

Сәкен Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университетінің Ғылым жаршысы (пәнаралық) =Вестник науки Казахского агротехнического исследовательского университета имени Сакена Сейфуллина (междисциплинарный). – Астана: С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, 2024. -№ 2 (121). - Б.111-129. - ISSN 2710-3757, ISSN 2079-939X

[doi.org/ 10.51452/kazatu.2024.2\(121\).1698](https://doi.org/10.51452/kazatu.2024.2(121).1698)

УДК 631.363.258/638.178

МРНТИ 68.39.43

МРНТИ 68.85.39

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕРГОВЫХ ГРАНУЛ МЕТОДОМ ШАРОВОГО БИКАЛОРИМЕТРА

Тойбазар Дәулет Мейірулы

Магистр сельскохозяйственных наук

Алматинский университет энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева

E-mail: d.toibazar@gmail.com

г. Алматы, Казахстан

Дауренова Индира Маликовна

Магистр техники и технологии

Казахский национальный аграрный исследовательский университет

E-mail: indikow-88-kz@mail.ru

г. Алматы, Казахстан

Сапарғали Айдана Жандосқызы

Магистр технических наук

Алматинский технологический университет

E-mail: s.a.zhandoskyzu@mail.ru

г. Алматы, Казахстан

Хазимов Марат Жалелович

Кандидат технических наук

Казахский национальный аграрный исследовательский университет

E-mail: mkhazimov@gmail.com

г. Алматы, Казахстан

Ниязбаев Адильхан Кизатоллинович

PhD

Казахский национальный аграрный исследовательский университет

E-mail: adil77@mail.ru

г. Алматы, Казахстан

Аннотация

Данная работа посвящена изучению изменения теплофизических свойств перговых гранул в сыпучем состоянии от его влажности. Для установления параметров и режимов термической обработки пчелиной перги были изучены ее теплофизические характеристики (теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность) и плотность. Целью исследования являлось установление функциональной зависимости между теплофизическими характеристиками и плотностью пчелиной перги от ее влажности. Для изучения теплофизических свойств использовался шаровой бикалориметр. Температурные показатели изучаемого материала на его границах (на стенках сферы) измерялись с помощью термометра «Fluke», а влажность всех образцов определялась с использованием влагомера «Sartorius MA-37» для различных уровней влагосодержания пригодной для хранения согласно стандарту. Результаты исследования показали,

что для образцов пчелиной перги с влажностью от 11, % до 19,5% пределы теплофизических свойств составляют: теплопроводность от 0,67 до 0,96 Вт/(м•К), теплоемкость от 0,16 до 0,28 кДж/(кг•К) и температурапроводность от $0,0356 \cdot 10^{-7}$ до $0,0372 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

Ключевые слова: теплофизические свойства; шаровой бикалориметр; пчелиная перга; теплопроводность; теплоемкость; температурапроводность.

Введение

Пчелиная перга – смесь пыльцы, секретов пчел и небольшого количества нектара, представляющая собой уникальное природное вещество, которое привлекает внимание своими ценными свойствами и богатым составом микроэлементов, полезных для организма человека. Процесс формирования пчелиной перги начинается со сбора пчелами цветочной пыльцы, ее смешивания с секретами и ферментами, а затем ферментативного превращения в улье. Одной из ключевых особенностей пчелиной перги является ее разнообразный биологический активный состав, включающий в себя витамины (группы В, С, Е), минералы (кальций, магний, калий), аминокислоты, флавоноиды, антиоксиданты и другие питательные вещества [1, 2]. Исследования подтверждают ее способность укреплять иммунитет, защищать клетки от окислительного стресса, а также улучшать общее состояние организма, включая энергию, пищеварение, стрессоустойчивость и качество сна [3, 4, 5].

В последние десятилетия наблюдается увеличение интереса к пчелиной перге в научном сообществе, что отражается в проведении исследований ее состава, свойств и потенциала применения в медицинских целях. Она также становится все более популярной как функциональный продукт в здоровом образе жизни, как в рационе питания, так в виде биодобавок. Современные исследования углубляет наше понимание биологической активности пчелиной перги и ее экологической важности, подчеркивая ее устойчивое происхождение и роль в поддержании здоровья планеты [6, 7, 8].

Теплофизические свойства пчелиной перги включают теплопроводность, теплоемкость, температурапроводность и другие параметры, которые определяют ее способность взаимодействовать с теплом и передавать его.

Исследования пчелиной перги не только расширяют наши знания о природе и биологических процессах, но и могут привести к созданию новых продуктов и технологий, способствующих улучшению качества жизни и сохранению окружающей среды [9].

Хранение и сушка перги требуют особого подхода для сохранения его качества и свойств. Перговые гранулы должны быть равномерно распределены в тонком слое перед сушкой. Это поможет обеспечивать эффективное удаление влаги и предотвратить образование группировок, которые могут затруднить процесс сушки. Сушку перговых гранул лучше всего проводить при низкой температуре (обычно не выше 40-45 °С), чтобы предотвратить потерю питательных веществ и биологически активных компонентов. Важно также обеспечить вентиляцию во время сушки, чтобы обеспечить эффективное удаление влаги и предотвратить развитие плесени или гниения. Перегрев или пересушка перговых гранул может привести к потере их качества. Поэтому важно контролировать время сушки и регулярно проверять готовность продукта [10, 11].

Для определения параметров и режимов процесса сушки сушильного устройства необходимо провести тепловые и технологические расчеты, которые основаны на знании теплофизических свойств материала, подлежащего обработке [12].

Теплофизические характеристики пчелиных продуктов имеют важное значение при разработке оборудования для тепловых и массообменных процессов, включая сушку и замораживание.

Существуют несколько экспериментальных методов определения теплофизических свойств материала:

1. Методы калориметрии включают в себя различные методы измерения тепловых эффектов, такие как измерение изменения температуры, изменение фазы или изменение объема образца. Примеры включают дифференциальную сканирующую калориметрию (DSC), измерение теплоемкости с использованием калориметров, такие как калориметры с воспроизводимым нагревом или охлаждением.

2. Методы термогравиметрии измеряет изменения массы образца в зависимости от температуры или времени. Это позволяет изучать термические свойства материала, такие как термическое разложение, выделение газов или испарение воды.

3. Метод термической диффузии используется для измерения скорости диффузии тепла в материалах. Метод основан на измерении температуры в материале в ответ на тепловое возбуждение, или методы, использующие прямое измерение потока тепла через материал.

4. Методы измерения коэффициента теплового расширения позволяют измерить изменение размера материала в зависимости от изменения температуры, такие как измерение изменения длины образца или объема при изменении температуры [13, 14].

Выбор конкретного метода зависит от типа материала, его физических свойств и целей исследования. Комбинация различных методов может дать более полное представление о теплофизических характеристиках материала.

Для исследования теплофизических характеристик пчелиной перги был использован метод шарового бикалориметра. Шаровой бикалориметр – это устройство, которое используется для измерения теплоемкости образцов. Принцип его работы основан на измерении изменения температуры образца при известном добавлении тепла или измерении количества выделявшегося тепла при известном измерении температуры. Этот метод может быть применен и для измерения теплофизических характеристик перги [15, 16, 17].

Уникальная структура, включая пористость, пластичность, слоистость и фрагментированность пчелиной перги, обеспечивает возможность плотного укладывания материала, принимая форму шара в шаровом бикалориметре. Исключение испарения влаги в атмосферу и равномерное тепловое воздействие на образец со всех сторон в процессе исследований делают этот метод особенно эффективным [18, 19].

Научная значимость данного исследования заключается в выявлении связей между влажностью и теплофизическими свойствами, а также плотностью пчелиной перги. Эти данные будут важны для понимания характеристик материала в различных условиях влажности.

Цель данного исследования состоит в выявлении функциональных зависимостей между теплофизическими характеристиками и влажностью пчелиной перги. Для достижения данной цели необходимо выполнить следующие задачи: выбрать необходимое оборудование и приборы для исследования, разработать методику проведения экспериментов, провести эксперименты и анализ полученных данных.

Материалы и методы

На рисунке 1(а) представлен общий вид установки. Это устройство состоит из двух медных сферических резервуаров – внешней сферы и внутренней сферы, объединенных общим центром. Внешний диаметр внутренней сферы составляет 77,6 мм, а внутренний диаметр внешней сферы – 42,3 мм. Пространство между сферами заполняется исследуемой пчелиной пергой. В центре внутренней сферы установлена электрическая лампочка, которая выступает в роли источника тепла. Потребляемая мощность лампочки фиксируется ваттметром. При плотном заполнении перги предполагается, что температура слоя, соприкасающегося с поверхностью сфер, совпадает с температурой стенок сфер. Для измерения разницы температур используется термометр «Fluke», оснащенный двумя термопарами. Одна термопара располагается на внутренней поверхности стенки внешней сферы, а другая – на внешней поверхности стенки внутренней сферы. Исследуемая пчелиная перга, имеющая известную влажность, загружается в пространство бикалориметра. Затем бикалориметр опускается в термостат, наполненный трансформаторным маслом. Температура масла в термостате поддерживается постоянной во время эксперимента. Для обеспечения условия $\alpha \rightarrow \infty$ масло интенсивно перемещается (где α – коэффициент теплообмена). Во время этого внутренний источник тепла (лампочка) остается включенным. После опускания бикалориметра в термостат фиксируются изменения температур T_1 – температура наружной поверхности стенки внутренней сферы и T_2 – температура внутренней поверхности стенки внешней сферы. Затем температуры регистрируются через каждую минуту. Изменения влажности образца материала можно систематически варьировать для анализа влияния влаги на теплообменные процессы. В рамках эксперимента использовались пять образцов одной массы пчелиной перги с различной влажностью (рисунок 2 в). Перед определением

их теплофизических свойств проводился анализ влажности при помощи анализатора влажности «Sartorius» (рисунок 2 а, б). Плотность пчелиной перги рассчитывалась по следующей формуле:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1)$$

где ρ – плотность пчелиной перги, кг/м³;

m – масса пчелиной перги в фиксированном объеме, кг;

V – объем пчелиной перги, м³.

Объем, при изменяющейся плотности, определялся с использованием стандартного пикнометрического метода. Исследуемый материал загружался в цилиндр. До загрузки материала фиксировался уровень жидкости в цилиндре, после чего материал погружался. Разница между начальным и вытесненным уровнями жидкости в мерной трубке указывала на объем исследуемого материала. В рамках эксперимента также оценивалось влияние влажности материала на объемную массу. Помимо измерения объема и оценки влияния влажности материала на его объемную массу, были предприняты дополнительные шаги для обеспечения точности результатов. Все измерения производились при стандартных условиях, что включало контроль температуры и давления. Для проверки точности измерений проводились повторные эксперименты, а также проверялась калибровка используемого оборудования.

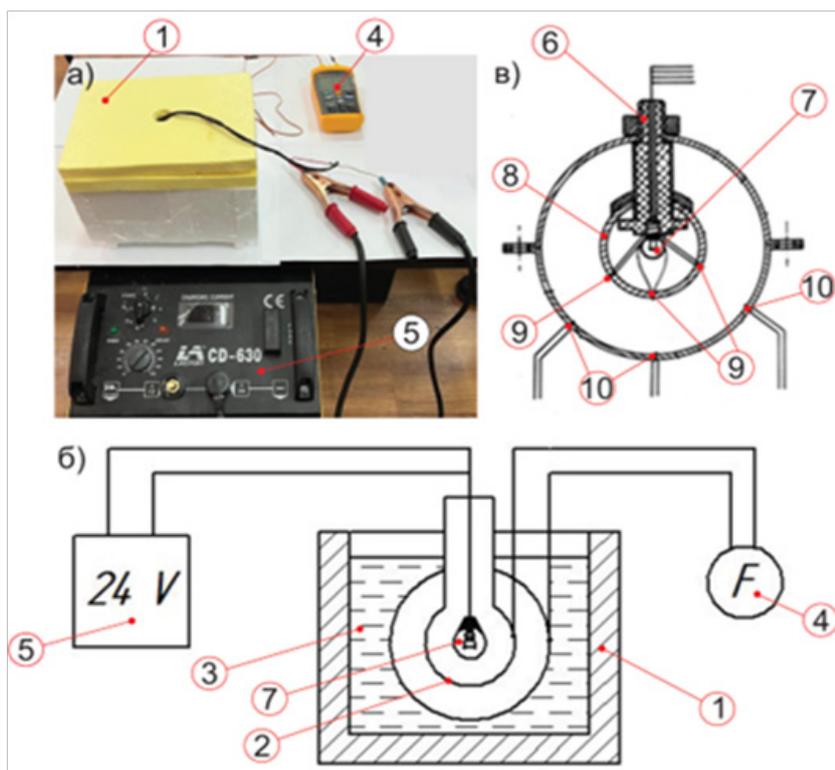


Рисунок 1 – Общий вид установки для определения теплофизических свойств пчелиной перги
а – общий вид установки; б – электрическая схема установки;
в – схема шарового бикалориметра;
1 – термостат; 2 – шаровой бикалориметр; 3 – трансформаторное масло;
4 – термометр «Fluke»; 5 – источник питания, 6 – эбонитовый стержень;
7 – электрическая лампочка; 8 – внутренний шар; 9, 10 – внутренние и наружные термопары

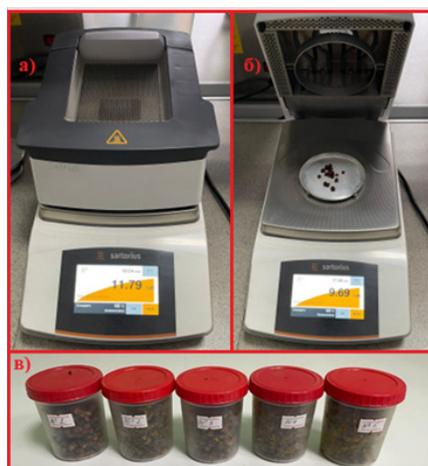


Рисунок 2 – Устройство для определения влажности пчелиной перги
а, б – общий вид влагомера «Sartorius MA-37»; в – пчелиная перга разной влажности

Сначала были выполнены расчеты, используя измеренные значения температурных различий и других параметров, полученных в процессе эксперимента. На основе этих расчетов были определены коэффициенты теплопроводности, теплоемкости и температурапроводности материала.

Коэффициент теплопроводности пчелиной перги был вычислен с использованием следующей формулы:

$$\lambda = \frac{Q \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)}{4\pi(t_{c1} - t_{c2})}, \quad (2)$$

где Q – тепловой поток, проходящий от внутренней поверхности к внешней поверхности шарового слоя пчелиной перги, Вт;

R_1, R_2 – радиусы внутренней и внешней сферических поверхностей, м;

t_{c1}, t_{c2} – температуры внутренней и внешней поверхностей шарового слоя, К.

Тепловой поток определялся по расходу электроэнергии в лампочке, как:

$$Q = W, \quad (3)$$

где W – мощность, потребляемая лампочкой, Вт.

Коэффициент теплоемкости определялся по формуле:

$$C = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}, \quad (4)$$

где Q – тепловой поток, проходящий от внутренней поверхности к внешней поверхности шарового слоя пчелиной перги, Вт;

m – масса исследуемой пчелиной перги, кг;

ΔT – разность температур, внутренней и внешней поверхностей шарового слоя, °С.

По известным значениям теплопроводности и теплоемкости определялся коэффициент температурапроводности:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}, \quad (5)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м•К);

c – коэффициент теплоемкости, кДж/(кг•К).

Результаты

Функциональные связи между теплофизическими характеристиками и плотностью пчелиной перги в зависимости от ее влажности представлены на рисунках 3-6 в виде графиков, представляющих собой уравнения второго порядка. Плотность пчелиной перги изменяется в пределах от 1042 до 1144 кг/м³ в зависимости от степени уплотнения. Как показано, на рисунке 3 гранулы перги, как и любое другое вещество, имеют свой объем – пространство, которое они занимают в трехмерном пространстве. Когда гранулы перги находятся в сухом состоянии, их объем определен. Однако, когда гранулы перги впитывают влагу из окружающей среды, например, из воздуха, вода начинает заполнять пространство вокруг частиц перги. Таким образом, увеличение влажности гранул перги приводит к тому, что вода заполняет пространство между гранулами, что приводит к расширению объема всей системы. Это происходит потому, что вода является жидкостью и способна заполнять свободное пространство. Но изменения не значительны.

Таким образом, даже если объем перги увеличивается из-за влаги, масса также увеличивается из-за присутствия воды между гранулами, что в итоге приводит к увеличению объемной плотности.

При увеличении влажности наблюдается рост удельной теплоемкости, теплопроводности, температуропроводности и увеличение плотности перги. Наличие определенного количества влаги в порах материала способствует более эффективному теплообмену. В отсутствие влаги процесс теплообмена затрудняется, что увеличивает энергозатраты на этот процесс. Например, при увеличении уровня влажности от 11,9% до 19,5% удельная теплоемкость возрастает с 0,0356 до 0,0372 кДж/(кг•К), как показано на рисунке 4.

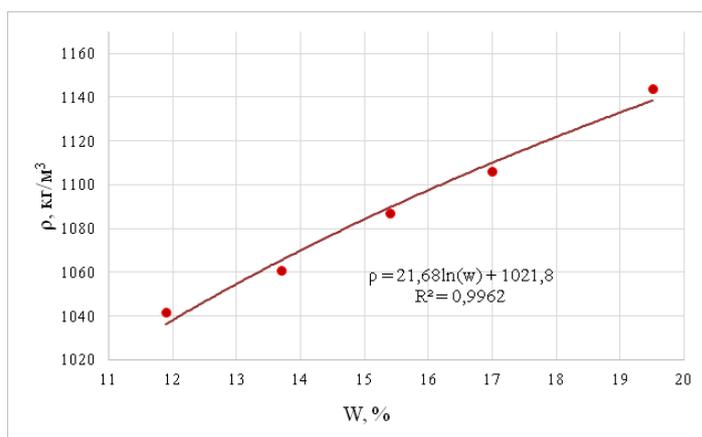


Рисунок 3 – Зависимость плотности пчелиной перги от ее влажности

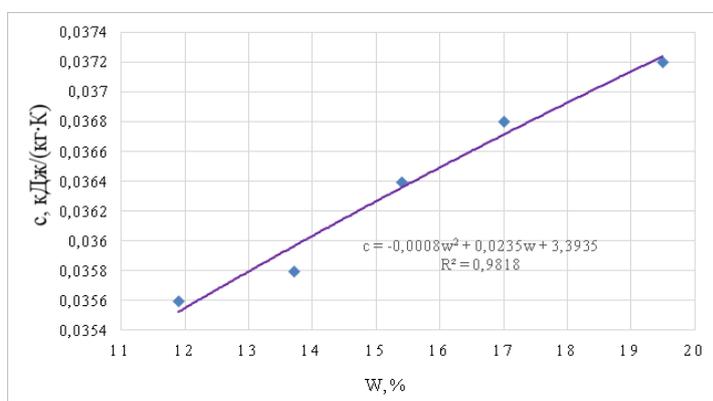


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента теплоемкости пчелиной перги от ее влажности

В интервале изменения уровня влажности от 11,9% до 19,5% наблюдается изменение численных значений коэффициента теплопроводности для перги. Эти значения варьируются от 0,67 до 0,96 Вт/(м•К) и представлены на графике второго порядка (рисунок 5). Из анализа следует, что при увеличении влажности перги от 11,9 % до 13,7 % наблюдается резкое увеличение коэффициента теплопроводности, а дальнейший рост происходит более плавно, такая динамика изменения коэффициента теплопроводности указывает на постепенное насыщение влагой пор материала, что способствует более эффективному теплообмену через влагу и приближению к предельному значению.

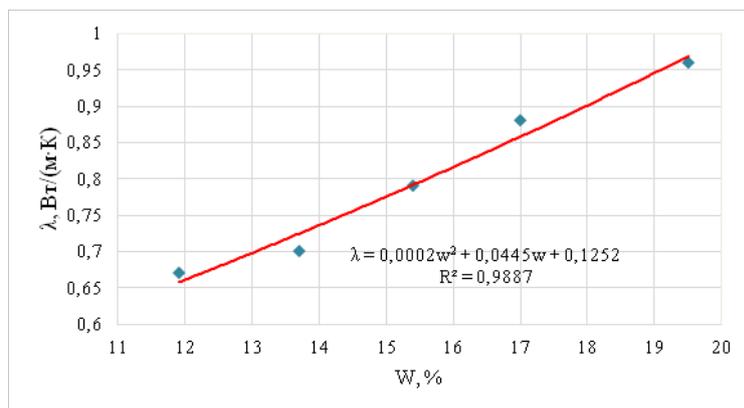


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента теплопроводности пчелиной перги от ее влажности

Теплопроводность, в свою очередь, отражает скорость, с которой изделие реагирует на изменения температуры окружающего воздуха при сушке, и ее значения варьируется в диапазоне от $0,16 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ до $0,28 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

Температуропроводность меняется аналогично теплопроводности: с уменьшением влажности она также снижается, как показано на рисунке 6.

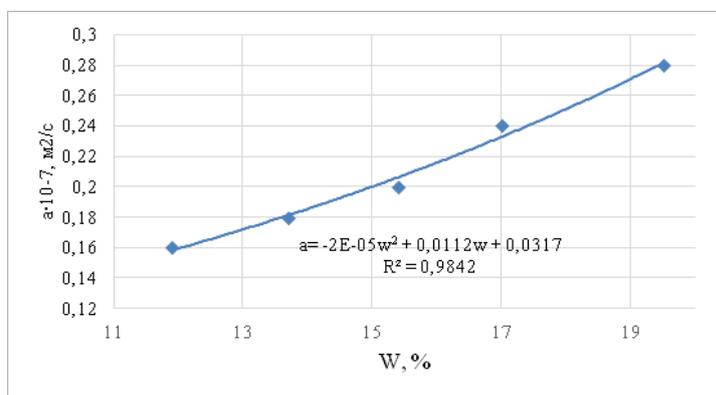


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента температуропроводности пчелиной перги от ее влажности

Обсуждение и надежность данных, полученных в ходе эксперимента, могут быть объяснены следующим образом с использованием данных, зарегистрированных термометром «Fluke» и сохраненных в памяти прибора, а также полученных после передачи на ПК. Исходя из данных, полученных с термометра «Fluke», были построены графики зависимости внутренней (T_1) и внешней (T_2) температуры термопары от времени процесса (приведены на рисунках 7-11). На рисунках 7-11 отображены следующие параметры: T_1 – это температура внутренней поверхности стенки внешнего шара, а разность между ними ($T_1 - T_2$) представляет собой разницу в температуре. Продолжительность процесса составляла 30 минут для всех экспериментов. При расчетах коэффициентов теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности были использованы средние значения температур внутренней поверхности стенки внешнего шара

и внешней поверхности внутреннего шара бикалориметра. Как показано на рисунках 7-11, с уменьшением влажности среднее значение разницы температур между внутренней поверхностью стенки внешнего шара и внешней поверхности внутреннего шара увеличивалось.

Таблица 1 – Внутренняя и внешняя температура стенок шарового бикалориметра

Reading	T_1	T_2	$T_1 - T_2$
1	25,5	26,9	-1,4
2	27	26,8	0,2
3	28,3	26,9	1,4
4	29,8	26,8	3
5	31,1	26,8	4,3
6	32,5	26,8	5,7
7	33,8	26,9	6,9
8	35	26,9	8,1
9	36,2	26,9	9,3
10	37,2	27	10,2
11	38,3	27,2	11,1
12	39,2	27,3	11,9
13	40,2	27,5	12,7
14	41	27,7	13,3
15	41,9	27,9	14
16	42,8	28,1	14,7
17	43,5	28,4	15,1
18	44,3	28,6	15,7
19	45	28,9	16,1
20	45,7	29,1	16,6
21	46,4	29,4	17
22	47	29,7	17,3
23	47,6	29,9	17,7
24	48,2	30,2	18
25	48,7	30,5	18,2
26	49,2	30,8	18,4
27	49,7	31,1	18,6
28	50,2	31,4	18,8
29	50,6	31,7	18,9
30	51,1	32	19,1
31	51,5	32,3	19,2
32	52	32,6	19,4
Max	52,0	32,6	19,4
Min	25,5	26,8	-1,4
Average	41,6	28,8	12,8

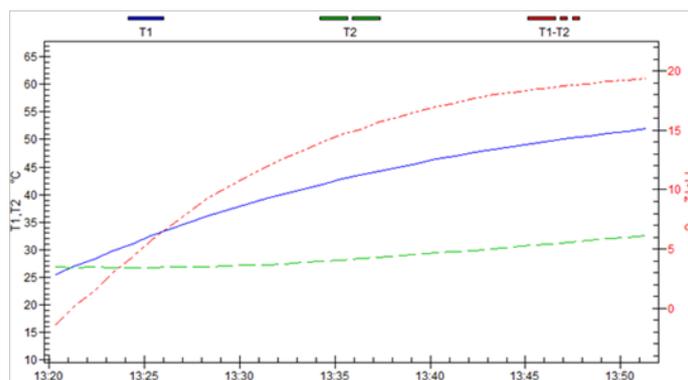


Рисунок 7 – Зависимость внешней и внутренней температуры от времени процесса при влажности 11,9%

При влажности 11,9% обнаружено, что максимальная температура на внутренней поверхности стенки достигла 52,0 °С, в то время как температура на внешней поверхности стенки внутреннего шара составила 32,6 °С. Максимальная разница температуры составила 19,4 °С, при этом среднее значение $T_1 = 41,6$ °С, $T_2 = 28,8$ °С, а средняя разница температурами была 12,8 °С.

Таблица 2 – Внутренняя и внешняя температура стенок шарового бикалориметра

Reading	T_1 , °С	T_2 , °С	$T_1 - T_2$, °С
1	29,9	30	-0,1
2	30,7	29,9	0,8
3	31,9	29,9	2
4	33,2	29,8	3,4
5	34,5	29,8	4,7
6	35,8	29,8	6
7	37	29,8	7,2
8	38,1	29,9	8,2
9	39,2	29,9	9,3
10	40,2	30	10,2
11	41,2	30,2	11
12	42,1	30,3	11,8
13	43	30,5	12,5
14	43,8	30,7	13,1
15	44,5	30,9	13,6
16	45,2	31,1	14,1
17	45,9	31,3	14,6
18	46,5	31,6	14,9
19	47,2	31,8	15,4
20	47,8	32	15,8
21	48,3	32,3	16
22	48,8	32,6	16,2
23	49,3	32,9	16,4
24	49,8	33,2	16,6
25	50,2	33,5	16,7
26	50,6	33,8	16,8

Продолжение таблицы 2

27	51	34	17
28	51,4	34,3	17,1
29	51,8	34,6	17,2
30	52,2	34,9	17,3
Max	52,2	34,9	17,3
Min	29,9	29,8	-0,1
Average	43,4	31,5	11,9

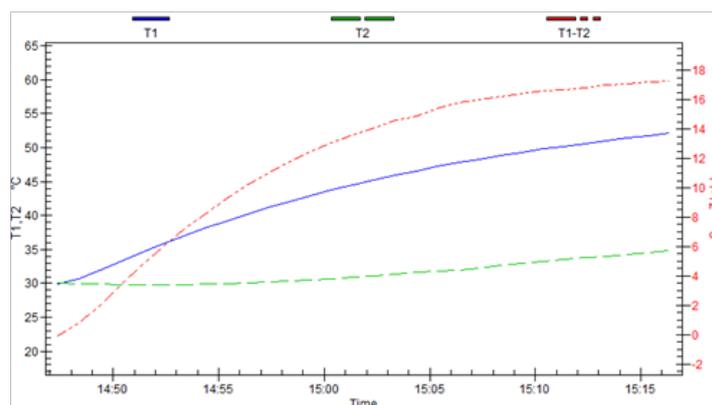


Рисунок 8 – Зависимость внешней и внутренней температуры от времени процесса при влажности 13,7%

При влажности 13,7% обнаружено, что максимальная температура на внутренней поверхности стенки достигла 52,2 °С, в то время как температура на внешней поверхности стенки внутреннего шара составила 34,9 °С. Максимальная разница в температуре составила 17,3 °С, при этом среднее значение $T_1 = 43,4$ °С, $T_2 = 31,5$ °С, а средняя разница между температурами была 11,9 °С.

Таблица 3 – Внутренняя и внешняя температура стенок шарового бикалориметра

Reading	T_1 , °С	T_2 , °С	$T_1 - T_2$, °С
1	28	28,5	-0,5
2	28,4	28,4	0
3	29,1	28,3	0,8
4	29,9	28,3	1,6
5	30,8	28,3	2,5
6	31,7	28,3	3,4
7	32,6	28,4	4,2
8	33,5	28,5	5
9	34,3	28,6	5,7
10	35,1	28,7	6,4
11	35,9	28,8	7,1
12	36,7	29	7,7
13	37,4	29,2	8,2
14	38,1	29,4	8,7
15	38,7	29,6	9,1
16	39,3	29,8	9,5
17	39,9	30	9,9

Продолжение таблицы 3

18	40,5	30,3	10,2
19	41	30,5	10,5
20	41,5	30,8	10,7
21	42	31	11
22	42,5	31,3	11,2
23	43	31,6	11,4
24	43,5	31,9	11,6
25	43,9	32,1	11,8
26	44,3	32,4	11,9
27	44,8	32,7	12,1
28	45,2	33	12,2
29	45,6	33,3	12,3
30	46	33,6	12,4
31	46,4	33,8	12,6
32	46,8	34,1	12,7
Max	46,8	34,1	12,7
Min	28,0	28,3	-0,5
Average	38,6	30,4	8,2

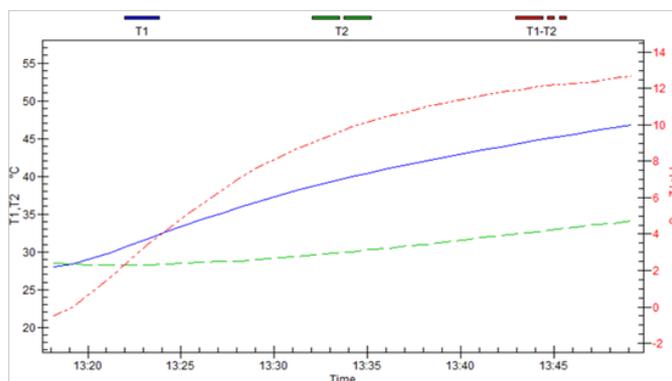


Рисунок 9 – Зависимость внешней и внутренней температуры от времени процесса при влажности 15,4%

При влажности 15,4% обнаружено, что максимальная температура на внутренней поверхности стенки достигла 46,8 °С, в то время как температура на внешней поверхности стенки внутреннего шара составила 34,1 °С. Максимальная разница в температуре составила 12,7 °С, при этом среднее значение $T_1 = 38,6$ °С, $T_2 = 30,4$ °С, а средняя разница между температурами была 8,2 °С.

Таблица 4 – Внутренняя и внешняя температура стенок шарового бикалориметра

Reading	T_1 , °С	T_2 , °С	$T_1 - T_2$, °С
1	28,1	29,2	-1,1
2	28,6	29,2	-0,6
3	29,5	29,1	0,4
4	30,5	29	1,5
5	31,6	29	2,6
6	32,6	29	3,6
7	33,6	29	4,6

Продолжение таблицы 4

8	34,6	29	5,6
9	35,6	29	6,6
10	36,5	29,1	7,4
11	37,3	29,2	8,1
12	38,1	29,4	8,7
13	38,9	29,5	9,4
14	39,6	29,7	9,9
15	40,3	29,9	10,4
16	41	30	11
17	41,7	30,3	11,4
18	42,3	30,5	11,8
19	42,9	30,7	12,2
20	43,5	30,9	12,6
21	44,1	31,2	12,9
22	44,6	31,5	13,1
23	45,1	31,7	13,4
24	45,6	32	13,6
25	46,1	32,3	13,8
26	46,6	32,5	14,1
27	47	32,8	14,2
28	47,4	33,1	14,3
29	47,8	33,4	14,4
30	48,3	33,6	14,7
31	48,6	33,9	14,7
Max	48,6	33,9	14,7
Min	28,1	29,0	-1,1
Average	39,9	30,6	9,3

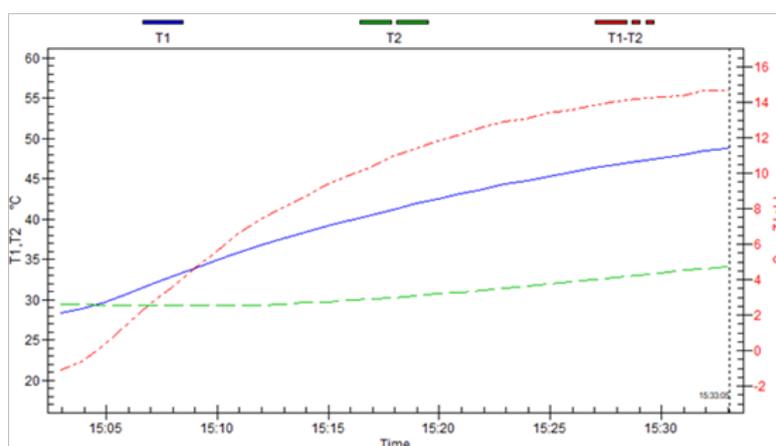


Рисунок 10 – Зависимость внешней и внутренней температуры от времени процесса при влажности 17%

При влажности 17% обнаружено, что максимальная температура на внутренней поверхности стенки достигла 48,6 °С, в то время как температура на внешней поверхности стенки внутреннего шара составила 33,9 °С. Максимальная разница в температуре составила 14,7 °С, при этом среднее значение $T_1 = 39,9$ °С, значение $T_2 = 30,6$ °С, а средняя разница между температурами была 9,3 °С.

Таблица 5– Внутренняя и внешняя температура стенок шарового бикалориметра

Reading	T_1 , °С	T_2 , °С	$T_1 - T_2$, °С
1	24,2	27,5	-3,3
2	24,8	27,4	-2,6
3	25,7	27,2	-1,5
4	26,7	27,2	-0,5
5	27,7	27,1	0,6
6	28,7	27	1,7
7	29,6	27	2,6
8	30,5	27,1	3,4
9	31,3	27,2	4,1
10	32,2	27,2	5
11	33	27,3	5,7
12	33,8	27,5	6,3
13	34,6	27,6	7
14	35,3	27,8	7,5
15	36	28	8
16	36,7	28,3	8,4
17	37,4	28,5	8,9
18	38	28,8	9,2
19	38,6	29	9,6
20	39,2	29,3	9,9
21	39,7	29,6	10,1
22	40,3	29,9	10,4
23	40,8	30,2	10,6
24	41,3	30,5	10,8
25	41,8	30,8	11
26	42,2	31,1	11,1
27	42,6	31,5	11,1
28	43	31,8	11,2
29	43,5	32,1	11,4
30	43,9	32,4	11,5
31	44,3	32,8	11,5
32	44,6	33,1	11,5
33	45	33,4	11,6
34	45,4	33,7	11,7
Max	45,4	33,7	11,7
Min	24,2	27,0	-3,3
Average	36,5	29,3	7,2

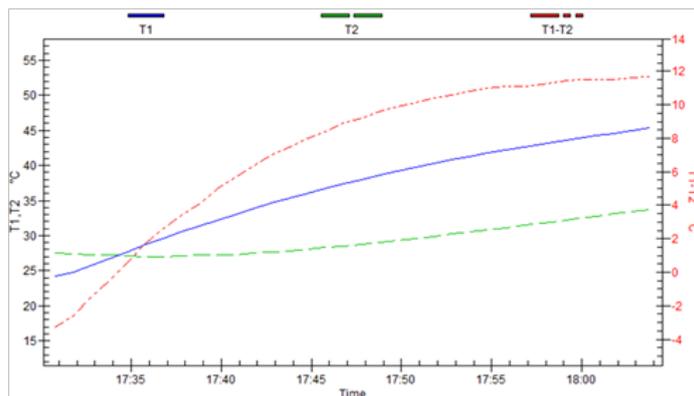


Рисунок 11 – Зависимость внешней и внутренней температуры от времени процесса при влажности 19,5%

При влажности 19,5% обнаружено, что максимальная температуры на внутренней поверхности стенки достигла 45,4 °С, в то время как температура внешней поверхности стенки внутреннего шара составила 33,7 °С. Максимальная разница в температуре составила 11,7 °С, при этом среднее значение T_1 равнялось 36,5 °С, T_2 - 29,3 °С, а средняя разница между температурами была 7,2 °С.

Обсуждение

В ходе исследований, проведенных с применением метода шарового бикалориметра для оценки теплофизических характеристик различных материалов, было подтверждено высокое качество и точность данного метода. Полученные результаты измерений коэффициентов теплопроводности, теплоемкости и температурапроводности являются достоверными и соответствуют признанным стандартам в данной области исследований. Полученные результаты подтверждают надежность измерений и их согласованность с данными, полученными при применениях других методов, такими как метод плоского зонда предложенный А.Ф. Чудновским [20].

При уменьшении содержания влаги в гранулах перги с 19,5% до 11,9% отмечается уменьшение теплоемкости с 0,0356 до 0,0372 кДж/(кг•К), коэффициента температурапроводности с $0,16 \cdot 10^{-7}$ до $0,28 \cdot 10^{-7}$ м²/с и коэффициента теплопроводности с 0,67 до 0,96 Вт/(м•К). Из анализа графиков следует, что при снижении влажности гранул перги все указанные теплофизические параметры уменьшаются. Подобное изменение характерно для многих растительных материалов в гранулированном состоянии и объясняется влажностью на поверхности гранул. В работе С.В. Винакурова также обсуждаются теплофизические свойства перги. Однако наши исследования показывают, что коэффициенты теплоемкости, температурапроводности и теплопроводности возрастают с увеличением влажности перги в соответствии с криволинейной зависимостью, в то время как в работах С.В. Винакурова эти коэффициенты изменяются линейно, что влияет на точность расчетов сушильного оборудования.

Заключение

Исследование теплофизических свойств и плотности пчелиной перги требовало использования их числовых коэффициентов для расчета конструктивных и режимных параметров сушильной установки. Выбор метода шарового бикалориметра для исследования теплофизических свойств пчелиной перги связано с ее структурно-механическим свойством, как деформативностью, а также низкими потерями тепла.

Полученные функциональные зависимости теплофизических свойств пчелиной перги от ее влажности в пределах влажности от 11,9% до 19,5% изменялись для: удельной теплоемкости от 0,0356 до 0,0372 кДж/(кг•К); теплопроводности – от 0,67 до 0,96 Вт/(м•К); температурапроводности от $0,16 \cdot 10^{-7}$ м²/с до $0,28 \cdot 10^{-7}$ м²/с. Плотность пчелиной перги в зависимости от влажности в этих пределах менялась от 1042-1144 кг/м³. Эти результаты достаточно хорошо согласуются предыдущим исследованием в этой области аналогичными структурно-механическими свойствами. Полученные результаты могут быть использованы для производственных процессов и разработки нового оборудования для термической обработки

пчелиной перги. Дальнейшие исследования по теплофизическим свойствам пчелиной перги требуют установления зависимости от изменения температурных значений.

Информация о финансировании

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по проекту (AP19679448 «Разработка интенсивной технологии переработки пчелиных сот на пергу и восковое сырье путем модернизации технических средств в условиях пчеловодческих хозяйств Казахстана»).

Список литературы

- 1 Degirmenci, A. The process of pollen transformation into bee bread: changes in bioactivity bioaccessibility, and microbial dynamics [Text] / A. Degirmenci, O.Yildiz, G.M. Boyracim, M. Er Kemal, O. Simsek // Food and Function. - 2024. - № 15(5). - P. 2550-2562.
- 2 Медовые реки Казахстана (<https://eldala.kz/specproekty/1609-medovye-reki-kazahstana>)
- 3 Amer, I. T. Effect of some bee bread quality on protein content and antioxidant system of honeybee workers [Text] / I.T. Amer, H.A. Zeinab, M.F. Abdel-Rahman, A.M.Moustafa // International Journal of Tropical Insect Science. - 2023. - № 43. - P.93-105.
- 4 Bakour, M. Bee Bread as a Promising Source of Bioactive Molecules and Functional Properties [Text] / M. Bakour, H. Laaroussi, D. Ousaaid, H. Meachcate, B. Lyoussi // An Up-to-Date Review, Antibiotics. - 2022. - № 11(2). - P. 203.
- 5 Ertosun, S. The impact of bee product incorporation on the processing properties, nutritional value, sensory acceptance, and microbial stability of bread [Text] / S. Ertosun, S.I. Falcao, V. Aylanc, P. Rodriques, M. Vilas-Boas // Journal of Food Measurement and Characterization. - 2024. - № 18(1). - P. 451-463.
- 6 Бышов, Д.Н. К вопросу определения прочностных свойств перги [Текст]: Д.Н. Бышов, Д.Е. Каширин, С.Н. Гобелев // Инновационные направления развития технологий и технических средств механизации сельского хозяйства: материалы междунар. науч.-практ. конференции посвящ. 100-летию кафедры сельскохозяйственных машин агроинженерного факультета Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I / под общ. ред. Н.И. Бухтоярова, В.И. Оробинского, И.В. Баскакова. - Воронеж. 2015. - 113-116 с.
- 7 Ciric, J. Chemical Composition of bee bread (perga), a functional food: A review [Text] / J. Ciric, N. Haneklaus, S. Rajic, T. Baltic, L.I. Brankovic, V. Dordevic // Journal of Trace Elements and Minerals. - 2022. - Vol. 2. 100038.
- 8 Бышов, Д.Н. Исследование теплофизических свойств пчелиных сотов [Текст] / Д.Е. Каширин, И.А. Успенский, С.С. Морозов, В.Ю. Чухланов // Вестник Рязанского государственного агротехнического университета им. П.А. Костычева. - 2019. - № 4.
- 9 Luo, X. Processing Technologies for Bee Products Developments and perspectives [Text] / X. Luo, Y. Dong, C. Gu, X. Zang, H. Ma // Sec. Nutrition and Food Science Technology. - 2021. - Vol. 8.
- 10 Semkiw, P. Bee bread Production – A New Source of Income for Beekeeping farms? [Text] / P. Semkiw, P. Skubida // Agriculture. - 2021. - № 11. - P. 468.
- 11 Wang, Y. Bee wisdom: exploring bee control strategies for food microflora by comparing the physicochemical characteristic and microbial composition of beebread [Text] / Y. Wang, L. Ma, B. Xu // Microbiology Spectrum. - 2023. - P.12-13.
- 12 Гинзбург, А.С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов [Текст]: А.С. Гинзбург, М.А. Громов, Г.И. Красовская // Пищевая промышленность. - Москва. 1990. - 288 с.
- 13 Мамонов, Р.А. Технология заготовки и подготовки пчелиных сотов к промышленной переработке на пергу и восковое сырье [Текст] / Р.А. Мамонов, Т.В. Торженева // Вестник Рязанского ГАУ им. П.А. Костычева. - 2013. - № 2. - С. 30-33.
- 14 Лыков, А.В. Теория теплопроводности [Текст]: А.В. Лыков // -М.: Высшая школа. 1967. - 599 с.

15 Kieliszek, M. Pollen and bee bread as new health-oriented products: A review [Text] / M. Kieliszek, K. Piwowarek, A.M. Kot, S. Blazejak, A. Chlebowska-Smigiel, I. Wolska // Trends in Food Science and Technology. - 2020. - № 71. - P.170-180.

16 Шашков, А.Г. Методы определения теплопроводности и температуропроводности [Текст] / А.Г. Шашков, Г.М. Вольхов, Т.Н. Абраменко, В.П. Козлов // -Москва. Энергия, 1973. - 336 с.

17 Baky, H. M. Bee Pollen and Bread as a Super-Food A Comparative Review of Their Merabolome Composition and Quality Assessment in the Context of Best Recovery Conditions [Text] / H. M. Baky, B.M. Abouelela, K. Wang, A.M. Farag // Molecules. - 2023. - № 28 (2). - P. 715.

18 Кондратьев, Г.М. Регулярный тепловой режим [Текст]: Г.М. Кондратьев // -М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы. 1954. - 408 с.

19 Кондратьев, Г.М. Тепловые измерения [Текст]: учеб. пособие для вузов / Г.М. Кондратьев // - М. -Л.: Из-во Машгиз, 1957. - 244 с.

20 Чудновский, А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов [Текст]: А.Ф. Чудновский. - М.: Физматгиз. 1962. - 407 с.

References

1 Degirmenci, A. The process of pollen transformation into bee bread: changes in bioactivity bioaccessibility, and microbial dynamics [Text] / A. Degirmenci, O.Yildiz, G.M. Boyracim, M. Er Kemal, O. Simsek // Food and Function. - 2024. - № 15(5). - P. 2550-2562.

2 Medovye reki Kazahstana (<https://eldala.kz/specproekty/1609-medovye-reki-kazahstana>)

3 Amer, I.T. Effect of some bee bread quality on protein content and antioxidant system of honeybee workers [Text] / I.T. Amer, H.A. Zeinab, M.F. Abdel-Rahman, A.M.Moustafa // International Journal of Tropical Insect Science. - 2023. - № 43. -P.93-105.

4 Bakour, M. Bee Bread as a Promising Source of Bioactive Molecules and Functional Properties [Text] / M. Bakour, H. Laaroussi, D. Ousaaid, H. Meachcate, B. Lyoussi // An Up-to-Date Review, Antibiotics. - 2022. - № 11(2). - P. 203.

5 Ertosun, S. The impact of bee product incorporation on the processing properties, nutritional value, sensory acceptance, and microbial stability of bread [Text] / S. Ertosun, S.I. Falcao, V. Aylanc, P. Rodriques, M. Vilas-Boas // Journal of Food Measurement and Characterization. - 2024. - № 18(1). - P. 451-463.

6 Byshov, D.N. K voprosu opredelenija prochnostnyh svojstv pergi [Text]: D.N. Byshov, D.E. Kashirin, S.N. Gobelev. // Innovacionnye napravlenija razvitija tehnologij i tehniceskikh sredstv mehanizacii sel'skogo hozjajstva: mat-ly Mezhdunar. nauch. -prakt. konf., posvjashh. 100-letiju kafedry sel'skohozjajstvennyh mashin agroinzhenerного fakul'teta Voronezhskogo gosudarstvenного agrarnого universiteta imeni imperatora Petra I / pod obsh. red. N.I. Buhtjarova, V.I. Orobinskogo, I.V. Baskakova. - Voronezh. 2015. - 113-116 p.

7 Ciric, J. Chemical Composition of bee bread (perga), a functional food: A review [Text] / J. Ciric, N. Haneklaus, S. Rajic, T. Baltic, L.I. Brankovic, V. Dordevic // Jornal of Trace Elements and Minerals. - 2022. -Vol. 2. 100038.

8 Byshov, D.N. The research of thermophysical properties of honeycoms [Text] / D.N. Byshov, D.E. Kashirin, I.A. Uspensky, S.S. Morozov, V. Yu. Chukhlanov // Vestnik Rjazanskogo gosudarstvenного agrotehnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva. - 2019. - № 4.

9 Luo, X. Processing Technologies for Bee Products Developments and perspectives [Text] / X. Luo, Y. Dong, C. Gu, X. Zang, H. Ma // Sec. Nutrition and Food Science Technology. - 2021. - Vol. 8.

10 Semkiw, P. Skubida, P. Bee bread Production – A New Source of Income for Beekeeping farms? [Text] / P. Semkiw, P. Skubida // Agriculture. - 2021. - № 11. - P. 468.

11 Wang Y. Bee wisdom: exploring bee control strategies for food microflora by comparing the physicochemical characteristic and microbial composition of beebread Y. Wang, L. Ma, B. Xu // Microbiology Spectrum. - 2023. - 12-13 p.

12 Ginzburg, A.S. Thermophysical characteristics of food products. Directory [Text]: A.S Ginzburg, M.A Gromov, G.I Krasovskaya // Food industry. - Moscow. 1990. - 288 p.

13 Mamonov, R.A. Tekhnologiya zagotovki i podgotovki pchelinykh sotov k promyshlennoj pererabotke na pergu i voskovoe syr'e [Text] / R.A. Mamonov, T.V. Torzhenova // Vestnik Ryazanskogo GAU im. P.A. Kostycheva. - 2013. - № 2. - S. 30-33.

14 Lykov, A.V. Theory of thermal conductivity [Text]: A.V. Lykov // -M.: Higher school. 1967. - 599 p.

15 Kieliszek, M. Pollen and bee bread as new health-oriented products: A review [Text] / M. Kieliszek, K. Piwowarek, A.M. Kot, S. Blazejak, A. Chlebowska-Smigiel, I. Wolska // Trends in Food Science and Technology. - 2020. - № 71. - P.170-180.

16 Shashkov, A.G. Methods for determining thermal conductivity and thermal diffusivity [Text]: A.G. Shashkov, G.M. Volkhov, T.N. Abramenko, V.P. Kozlov // -Moscow. Energy, 1973. - 336 p.

17 Baky, H. M. Bee Pollen and Bread as a Super-Food A Comparative Review of Their Merabolome Composition and Quality Assessment in the Context of Best Recovery Conditions [Text] / H. M. Baky, B.M. Abouelela, K. Wang, A.M. Farag // Molecules. - 2023. - № 28 (2). - P. 715.

18 Kondratyev, G.M. Regular thermal regime [Text]: G.M. Kondratyev / -M.: State Publishing House of Technical and Theoretical Literature. 1954. - 408 p.

19 Kondratyev, G.M. Thermal measurements [Text]: studies. handbook for universities / G.M. Kondratyev // - M. L.: from-in Mashgiz. 1957. - 244 p.

20 Chudnovsky, A.F. Thermophysical characteristics of dispersed materials [Text]: A.F. Chudnovsky. - M.: Fizmatgiz. 1962. - 407 p.

ШАРЛЫ БИКАЛОРИМЕТР ӘДІСІМЕН ПЕРГА ТҮЙІРШІКТЕРІНІҢ ЖЫЛУ-ФИЗИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН АНЫҚТАУ

Тойбазар Дәулет Мейірулы

Ауыл шаруашылығы ғылымдарының магистрі

Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті

E-mail: d.toibazar@gmail.com

Алматы қ., Қазақстан

Дауренова Индира Маликовна

Техника және технология магистрі

Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті

E-mail: indikow-88-kz@mail.ru

Алматы қ., Қазақстан

Сапарғали Айдана Жандосқызы

Магистр технических наук

Алматы технологиялық университеті

E-mail: s.a.zhandoskyzy@mail.ru

Алматы қ., Қазақстан

Хазимов Марат Жалелович

Техника ғылымдарының кандидаты

Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті

E-mail: mkhazimov@gmail.com

Алматы қ., Қазақстан

Ниязбаев Адильхан Кизатоллинович

PhD

Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті

E-mail: adil77@mail.ru

Алматы қ., Қазақстан

Түйін

Бұл жұмыс перга түйіршіктерінің ылғалдылығынан сусымалы күйдегі жылу-физикалық қасиеттерінің өзгеруін зерттеуге арналған. Ара нанының термиялық өңдеудің параметрлері мен режимдерін анықтау үшін оның жылу-физикалық сипаттамалары (жылу сыйымдылығы, жылу өткізгіштігі және температура өткізгіштігі) және тығыздығы зерттелді. Зерттеудің мақсаты ара нанының ылғалдылығынан жылу-физикалық сипаттамалары мен тығыздығы арасындағы функционалдық байланысты орнату болды. Термофизикалық қасиеттерін зерттеу үшін шарлы бикалориметр қолданылды. Зерттелетін материалдың шекараларында (сфера қабырғаларында) температуралық көрсеткіштері «Fluke» термометрінің көмегімен өлшенді, ал барлық үлгілердің ылғалдылығы стандартқа сәйкес сақтауға жарамды ылғалдың әртүрлі деңгейлері үшін «Sartorius MA-37» ылғал өлшегішінің көмегімен анықталды. Зерттеу нәтижелері ылғалдылығы 11,9% - дан 19,5% дейінгі ара нанының үлгілері үшін жылу-физикалық қасиеттерінің шегі: жылу өткізгіштігі 0,67-ден 0,96 Вт/(м•К) дейін, жылу сыйымдылығы 0,16-дан 0,28 кДж/(кг•К) дейін және температура өткізгіштігі $0,0356 \cdot 10^{-7}$ -ден $0,0372 \cdot 10^{-7}$ м²/с дейін өзгергендігін көрсетті.

Кілт сөздер: жылуфизикалық қасиеттер; шарлы бикалориметр; ара наны; жылу өткізгіштік; жылу сыйымдылық; температура өткізгіштік.

DETERMINATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF BEE BREAD GRANULES BY THE METHOD OF BALL BICALORIMETER

Toibazar Daulet

Master of Agriculture Sciences

Almaty University of Power Engineering and Telecommunications Gumarbek Daukeyev

E-mail: d.toibazar@gmail.com

Almaty, Kazakhstan

Daurenova Indira

Master of Technique and Technology

Kazakh National Agrarian Research University

E-mail: indikow-88-kz@mail.ru

Almaty, Kazakhstan

Sapargaly Aidana

Master of Engineering Science

Almaty university of technology

E-mail: s.a.zhandoskyzy@mail.ru

Almaty, Kazakhstan

Khazimov Marat

Candidate of Technical Sciences

Kazakh National Agrarian Research University

E-mail: mkhazimov@gmail.com

Almaty, Kazakhstan

Niyazbayev Adilkhan

PhD

Kazakh National Agrarian Research University

E-mail: adil77@mail.ru

Almaty, Kazakhstan

Abstract

This study is dedicated to investigating the changes in the thermophysical properties of perga granules in bulk state depending on their moisture content. In order to establish the parameters and modes of thermal treatment of bee bread, its thermophysical characteristics (specific heat capacity, thermal conductivity, thermal diffusivity and density) were studied. The aim of the research was to determine the functional relationship between the thermophysical characteristics and the density of bee pollen as a function of its moisture content. A spherical bicalorimeter was used to study the thermophysical properties. The temperature indicators of the material at its boundaries (on the sphere walls) were measured using a "Fluke" thermometer, while the moisture content of all samples was determined using a "Sartorius MA-37" moisture meter for various levels of moisture content suitable for storage according to the standard. The research results showed that for samples of bee bread with moisture content ranging from 11.9% to 19.5%, the thermophysical properties fall within the following ranges: thermal conductivity from 0.67 to 0.96 W/(m•K), specific heat capacity from 0.16 to 0.28 kJ/(kg•K), and thermal diffusivity from $0.0356 \cdot 10^{-7}$ to $0.0372 \cdot 10^{-7}$ m²/s.

Keywords: thermophysical properties; ball bicalorimeter; bee bread, thermal conductivity; heat capacity; thermal diffusivity.