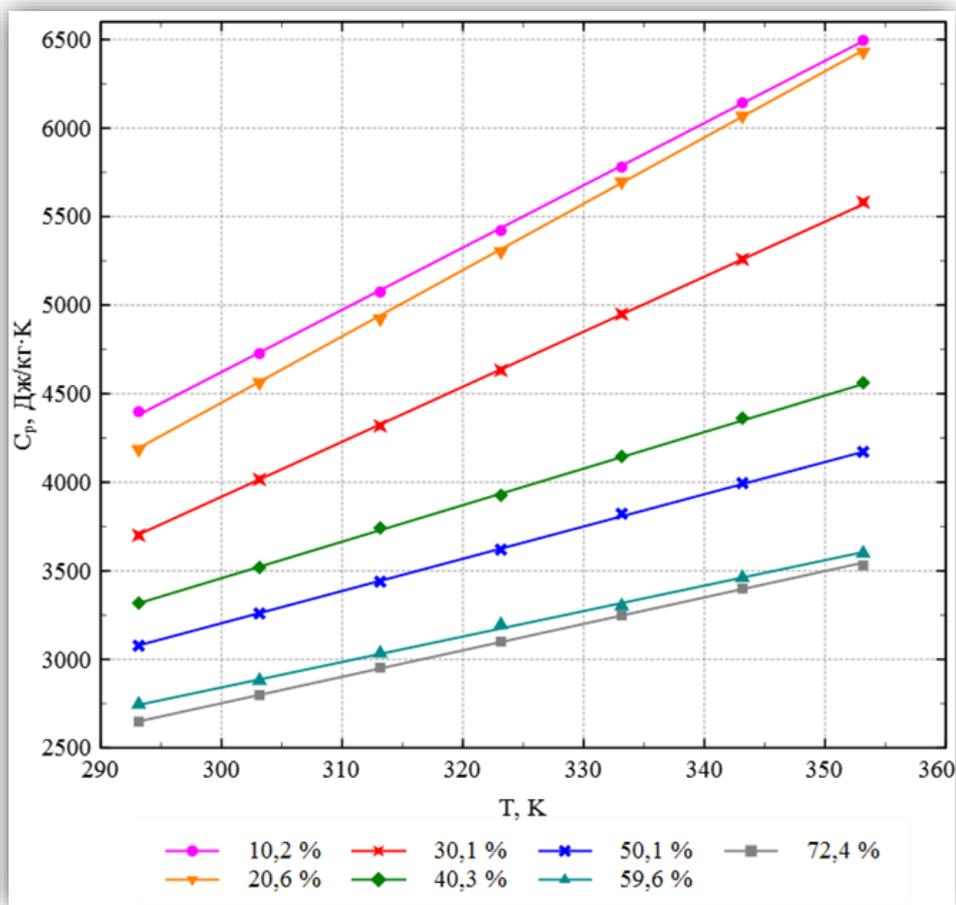


Рисунок 5 – Зависимость удельной теплоемкости водных растворов концентрата пивного сусла от температуры при различном содержании сухих веществ

Figure 5. Dependence of specific heat capacity of beer wort solutions on temperature at various dry matter content

Математическая обработка результатов измерений удельной теплоемкости водных растворов отфильтрованного пивного сусла, в виде функциональной зависимости $C_p = f(n, T)$ позволила получить уравнение

$$C_p = 24,59 \cdot T - 42,9 \cdot n - 2035,1, \tag{4}$$

где T – температура, К;

n – содержание сухих веществ, масс. %.

Среднее относительное отклонение рассчитанных значений удельной теплоемкости по уравнению (4) от экспериментальных данных и коэффициент корреляции Пирсона составили $\pm 5,5\%$ и $r = 0,066$ соответственно. Установлена тесная взаимосвязь между переменными, поэтому дополнительные статистические тесты не требуются.

На рисунке 6 изображена зависимость коэффициента теплопроводности (λ , Вт/м·К) от температуры отфильтрованного пивного сусла. По графику видно, что при повышении температуры теплопроводность раствора снижается. Это явление объясняется уменьшением плотности раствора, что характерно для жидкостей с постоянной молекулярной массой, таких как неассоциированные или слабо ассоциированные жидкости. Таким образом, с увеличением температуры и содержания сухих веществ, происходит снижение коэффициента теплопроводности из-за уменьшения межмолекулярных сил в жидкости [11, 12].

Также заметно, что изменения в теплопроводности демонстрируют линейный характер. Следовательно, полученное уравнение для расчета коэффициента теплопроводности представлено следующей математической зависимостью

$$\lambda = 0,689 - 5 \cdot 10^{-4} \cdot T - 1,94 \cdot 10^{-3} \cdot n, \tag{5}$$

где T – температура, К;

n – содержание сухих веществ, масс. %.

Уравнение (5) справедливо при значениях T от 293 до 353 К и n от 10,2 до 72,4%. Максимальное относительное отклонение формулы от экспериментальных данных составляет –2,3%. Коэффициент корреляции Пирсона $r = 0,992$, что говорит об установлении функциональной взаимосвязи между переменными [13].

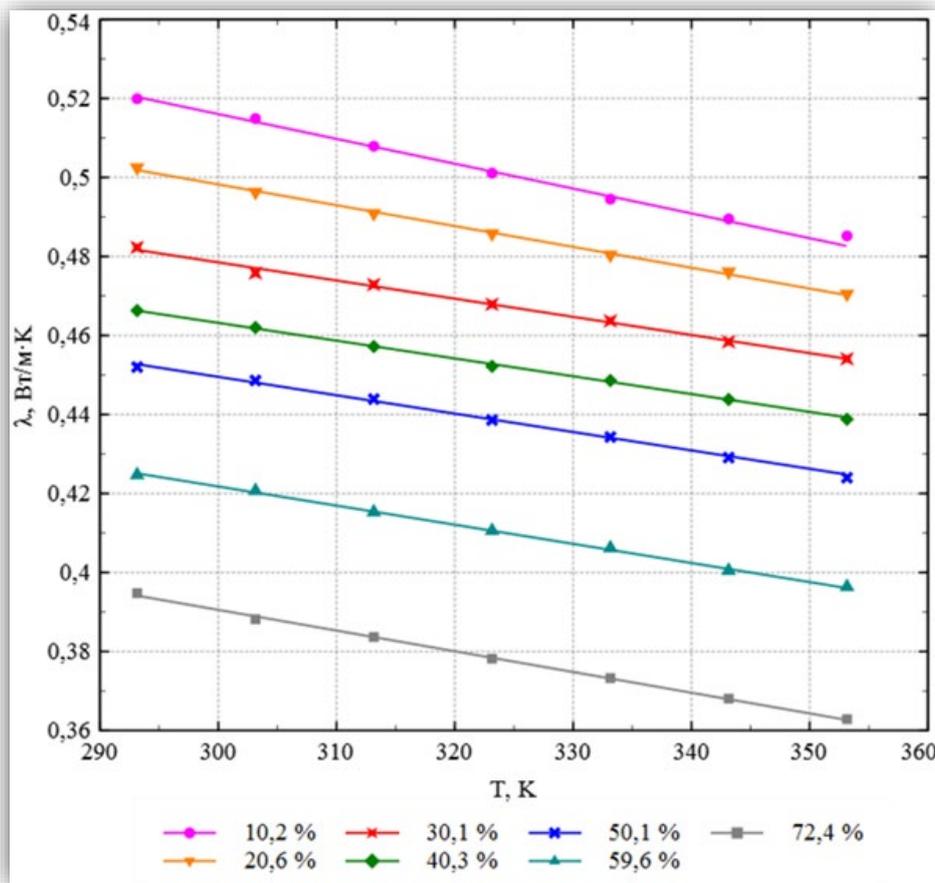


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента теплопроводности растворов отфильтрованного пивного сусле от температуры при различном содержании сухих веществ

Figure 6. Dependence of thermal conductivity coefficient of filtered beer wort solutions on temperature at various dry matter content

На рисунке 7 представлена зависимость коэффициента температуропроводности (a , мм²/с) отфильтрованного пивного сусле от концентрации сухих веществ и температуры. На графике видно, что температура существенно влияет на коэффициент температуропроводности, в то время как изменения в концентрации сухих веществ оказывают незначительное воздействие на этот коэффициент [14, 15]. Последующий анализ данных позволил вывести математическое выражение для расчета коэффициента температуропроводности

$$a = 0,7439 \cdot e^{-6,36 \cdot 10^{-3} \cdot T}. \tag{6}$$

Данная формула справедлива при значениях T от 293 до 353 К и n от 10,2 до 72,4%. Максимальное относительное отклонение составляет +13,1%. Коэффициент корреляции Пирсона $r = 0,907$, что по шкале Чеддока говорит об установлении весьма высокой взаимосвязи между переменными и не требует дополнительной статистической проверки полученного уравнения.

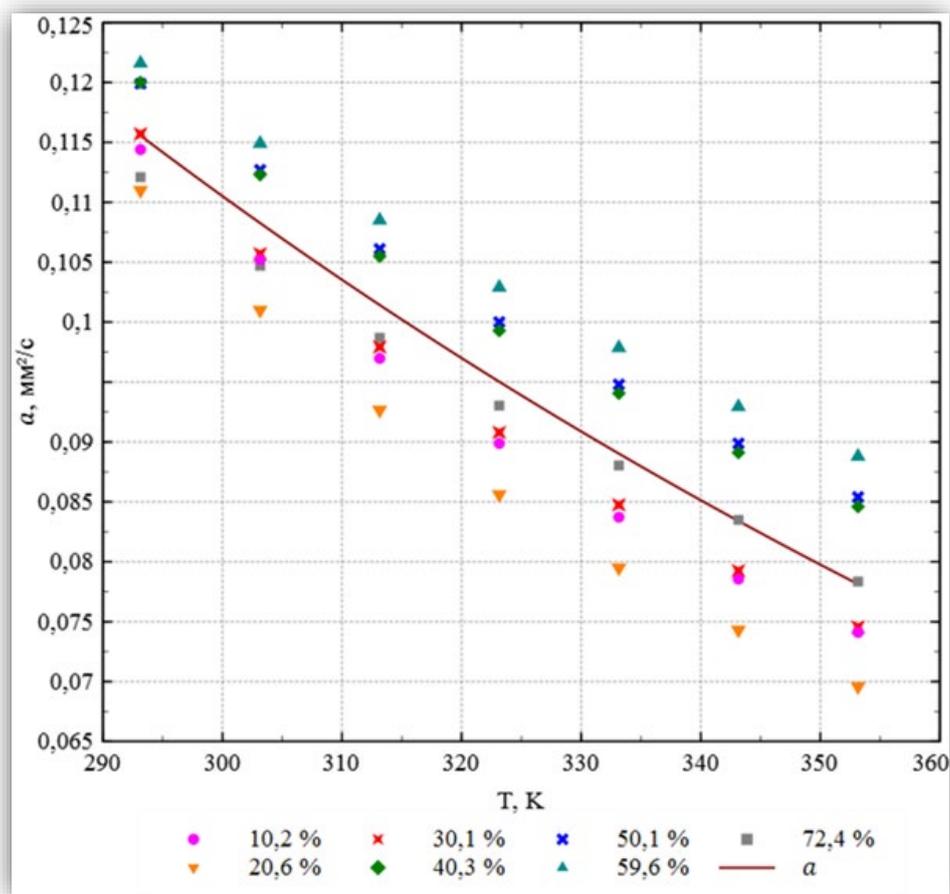


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента температуропроводности отфильтрованного пивного сусла от температуры при различном содержании сухих веществ

Figure 7. Temperature dependence of diffusivity coefficient of filtered beer wort at various dry matter content

Выводы

В ходе исследований было выявлено, что удельная теплоемкость обоих объектов возрастает при увеличении температуры и уменьшении содержания сухих веществ в образцах. Анализ зависимости коэффициентов температуропроводности от температуры растворов свекловичной мелассы и отфильтрованного пивного сусла для образцов с различным уровнем сухих веществ показал лишь незначительное их изменение. В этой связи для расчетов с точностью до $\pm 0,01 \text{ мм}^2/\text{с}$ можно использовать их средние значения, определенные по уравнениям (3) и (6) соответственно.

Кроме того, обнаружено, что теплофизические характеристики обеих жидкостей – свекловичной мелассы и пивного сусла, полученных разными способами и имеющих различный состав, демонстрируют не только схожие тенденции изменения исследуемых параметров, но и сравнимый численный диапазон их значений. Эти данные могут значительно обогатить методологию проведения экспериментов в области изучения передачи импульса, тепловой энергии и массы в питательных средах биотехнологических производств, делая подход к исследованиям более объективным и информативным.

Таким образом, исследования имеют практическое значение для современных отраслей промышленности, где процессы теплообмена и передачи массы играют ключевую роль в обеспечении качественного и эффективного производства.

Литература

1. Суздальцева О.А., Фомина Е.А., Новоселов А.Г., Сорокин С.А., Баранов И.В., Кравцова Е.В., Гуляева Ю.Н. Процессы молекулярного переноса импульса, тепловой энергии и массы в жидкостных питательных средах дрожжевой и пивной отраслях промышленности. Часть 1. Исследование плотности водных растворов мелассы и концентрированного пивного сусла // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2022. № 2. С. 28–39. DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-2-28-39.

2. Новоселов А.Г., Малахов Ю.Л., Чеботарь А.В., Сорокин С.А., Баранов И.В., Гуляева Ю.Н. Процессы молекулярного переноса в жидкостных питательных средах дрожжевой и пивной отраслях промышленности. Часть 2. Исследование реологических свойств водных растворов мелассы и концентрированного пивного сусла // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2023. № 1. С. 37–48. DOI: 10.17586/2310-1164-2023-16-1-37-48
3. Новоселов А.Г., Гуляева Ю.Н., Дужий А.Б. Разработка и проектирование оборудования для аэробного культивирования одноклеточных микроорганизмов. СПб.: Изд-во Университета ИТМО, 2014. 92 с.
4. Тишин В.Б., Новоселов А.Г., Головинская О.В. Процессы переноса в технологических аппаратах пищевых и микробиологических производств. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 195 с.
5. Кунце В., Мит Г. Технология солода и пива. СПб., Профессия, 2001. 912 с.
6. Нарцисс Л. Краткий курс пивоварения. СПб.: Профессия, 2007. 640с.
7. Новаковская С.С., Шишацкий Ю.И. Справочник по производству хлебопекарных дрожжей. М.: Пищевая промышленность, 1980. 375с.
8. Travnicek P., Los J., Junga P. Comparison of rheological properties of hopped wort and malt wort. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2015, V. 63, no. 1, pp. 131–136.
9. Severa L., Los J. Vliv teploty na dynamickou viskozitu černého piva. *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.* 2008, V. 56, no. 2, pp. 303–308. DOI: 10.11118/actaun200856020303
10. Severa L., Los J., Nedomova., Buchar J. On the rheological profile of malt wort during processing of substrate for lager beer. *Journal of Food Physics*. 2009, V. 22, pp. 5–16.
11. Bozikova M., Hlavach P. Comprasion of thermophysical and rheological properties of different light beers. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*. 2011, V. 15, no. 1, pp. 6–11.
12. Hlavach P., Bozikova M. Comprasion of topvar beer rheological and thermophysical properties. *Acta Techno Agriculture*. 2013, V. 15, Is. 1, pp. 23–27.
13. Махмуд А.К Влияние кратности разбавления мелассы и расхода воздуха на кинетику роста дрожжей при периодическом культивировании в аппаратах барботажного типа: дис. ... канд. тех. наук. СПб., 2007, 100 с.
14. Главачек Ф., Лхотский А. Пивоварение. М.: Пищевая промышленность, 1977. 630с.
15. Дарков Г.В., Вишняков И.Г. Определение вязкости сусла и пива // Известия СПбГУНИПТ, 2001, № 1.

References

1. Suzdaltseva O.A., Fomina E.A., Novoselov A.G., Sorokin S.A., Baranov I.V., Kravtsova E.V., Gulyaeva Y.N. Molecular transfer processes in liquid nutrient media in the yeast and beer industries. Part 1. Study of the density of aqueous solutions of molasses and concentrated beer wort. *Processes and Food Production Equipment*. 2022, no. 2, pp. 28–39. DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-2-28-39
2. Novoselov A.G., Malakhov Y.L., Chebotar A.V., Sorokin S.A., Baranov I.V., Gulyaeva Y.N. Molecular transfer processes in liquid nutrient media in the yeast and beer industries. Part 2. Study of the rheological properties for aqueous solutions of molasses and concentrated beer wort. *Processes and Food Production Equipment*. 2023, no. 1, pp. 37–48. DOI: 10.17586/2310-1164-2023-16-1-37-48
3. Novoselov A.G., Gulyaeva Yu.N., Duzhiy A.B. *Development and design of equipment for aerobic cultivation of unicellular microorganisms*. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2014. 92 p.
4. Tishin V.B., Novoselov A.G., Golovinskaya O.V. *Transfer processes in technological apparatuses of food and microbiological productions*. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2016. 195 с.
5. Kunze W., Mit G. *Technology of malt and beer*. St. Petersburg, Professija Publ., 2001. 912 с.
6. Narcissus L. *Short course of brewing*. St. Petersburg, Professija Publ., 2007. 640 с.
7. Novakovskaya S.S., Shishatsky Yu.I. *Handbook for the production of baker's yeast*. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1980. 375 p.
8. Travnicek P., Los J., Junga P. Comparison of rheological properties of hopped wort and malt wort. *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.* 2015, V. 63, no. 1, pp. 131–136. DOI: 10.11118/actaun201563010131
9. Severa L., Los J. Vliv teploty na dynamickou viskozitu černého piva. *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.* 2008, V. 56, no. 2, pp. 303–308. DOI: 10.11118/actaun200856020303
10. Severa L., Los J., Nedomova Š., Buchar J. On the rheological profile of malt wort during processing of substrate for lager beer. *Journal of Food Physics*. 2009, V. 22, pp. 5–16.
11. Bozikova M., Hlavach P. Comparison of thermophysical and rheological properties of different light beers. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*. 2011, V. 15, no. 1, pp. 6–11.
12. Hlavach P., Bozikova M. Comparison of topvar beer rheological and thermophysical properties. *The Scientific Journal for Agricultural Engineering*. 2013, V. 15, Is. 1, pp. 23–27.
13. Mahmud A.K. Influence of the multiplicity of molasses dilution and air consumption on the kinetics of yeast growth during periodic cultivation in bubble-type apparatuses. *Candidate's thesis*. St. Petersburg, 2007, 100 p.

14. Glavachek F., Lhotsky A. *Brewing*. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1977. 630 p.
15. Darkov G.V., Vishnyakov I.G. Determination of the viscosity of wort and beer. *Izvestiya SPbGUNIPT*, 2001, no. 1.

Информация об авторах

Александр Геннадьевич Новоселов – д-р техн. наук, профессор, доцент образовательного центра энергоэффективных инженерных систем

Логинов Андрей Юрьевич – аспирант образовательного центра энергоэффективных инженерных систем

Игорь Владимирович Баранов – д-р техн. наук, профессор, руководитель образовательного центра энергоэффективных инженерных систем

Анастасия Викторовна Чеботарь – канд. техн. наук, ведущий инженер

Сергей Андреевич Сорокин – канд. техн. наук

Information about the authors

Alexander G. Novoselov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Associate Professor of the Educational Center for Energy Efficient Engineering Systems

Andrey Yu. Loginov, Postgraduate Student of the Educational Center for Energy Efficient Engineering Systems

Igor V. Baranov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Educational Center for Energy Efficient Engineering Systems

Anastasiia V. Chebotar, Ph.D. (Eng.), Lead Engineer

Sergey A. Sorokin, Ph.D. (Eng.)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 31.10.2023

Одобрена после рецензирования 22.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

The article was submitted 31.10.2023

Approved after reviewing 22.11.2023

Accepted for publication 30.11.2023