

Исследование поверхностных свойств меда

Р. А. Мамонов^{1✉}, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Тыловое обеспечение уголовно-исполнительной системы»

Н. А. Грунин², преподаватель СПО

Т. В. Торженова³, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Экономическая безопасность, анализ и учет»

¹Академия ФСИН России

390000, г. Рязань, улица Сенная, дом 1., ✉ mamonov.agrotexnol@yandex.ru

²ФГБОУ ВО РГАТУ

390044, г. Рязань, улица Костычева, д. 1

³ФГБОУ ВО «РГРТУ»

390005, г. Рязань, улица Гагарина, д. 59/1.

Резюме. Совершенствование средств механизированного извлечения меда из восковой структуры сотов пчелосемей является актуальной проблемой, направленной на увеличение количества извлекаемого меда из сотов, снижение трудоемкости при эксплуатации оборудования и затрат энергии. Теоретическое описание процессов тепло- и массообмена возможно на основе поверхностных свойств материалов. Перенос меда в системе «медовый сот – медогонка» проходит через образование новых поверхностей вещества. Поверхностные свойства меда оказывают значительное влияние на энергетический баланс центробежного отделения меда из ячеек восковой основы сотов и в настоящее время недостаточно изучены. Поэтому целью исследования являлось определение числовых значений сил поверхностного натяжения капель меда и их адгезии к восковой поверхности пчелиного сота в температурных диапазонах откачки меда центробежным способом. В качестве объекта исследования был взят мед люцерны, собранный на пасеке в Рязанской области. Определение искомых величин базировалось на методах измерения нормальной силы отрыва при растяжении и отрыва капель от кончика капилляра. Представлены методика экспериментального исследования и лабораторные установки. Исследования подтверждают высокую корреляцию между температурой откачки меда и его поверхностными свойствами. Адгезия меда к восковой поверхности в диапазоне температур откачки меда составила 62,9...71,1 Н/м², поверхностное натяжение его капель – 79,4...92,4 мН/м.

Ключевые слова: извлечение, мед, воск, температура, адгезия, соты, поверхностное натяжение, энергия.

Для цитирования: Мамонов Р. А., Грунин Н. А., Торженова Т. В. Исследование поверхностных свойств меда // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 2 (74). С. 198-204. doi:10.18286/1816-4501-2026-2-198-204

Study of the honey surface properties

R. A. Mamonov^{1✉}, **N. A. Grunin**², **T. V. Torzhonova**³

¹ Academy of Law and Management of the Federal Penitentiary Service.

390000, Ryazan, Sennaya Street, 1, ✉ mamonov.agrotexnol@yandex.ru

² FSBEI HE Ryazan State Agricultural Technical University

390044, Ryazan, Kostychev Street, 1,

³ FSBEI HE Ryazan State Agricultural Technical University

390005, Ryazan, Gagarin Street, 59/1

Abstract. Improvement of mechanized honey extraction from the wax structure of bee colonies is a current issue, aimed at increasing the yield of honey extracted from the combs, reducing equipment operating labour and reducing energy costs. Heat and mass transfer processes can be theoretically described based on the surface properties of the materials. Honey transfer in the "honeycomb-extractor" system occurs through formation of new material surfaces. The surface properties of honey significantly influence the energy balance of centrifugal separation of honey from the cells of the wax base of the comb and are currently insufficiently studied. Therefore, the aim of this study was to determine the surface tension forces of honey droplets and their adhesion to the wax surface of the honeycomb within the temperature ranges of centrifugal honey extraction. Alfalfa honey collected from an apiary in the Ryazan region served as the subject of the study. The specification of the desired quantities was based on the methods for measuring the normal tensile detachment force and the detachment of droplets from the tip of a capillary. The experimental study methodology and laboratory device are presented. The studies confirm a strong correlation between honey extraction temperature and its surface properties. The adhesion of honey to the wax surface in the range of honey extraction temperatures was 62.9–71.1 N/m² and the surface tension of its droplets – 79.4...92.4 mN/m.

Keywords: extraction, honey, wax, temperature, adhesion, honeycomb, surface tension, energy.

For citation: Mamonov R. A., Grunin N. A., Torzhenova T. V. Study of the honey surface properties // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.2 (74): 198-204 doi:10.18286/1816-4501-2026-2-198-204

Введение

Самым распространённым продуктом в отрасли пчеловодства является мед. В повседневной жизни мед используют для поддержания иммунитета, повышения активности, также его используют в кулинарии, медицине, при приготовлении винных напитков. В 2023 г., без учета содержащихся у пчеловодов-любителей, в России насчитывалось около 2,7 миллиона пчелиных семей. По данным Министерства сельского хозяйства России за этот год получено более 57 тыс. т меда.

Превращение нектара в мед и дальнейшее его хранение в виде углеводного кормового запаса происходит в восковых ячейках сотов. Ячейки с созревшим медом пчелы укупоривают восковыми крышечками, тем самым герметизируют его от окружающей среды. Созревание и хранение меда в ульях происходит при температуре 35...40 °C [1, 2].

Примерно 80...85 % меда в нашей стране реализуется отдельно от сотов. Извлечение меда из пчелиных сот пчеловоды осуществляют центрифугированием на медогонках.

Монофлерный (мономёд, собранный с одного вида растений) и полифлерный (собранный с нескольких видов растений) мёды представляют собой дисперсную систему. Связующую основу системы составляют фруктоза, глюкоза и вода [3, 4, 5]. Дисперсную систему наполняют ароматические (эфирные) масла, летучие органические кислоты, пыльцевые зерна различного ботанического происхождения [6, 7].

Процесс извлечения меда происходит на границе раздела фаз:

- жидкий мед течет и смачивает твердую восковую поверхность ячейки;
- изменяется форма поверхности раздела меда и окружающей воздушной среды в ячейке;
- мед выводится в виде капель с изменением формы поверхности раздела с окружающей воздушной средой.

Наличие пыльцевых зерен, кислот, масел, воды придает меду новые свойства, которые наиболее заметно проявляются в поверхностном слое. Именно состояние поверхностных слоев определяет характер взаимодействия меда, воска и воздушной среды, а также и энергоёмкость процесса извлечения.

Цель исследования – определение числовых значений сил поверхностного натяжения капель меда и их адгезии к восковой поверхности пчелиного сота в температурных диапазонах откачки меда центробежным способом.

Материалы и методы

В хордиальных центрифугах силой, извлекающей мед из восковых ячеек сотов, является равнодействующая F_l от центробежной силы инерции $F_{цб}$ и силы тяжести F_t (рис. 1).

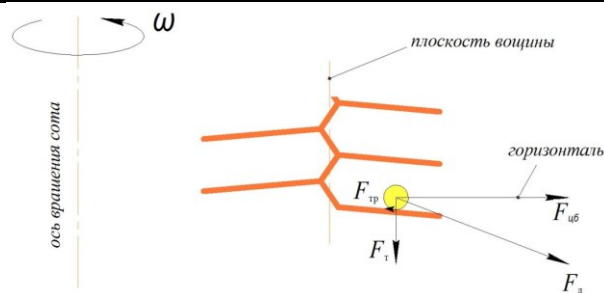


Рис. 1. Силы, действующие при извлечении меда из сотов: $F_{тр}$ – сила трения

В начальный момент времени система «воск-мед-воздух» является гетерогенной, так как фазы имеют сравнительно большие удельные поверхности. При каплеобразовании размер частиц меда уменьшается, что приводит к увеличению поверхности раздела и поверхностной энергии.

На границе раздела «мед-воздух» силы межмолекулярного взаимодействия оказываются в значительной степени большими со стороны меда. В результате поверхностные молекулы втягиваются внутренними молекулами капли меда. Это приводит к уменьшению удельной поверхности и возникновению внутреннего давления в изолированном объеме меда, поверхность которого стремится уменьшиться до минимально возможных размеров.

Передаваемая кинетическая энергия объему меда в ячейке сота совершает работу против сил внутреннего давления, деформирует жидкую фазу, увеличивая площадь поверхности, и изменяет поверхностную энергию системы.

Результатом диспергирования меда является увеличение роли поверхностных свойств в общих свойствах системы и одновременное увеличение абсолютного значения поверхностной энергии.

Таким образом, механическая энергия вращающегося ротора центрифуги расходуется на преодоление сил инерции, трения и преобразуется в избыточную энергию у поверхности раздела фаз «мед-воздух».

Система будет стремиться к уменьшению величины полной поверхностной энергии (изменяя форму и кривизну межфазной поверхности) и поверхностного натяжения.

Поверхностное натяжение можно представить как энергию переноса молекул из объема на поверхность меда или как работу образования единицы поверхности.

Полную поверхностную энергию (внутреннюю энергию поверхностного слоя) U_s , Дж, рассчитывают с помощью уравнения Гиббса-Гельмгольца [8]:

$$U_s = \left[\sigma - T \left(\frac{d\sigma}{dT} \right) \right] s, \quad (1)$$

где σ – поверхностное натяжение капли меда, Н/м; T – температура капли меда, К; s – площадь поверхности капли меда (площадь межфазного раздела), м²; $d\sigma/dT$ – температурный коэффициент поверхностного натяжения, Дж/(м²·К).

Запишем уравнение (1), используя теплоту образования единицы поверхности:

$$U_s = (\sigma + q_s)s. \quad (2)$$

Поверхностное натяжение можно представить как частную производную от поверхностной энергии Гиббса по площади поверхности капли меда при постоянных количествах вещества, температуре, давлении и заряде:

$$\sigma = \left[\frac{\partial G}{\partial s} \right]_{n_i, T, p, q}. \quad (3)$$

Поверхностное натяжение является результатом нескомпенсированности межмолекулярного взаимодействия в разных фазах, поэтому оно определяется разностью энергий взаимодействия молекул внутри каждой фазы и взаимодействия молекул различных фаз.

Экспериментально легко осуществить условия постоянства $T = \text{const}$ и $p = \text{const}$.

Цель исследования – изучение влияния температуры меда на его адгезию к восковой основе сотов и силу поверхностного натяжения капель меда.

Для проведения исследований в лабораторных условиях использовали мед, собранный с люцерны среднейрусской породой пчел в Рязанском районе Рязанской области на пасеке Рязанского агротехнологического университета в 2023 г.

Программа исследований состояла из двух этапов. Первый этап заключался в исследовании межфазного взаимодействия поверхностного слоя меда и поверхности воска. Величина взаимодействия характеризуется отношением предельного сопротивления разрыва фаз к единице площади соприкасающихся поверхностей.

После анализа различных способов измерения адгезии (сдвиг, отслаивание, отрыв) был выбран метод определения нормальной силы отрывом при растяжении [9, 10]. Для проведения эксперимента была разработана лабораторная установка (адгезиометр) (рис. 2).

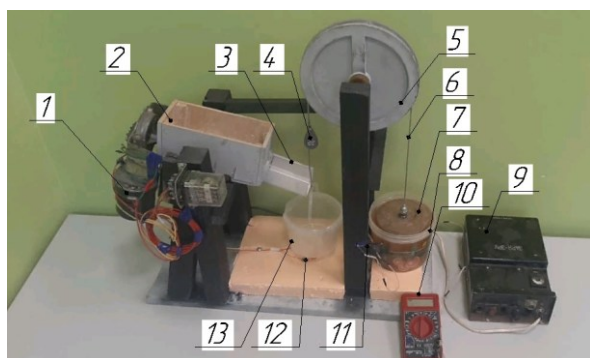


Рис. 2. Лабораторная установка для определения межфазного взаимодействия меда и воска:

1 – электродвигатель; 2 – дозатор; 3 – лоток; 4 – уравновешивающий груз; 5 – блок; 6 – трос; 7 – диск с восковой поверхностью; 8 – контейнер; 9 – источник питания; 10 – мультиметр; 11 – датчик температуры; 12 – герконовый контакт, 13 – емкость.

Лабораторная установка состоит из контейнера 8 с медом, дозатора груза 2 с электродвигателем 1, блока 5, через который перекинут трос 6. К одному концу троса прикреплен металлический диск 7 с

нанесенным методом окунания восковым слоем, к другому – емкость 13.

Для стабилизации температуры межфазного взаимодействия лабораторную установку в ходе опыта помещали в термокамеру (рис. 3).

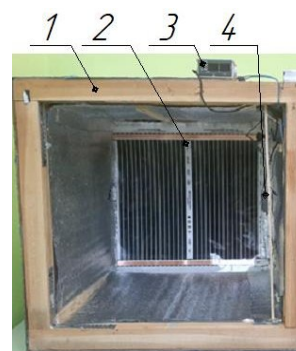


Рис. 3. Термокамера без светопрозрачной крышки:

1 – корпус из полиуретана; 2 – электронагревательный элемент; 3 – терморегулятор; 4 – датчик температуры

Температуру меда в контейнере 8 контролировали с помощью мультиметра 10 по сопротивлению датчика температуры 11. При стабилизации заданной температуры меда в контейнере 8 включали электропривод 1 дозатора сыпучего груза 2. Груз равномерным потоком через лоток 3 заполнял емкость 13 и через трос 6 увеличивал сопротивление межфазного взаимодействия поверхностного слоя «мед-восковая поверхность» диска 7. Под предельной нагрузкой механическая система «диск-трос-емкость» приходила в движение. На дне емкости 13 был прикреплен постоянный магнит, который при опускании емкости 13 магнитным полем через герконовый контакт 12 размыкал электрическую цепь электропривода 1 дозатора 2.

Нормальную силу отрыва поверхностного слоя определяли через взвешивание сыпучего груза в емкости 13. Адгезионное взаимодействие меда с восковой поверхностью, H/m^2 , определяли по формуле:

$$L = \frac{M_{\text{гр}} \cdot g}{S_d}, \quad (4)$$

где $M_{\text{гр}}$ – масса груза в емкости, кг; g – ускорение свободного падения, m/s^2 ; S_d – площадь диска, m^2 .

На втором этапе было проведено исследование приведенной силы и энергии натяжения поверхностного слоя капли меда в воздушной среде.

Проанализировав различные методы измерения и определения поверхностного натяжения материалов (метод Ребиндера максимального давления в пузырьке воздуха, метод отрыва кольца, метод поднятия вещества по капиллярным трубкам и другие), был выбран статический метод отрыва капели от кончика капилляра в газовой среде [11, 12, 13].

Метод заключается в определении количества капели, образующихся при одинаковых условиях из

одинакового объема эталонной и исследуемой жидкой фазы. В качестве эталонной жидкости была взята дистиллированная вода.

Поверхностное натяжение меда определяли по формуле:

$$\sigma_M = \sigma_0 \frac{\rho_M \cdot n_0}{\rho_0 \cdot n_M}, \quad (5)$$

где σ_0 , σ_M – поверхностное натяжение эталонной и исследуемой фаз соответственно, Н/м; ρ_0, ρ_M – плотность эталонной и исследуемой фаз соответственно, кг/м³; n_0, n_M – количество капель эталонной и исследуемой фаз соответственно.

Лабораторная установка (рис. 4 а) состояла из штатива 1, градуированного стеклянного капилляра 9, пипетатора (пипеточного дозатора) 6, микрометрического привода 5 с кронштейном 4, датчика температуры меда 10 в теплоизоляторе 11 и мультиметра 7.

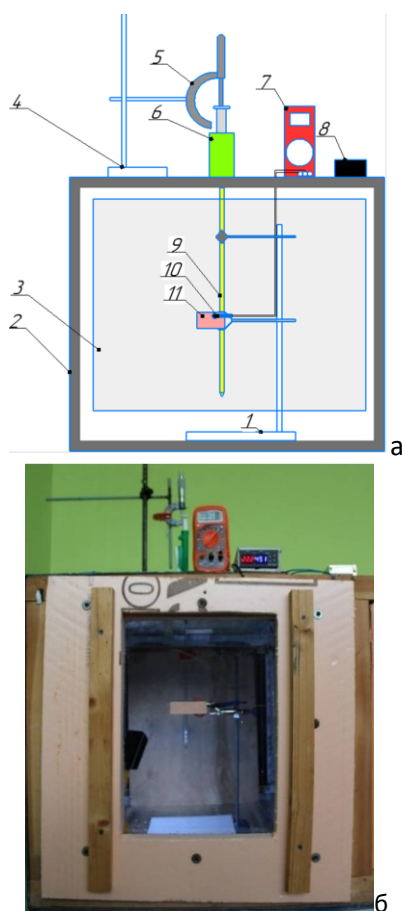


Рис. 4. Лабораторная установка для определения поверхностного натяжения капли меда при различных температурах:

а – схема; б – общий вид; 1 – штатив; 2 – термокамера; 3 – элемент нагревательный; 4 – кронштейн; 5 – микрометрический привод; 6 – пипетатор; 7 – мультиметр; 8 – регулятор температуры; 9 – капилляр; 10 – датчик температуры меда; 11 – теплоизолятор

В капилляр 9 набирали 5 мл меда с помощью пипетатора 6. С целью уменьшения погрешности измерений температуры меда, к стенке капилляра 9 был

закреплен датчик температуры меда 10 через теплоизолятор 11. При достижении заданной температуры меда вращали ручку микрометрического привода 5, перемещая шпindel микрометрического винта с поршнем пипетатора 6, создавая равномерное давление в капилляре 9 и выдавливая из него капли. Скорость каплеобразования выдерживали в пределах одной капли в течение минуты.

Для визуального контроля хода проведения опыта дверь термокамеры была оснащена одноклапным стеклопакетом (рис. 4 б).

Далее выполняли визуальный подсчет количество капель, образовавшихся из 5 мл жидкости при заданных параметрах эксперимента. Выдавливание одинакового объема жидкости осуществляли за счет одинакового количества оборотов микрометрического винта приводом 5 и контролировали визуально по градуированным делениям капиллярной трубки.

В ходе исследования были определены плотность меда и средняя масса капель. Значимость рассчитывали для $P < 0,05$. Содержание влаги в исследуемом сорте меда не превышало стандартного предела ($< 20\%$).

Результаты

После обработки экспериментальных данных была получена зависимость межфазного взаимодействия меда с восковой поверхностью от температуры (рис. 5).

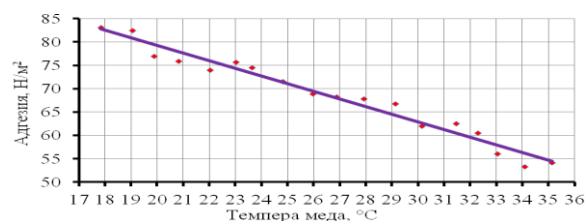


Рис. 5. Зависимость адгезии мёда с поверхностью воска от температуры

Анализ графической зависимости (рис. 5) показал, что при повышении температуры мёда с 17 °С до 35 °С его межфазное взаимодействие с восковой поверхностью снижается с 82,77 Н/м² до 54,52 Н/м².

Полученные значения критерия Фишера $F_{эмп} = 461,1$ превышает критическое значение $F_{кр} = 4,5$, поэтому можно сделать вывод, что выявленная закономерность не является случайной и зависит от многих факторов. При этом коэффициент детерминации между адгезией и температурой мёда довольно высок: $R^2 = 0,966$.

При проведении второй части исследований по определению поверхностного натяжения капли меда при различных температурах были получены следующие результаты (рис. 6).

С увеличением температуры мёда с 20 °С до 40 °С поверхностное натяжение растёт с $67,22 \cdot 10^{-3}$ Н/м до $115,36 \cdot 10^{-3}$ Н/м. Расчетный критерий Фишера $F_{эмп} = 84,82$, что больше критического показателя $F_{кр} = 10,13$. В результате можно сделать вывод, что с

увеличением температуры мёда коэффициент поверхностного натяжения увеличивается.

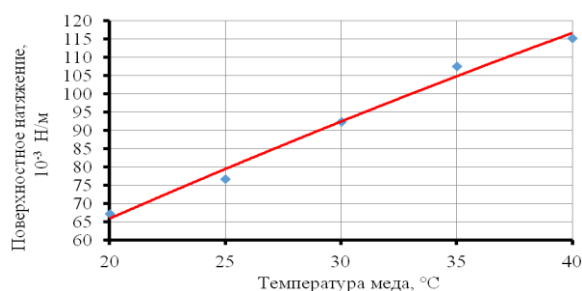


Рис. 6. Зависимость поверхностного натяжения капли мёда от его температуры

Анализируя влияние температуры мёда на поверхностную энергию Гиббса (рис. 7), можно сказать, что зависимость имеет нелинейный характер. При увеличении температуры с 20 °C до 40 °C поверхностная энергия Гиббса капле мёда увеличивается с $7,86 \cdot 10^{-6}$ Дж до $9,25 \cdot 10^{-6}$ Дж. Экспоненциальный характер зависимости связан с сильным влиянием температуры на массу образующихся капель [14].

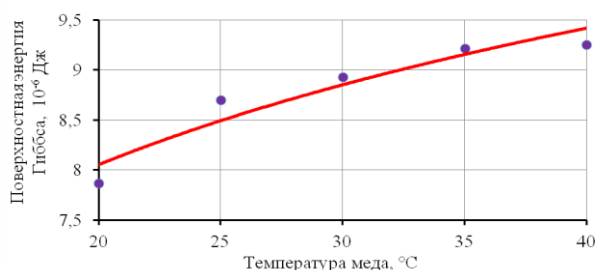


Рис. 7. Графическая зависимость энергии поверхностного натяжения капли мёда от температуры

Запасы мёда у пчел располагаются в восковых ячейках сотов. Площадь поверхности мёда в ячейке сота складывается из площадей трех поверхностей: трехгранной пирамидки вошины (средостения сота), шестигранной призмы основной части восковой ячейки и шестигранной поверхности, образованной при распечатывании ячеек сота с отделением забруса.

Площадь поверхности мёда в восковой ячейке

$$S_{\text{яч}} = S_{\text{пир}} + S_{\text{пр}} + S_{\text{шест}} = \frac{0,25 l_{\text{яч}}^2}{\cos \varphi} + 6 l_{\text{яч}} H + 4,5 \sqrt{3} \cdot l_{\text{яч}}^2,$$

где $S_{\text{пир}}$ – площадь боковых граней пирамидки вошины, м^2 ; $S_{\text{пр}}$ – площадь граней шестигранной призмы, м^2 ; $S_{\text{шест}}$ – площадь поперечного сечения шестигранной призмы, м^2 ; $l_{\text{яч}}$ – длина стороны шестигранной ячейки, м; φ – угол между гранью пирамиды и основанием, град.; H – глубина ячейки, м.

Площадь поверхностного слоя мёда в ячейке сота, полученного из вошины «полумаксимум» [15], будет равна $197,6 \text{ мм}^2$.

Используя выражение $G_s = \sigma S$, можно найти отношение суммарной поверхностной энергии капле к поверхностной энергии мёда в ячейке сота (рис. 8).

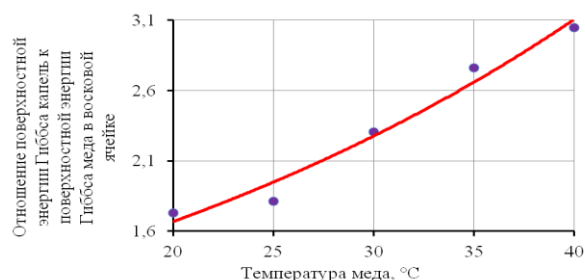


Рис. 8. Зависимость отношения суммарной поверхностной энергии капле к поверхностной энергии мёда в ячейке сота от температуры

Мед из сотов в промышленных условиях извлекают при температуре 25...30 °C [2, 3]. При диспергировании мёда из восковой ячейки центробежным способом суммарная поверхностная энергия Гиббса капле мёда увеличится в 1,8...2,3 раза.

Обсуждение

Процесс извлечения мёда из ячеек пчелиных сотов связан с образованием новых поверхностей и поверхностным взаимодействием с твердой поверхностью восковой основы и газообразной средой окружающего воздуха.

Проведенные исследования и анализ научной литературы выявили значительное влияние температуры мёда и окружающих сред на поверхностные свойства и энергию образования новой поверхности частицы мёда.

Как и следовало ожидать, поверхностная адгезия мёда к восковой поверхности с ростом температуры уменьшается. Характер зависимости схож с результатами исследований адгезии мёда к поверхности пищевой нержавеющей стали [16].

В исследованиях М.В. Balasubramanyam среднее значение поверхностного натяжения сырого мёда при температуре 30 °C составило 98,03...99,13 дин/см [5], а А.Т. Туоуиа получил значение 80,1 мН/м при той же температуре [17]. Значение поверхностного натяжения, полученное Рахимовым А.А. и Самигулиным Д.А. при температуре 25 °C, составляет 56,5 мН/м [18]. Полученные данные хорошо коррелируются с результатами других исследований, а отклонения поверхностного натяжения связаны с особенностями химического состава мёда, полученного с медоносов различных климатических зон и разными породами пчел.

Эмпирическими исследованиями установлено, что для центробежного извлечения 1,306 кг мёда из одной среднестатистической магазинной рамки улья необходимо передать системе «воск-мед-воздух» не менее 0,031 Дж энергии для превращения его в каплю.

Заключение

Эффективность и полнота извлечения меда из восковой сотовой структуры напрямую зависит от поверхностных свойств контактирующих веществ. Современные медогонки не позволяют полностью осушить сот от меда, а применяемые для преодоления сил межмолекулярного взаимодействия меда и воска предельные кинематические режимы вращения ротора способны разрушить структуру сота и исключить его повторное использование в технологии содержания пчел.

Наибольшее влияние на поверхностные свойства меда оказывает его температура. Адгезия меда люцерны к воску в температурном диапазоне извлечения составляет 62,89...71,1 Н/м², удельная сила поверхностного натяжения частицы меда находится в пределах 0,067...0,115 Н/м, поверхностная энергии Гиббса – (7,86...9,25)·10⁻⁶ Дж. Полученные численные значения могут быть использованы при теоретическом обосновании конструктивно-кинематических параметров совершенствуемых конструкций центробежных медогонки.

Литература

1. Касьянов А. И., Лапынина Е. П., Савушкина Л. Н. Термогенез и температурный режим нуклеуса среднерусских пчел // Пчеловодство. 2023. № 2. С. 18-20.
2. Симанков М. К. Факторы, влияющие на температуру и влажность воздуха в улье // Пчеловодство. 2023. № 8. С. 14-15.
3. Есенкина С. Н. Биологически активные компоненты меда // Пчеловодство. 2022. № 8. С. 51-52.
4. Качественная оценка мёда с пасек тюменской области / С. А. Пашаян, К. А. Сидорова, М. В. Калашникова и др. // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2023. № 4 (68). С. 150-154.
5. Balasubramanyam M.V. Evaluation of multifloral honey of indigenous giant bee *Apis Dorsata* F. and hive bee *Apis Cerana Indica* of western ghats of Karnataka // International Journal of Green and Herbal Chemistry. 2023. Vol. 12. No. 1. P. 29-35.
6. Nutritional composition of honey: implications for human health and disease prevention / B. Gupta, Kh. J. Devi, Ph. S. Chanu, Set al. // Agriculture Archives. 2024. T. 3. No. 3. P. 1-5.
7. Characterization of botanical origin of italian honey by carbohydrate composition and volatile organic compounds (VOCS) / R. Tedesco, E. Scalabrin, V. Malagnini, et al. // Foods. 2022. Vol. 11. No. P. 2441.
8. Исследование размерных зависимостей температур плавления и кристаллизации и удельной избыточной поверхностной энергии наночастиц никеля вблизи фазового перехода плавление/кристаллизация / П. М. Ершов, А. Ю. Колосов, В. С. Мясниченко и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова,

Н.Ю. Сдобнякова. Тверь: Твер. гос. ун-т, 2018. Вып. 10. С. 242-251.

9. Муратова Е. И. Артамонова Е. В. Исследование влияния режимов темперирования на реологические свойства меда // Вестник ТГТУ. 2008. Том 14. № 3. С. 664-665.

10. Тимошенко Н. В., Патиевой А. М., Нестеренко А. А. Методические указания к лабораторно-практическим работам по дисциплине «Реология» для бакалавров, обучающихся по направлению 35.03.07 «Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции». Краснодар: КубГАУ, 2018. 75 с.

11. A simple formula for the estimation of surface tension from two length measurements for a sessile or pendant drop / S. Hutzler, J.C. F. Ryan-Purcell, F.F. Dunne, et al. // Phil. Mag. Lett. 2018. 98 (1). P. 9-16.

12. Oroian M. Measurement, prediction and correlation of density, viscosity, surface tension and ultrasonic velocity of different honey types at different temperatures // Journal of Food Engineering. 2013. 119(1). P. 167-172.

13. Lee B. B., Ravindra P., Chan E. S. New drop weight analysis for surface tension determination of liquids // Colloids Surf A: Physicochem Eng Asp. 2009. 332(2-3). P. 112-120.

14. Масса капель мёда в зависимости от температуры и скорости его течения по восковой поверхности / В. Ф. Некрашевич, Р. А. Мамонов, А. М. Афанасьев и др. // Пчеловодство. 2018. № 4. С. 46-47.

15. Верещагин А. Н., Петухов А. В. Геометрия ячеек вошины // beejournal.ru – URL: <https://beejournal.ru/uchenomu/inventar-i-oborudovanie/1250-geometriya-yacheek-voshchiny> (дата обращения: 25.02.25).

16. Свойства меда и сотов, необходимые для конструирования комплексного агрегата / Р. А. Мамонов, А. М. Афанасьев, М. Ю. Афанасьев и др. // Пчеловодство. 2017. № 7. С. 43-45.

17. Tyowua A.T., Echendu A.M., Adejo S.O. Influence of particle fluorination on the stability of honey foam // Front. Soft Matter. 2023. doi:10.3389/frsfm.2023.1163393, P. 1-11.

18. Рахимов А. А., Самигуллин Д. А. Изучение реологических и поверхностных свойств мёда // Прикладная механика и техническая физика. 2025. № 2(390). С. 110-121.

References

1. Kasyanov A. I., Lapynina E. P., Savushkina L. N. Thermogenesis and temperature regime of the nucleus of the Central Russian bees // Beekeeping. 2023. No. 2. P. 18-20.
2. Simankov M. K. Factors influencing the temperature and humidity of the air in the hive // Beekeeping. 2023. No. 8. P. 14-15.
3. Yesenkina S. N. Biologically active components of honey // Beekeeping. 2022. No. 8. P. 51-52.
4. Qualitative assessment of honey from apiaries in the Tyumen region / S. A. Pashayan, K. A. Sidorova, M. V.

Kalashnikova, et al. // Vestnik of the Bashkir State Agrarian University. 2023. No. 4 (68). P. 150-154.

5. Balasubramanyam M.V. Evaluation of multifloral honey of indigenous giant bee *Apis dorsata* F. and hive bee *Apis cerana indica* of western ghats of Karnataka // International Journal of Green and Herbal Chemistry. 2023. Vol. 12. No. 1. P. 29-35.

6. Nutritional composition of honey: implications for human health and disease prevention / B. Gupta, Kh. J. Devi, Ph. S. Chanu, Set al. // Agriculture Archives. 2024. Vol. 3. No. 3. P. 1-5.

7. Characterization of botanical origin of Italian honey by carbohydrate composition and volatile organic compounds (VOCS) / R. Tedesco, E. Scalabrin, V. Malagnini, et al. // Foods. 2022. Vol. 11. No. P. 2441.

8. Study of size dependences of melting and crystallization temperatures and specific excess surface energy of nickel nanoparticles near the melting/crystallization phase transition / P. M. Ershov, A. Yu. Kolosov, V. S. Myasnichenko, et al. // Physicochemical aspects of the study of clusters, nanostructures, and nanomaterials: interuniversity collection of scientific papers / edited by V. M. Samsonov, N. Yu. Sdobnyakov. Tver: Tver state University, 2018. Issue 10. P. 242-251.

9. Muratova E. I., Artamonova E. V. Study of the influence of tempering regimes on rheological properties of honey // Vestnik of TSTU. 2008. Vol. 14. No. 3. P. 664-665.

10. Timoshenko N. V., Patievoy A. M., Nesterenko A. A. Methodical instructions for laboratory and practical work in the subject "Rheology" for bachelors studying according to educational program 35.03.07 "Technology of production and processing of agricultural products". Krasnodar: KubSAU, 2018. 75 p.

11. A simple formula for the estimation of surface tension from two length measurements for a sessile or pendant drop / S. Hutzler, J.C. F. Ryan-Purcell, F.F. Dunne, et al. // Phil. Mag. Lett. 2018. 98 (1). P. 9-16.

12. Oroian M. Measurement, prediction and correlation of density, viscosity, surface tension and ultrasonic velocity of different honey types at different temperatures // Journal of Food Engineering. 2013. 119 (1). P. 167-172.

13. Lee B. B., Ravindra P., Chan E. S. New drop weight analysis for surface tension determination of liquids // Colloids Surf A: Physicochem Eng Asp. 2009. 332 (2-3). P. 112-120.

14. Mass of honey droplets depending on temperature and flow velocity on a wax surface / V. F. Nekrashevich, R. A. Mamonov, A. M. Afanasyev et al. // Beekeeping. 2018. No. 4. P. 46-47.

15. Vereshchagin A. N., Petukhov A. V. Geometry of wax foundation cells // beejournal.ru – URL: <https://beejournal.ru/uchenomu/inventar-i-oborudovanie/1250-geometriya-yacheek-voshchiny> (access date: 25.02.25).

16. Properties of honey and combs necessary for design of a complex unit / R. A. Mamonov, A. M. Afanasyev, M. Yu. Afanasyev, et al. // Beekeeping. 2017. No. 7. P. 43-45.

17. Tyowua A. T., Echendu A. M., Adejo S. O. Influence of particle fluorination on the stability of honey foam // Front. Soft Matter. 2023. doi:10.3389/frsfm.2023.1163393, P. 1-11.

18. Rakhimov A. A., Samigullin D. A. Study of rheological and surface properties of honey // Applied Mechanics and Technical Physics. 2025. No. 2(390). P. 110-121.