4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

doi:10.18286/1816-4501-2026-3-227-234
УДК 638.171

Аналитическое исследование процесса очистки воскового сырья

Д. Е. Каширин[1]✉**,** доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение, энергетика и автоматизация в агропромышленном комплексе»

В. В. Павлов[1]**,** кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение, энергетика и автоматизация в агропромышленном комплексе»

А. А. Курочкин[2]**,** доктор технических наук, профессор кафедры «Пищевые производства»

В. И. Курдюмов[3], доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева»

390044, Рязанская область, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1, ✉kadm76@mail.ru

[2]ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», 440039, г. Пенза, проезд Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11

[3]ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

432000, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1

Резюме. Приведено теоретическое обоснование режимов перемешивания в воде воскового сырья в процессе его очистки от органических загрязнений, прежде всего перги, на основе их диспергирования и растворения в водной среде при интенсивном механическом перемешивании. Рассматриваемая технология ориентирована на предварительную очистку воскового сырья до стадии его тепловой переработки и направлена на повышение выхода и качества пчелиного воска за счёт предотвращения перехода расплавленного воска в связанное состояние. В основу исследования положен анализ физической природы массообменных процессов, протекающих на поверхности твёрдых органических частиц в жидкости с использованием положений пленочно-пенетрационной теории. Предложена математическая модель процесса диспергирования загрязняющих компонентов, основанная на представлении массообмена как одномерной диффузии через пограничный слой, формирующийся на поверхности растворяемых частиц. Модель учитывает влияние гидродинамических условий, определяемых интенсивностью механического перемешивания, на толщину пограничного слоя и, соответственно, на скорость переноса вещества в объём жидкости. Для описания кинетики процесса получено аналитическое выражение, позволяющее определить остаточную концентрацию нерастворённых органических загрязнений в зависимости от времени перемешивания и энергетических параметров процесса. Полученные результаты могут быть использованы при расчете и проектировании перемешивающих аппаратов и установок для очистки сыпучих материалов, в том числе воскового сырья в измельченном состоянии.

Ключевые слова: воск, восковое сырье, перга, органические загрязнения, очистка, механическое перемешивание, растворение, диспергирование.

Для цитирования: Аналитическое исследование процесса очистки воскового сырья / Д. Е. Каширин, В. В. Павлов, А. А. Курочкин и др. // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 3 (75). С. 227-234. doi:10.18286/1816-4501-2026-3-227-234

Analytical study of the wax raw material purification process

D. E. Kashirin[1]✉**, V. V. Pavlov**[1]**, A. A. Kurochkin**[2]**, V. I. Kurdyumov**[3]

1 FSBEI HE Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev

390044, Russia, Ryazan, Ryazan Region, Kostycheva St., 1

✉kadm76@mail.ru

[2] FSBEI HE Penza State Technological University

440039, Russia, Penza, Baidukova Passage / Gagarina St., 1a/11

[3] FSBEI HE Ulyanovsk State Agrarian University

432000, Russia, Ulyanovsk, Novyi Venets Blvd., 1

Abstract. The paper presents a theoretical justification for the parameters of mixing wax raw materials in water during the purification process—specifically the removal of organic impurities such as bee bread—based on the dispersion and dissolution of these impurities in an aqueous medium under intense mechanical agitation. The technology in question focuses on the preliminary purification of wax raw materials prior to thermal processing and aims to increase the yield and quality

of beeswax by preventing the molten wax from entering a bound state. The study is based on an analysis of the physical nature of mass transfer processes occurring at the surface of solid organic particles in liquid, utilizing the principles of film-penetration theory. A mathematical model for the dispersion of impurity components is proposed; this model represents mass transfer as one-dimensional diffusion through a boundary layer formed on the surface of the dissolving particles. The model accounts for the influence of hydrodynamic conditions—determined by the intensity of mechanical agitation—on the thickness of the boundary layer and, consequently, on the rate of mass transfer into the bulk liquid. An analytical expression has been derived to describe the process kinetics, enabling the determination of the residual concentration of undissolved organic impurities based on mixing time and the process energy parameters. The results obtained can be applied to the calculation and design of mixing apparatus and systems for purifying granular materials, including crushed wax raw materials.

Keywords: wax, wax raw material, bee bread, organic impurities, purification, mechanical mixing, dissolution, dispersion.
For citation: Analytical study of the wax raw material purification process / D. E. Kashirin, V. V. Pavlov, A. A. Kurochkin, et al. // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.3 (75): 227-234 doi:10.18286/1816-4501-2026-3-227-234

Введение

Натуральный воск – один из важнейших продуктов пчеловодства, широко применяемых в пищевой, фармацевтической, косметической и технической промышленности. Его физико-химические свойства и потребительская ценность в значительной степени определяются степенью чистоты и отсутствием органических и механических примесей [1, 2].

В условиях пасечного и промышленного производства воск получают путём термической переработки (перетопки) воскового сырья, осуществляемой двумя способами – сухим или влажным [3, 4]. При этом исходное восковое сырьё, как правило, содержит значительное количество загрязняющих компонентов: пергу, прополис, остатки коконов и ульевой сор.

Наличие органических загрязнений в структуре сотов оказывает негативное влияние на процесс вытопки воска [5]. В ходе тепловой обработки расплавленный воск активно взаимодействует с загрязняющими компонентами, адсорбируется ими и частично переходит в связанное состояние. Это приводит не только к снижению количественного выхода воска, но и к ухудшению его качественных показателей, таких как цвет, запах и степень однородности. Особенно остро данная проблема проявляется при переработке вторичного воскового сырья [6, 7, 8], а также в случаях применения механизированных технологий извлечения перги, при которых образуется воскоперговый ворох с высоким содержанием мелкодисперсных органических примесей [9, 10].

Анализ существующих технологических решений показал, что большинство применяемых в настоящее время способов очистки ориентировано на обработку уже полученного воска. К ним относят отстаивание расплавленного воска над горячей водой, фильтрацию и отбеливание. Однако такие методы требуют значительных трудозатрат, не всегда обеспечивают полное удаление загрязнений и зачастую приводят к получению технического несортового воска. В этой связи представляется целесообразным смещение акцента с очистки готового продукта на предварительную очистку воскового сырья до стадии его тепловой переработки [11].

С физической точки зрения процесс удаления перги и других органических загрязнений из воскового сырья при обработке в водной среде может быть рассмотрен как процесс диспергирования и растворения твёрдых частиц под действием гидродинамических факторов [12, 13]. Интенсивное механическое перемешивание приводит к разрушению связей между восковыми структурами и загрязняющими компонентами, интенсифицирует массообмен и ускоряет перенос частиц твёрдой фазы в объём жидкости. При этом ключевую роль в формировании кинетики процесса играет пограничный слой, формирующийся на поверхности растворяемых частиц, через который осуществляется перенос вещества [14, 15].

Несмотря на наличие экспериментальных исследований, посвящённых очистке воскового сырья, теоретическое описание процессов диспергирования органических загрязнений при интенсивном механическом перемешивании в водной среде остаётся недостаточно проработанным. Отсутствие аналитических зависимостей, связывающих энергетические параметры процесса перемешивания, время обработки и степень очистки, затрудняет обоснование рациональных режимов работы оборудования и снижает эффективность проектирования специализированного оборудования.

Цель исследования – разработка математической модели процесса диспергирования органических загрязнений при очистке воскового сырья в водной среде путем перемешивания лопастной мешалкой с электроприводом. В основу теоретических исследований численных расчетов взята достаточно хорошо разработанная пленочно-пенетрационная теория массообмена [16, 17]. С учетом принятых допущений она позволяет установить количественную связь между интенсивностью перемешивания, временем процесса растворения и степенью растворения, характеризуемой показателем остаточной концентрации нерастворившихся твердых частиц в водной смеси. Решение данной задачи позволяет создать научно обоснованную базу для расчёта и оптимизации технологических параметров процессов предварительной очистки воскового сырья.

Материалы и методы

Процессы растворения и диспергирования твёрдых частиц в жидкой среде относят к числу классических задач теории массообмена, которые подробно рассмотрены в работах, посвящённых тепло- и

массообмену, гидродинамике и теории перемешивания [12, 18, 19].

Существенный вклад в развитие данных представлений внесли исследования, основанные на введении понятия пограничного слоя, формирующегося на поверхности твёрдого тела, растворяющегося или диспергирующегося в жидкости. Согласно данным работам, именно в пределах пограничного слоя осуществляется основной перенос вещества из твёрдой фазы в объём жидкости.

В общем случае в пограничном слое различают скоростной (конвекционный) и диффузионный подслои. Их соотношение и характер взаимодействия определяются режимом обтекания частицы потоком жидкости и, в частности, числом Рейнольдса.

При большом числе Рейнольдса конвективный перенос преобладает над диффузионным. При этом толщины скоростного и диффузионного слоёв становятся соизмеримыми. В альтернативном варианте, при невысоких скоростях обтекающего потока, толщина скоростного слоя значительно больше толщины диффузионного, и процесс массообмена в значительной степени определяется молекулярной диффузией. На рисунке 1 показан фрагмент поверхности твёрдой частицы, растворяемой в омывающем ее потоке жидкости. Отметим, что в пределах пограничного слоя толщина диффузионного слоя составляет 10…20 %, что свойственно режимам с относительно небольшими значениями Re ≈ 100..1000 (в начальные моменты процесса перемешивания либо при недостаточной интенсивности).

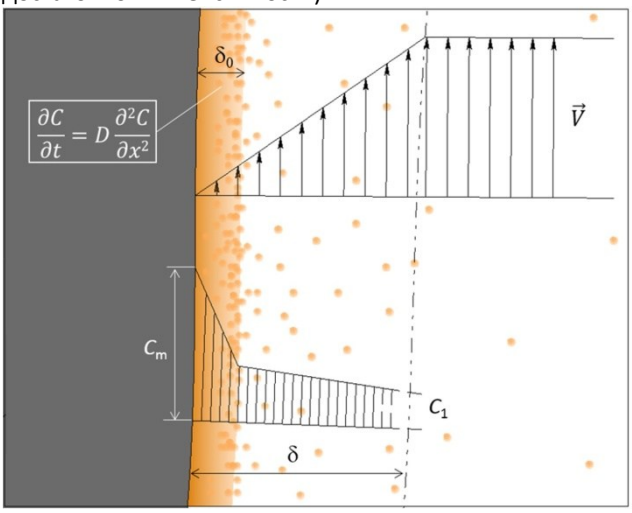


Рис.1. Фрагмент поверхности твердой органической частицы в процессе диспергирования (штрих-пунктирная линия на схеме – условная граница пограничного слоя)

Для рассматриваемой задачи очистки воскового сырья от перги значимым является тот факт, что с увеличением интенсивности механического перемешивания возрастает скорость обтекания частиц жидкости и уменьшается толщина пограничного слоя. Уменьшение толщины пограничного слоя, в свою очередь, интенсифицирует процесс переноса вещества из твёрдой фазы в жидкую среду и ускоряет диспергирование органических загрязнений [20]. Таким образом, между энергетическими параметрами перемешивания и скоростью массообмена существует прямая функциональная связь.

С целью упрощения анализа и получения аналитических зависимостей в настоящем исследовании процесс диспергирования органических загрязнений рассматривается как процесс одномерной диффузии. Предполагается, что массообмен происходит вдоль нормали к поверхности растворяемой частицы, а перенос вещества в объёме жидкости носит диффузионный характер. Такое допущение является оправданным, поскольку в рамках поставленной задачи основной интерес представляет не детальное распределение концентрации в объёме жидкости, а кинетика убыли массы загрязняющих компонентов во времени.

С учётом указанных предпосылок процесс отделения частиц пыльцы от поверхности перги в потоке жидкости может быть описан уравнением диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где C – концентрация, кг/м³; D – коэффициент диффузии, м²/с; t – время, с; x – координата, м.

Движение частиц отделяемой пыльцы в объёме жидкости в первом приближении может быть сопоставлено с броуновским движением, что позволяет для оценки коэффициента диффузии использовать формулу (2):

$$D_A = \frac{k_b \cdot T}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_r}, \quad (2)$$

где k_b – постоянная Больцмана, Дж/К; T – температура воды, К.; η – динамическая вязкость, Па·с; d_r – характерный начальный размер растворяемой частицы, м.

В рамках принятой модели толщина пограничного слоя является функцией геометрических размеров частиц, физических свойств жидкости и скорости омывающего потока. Увеличение скорости потока, определяемое мощностью, затрачиваемой на перемешивание, приводит к уменьшению толщины пограничного слоя и, как следствие, к увеличению интенсивности массоотдачи. Таким образом, интенсивность механического перемешивания выступает в качестве ключевого управляющего параметра процесса диспергирования.

Приведённые теоретические положения послужили основой для построения математической модели процесса очистки воскового сырья, позволяющей установить количественную связь между интенсивностью перемешивания, временем обработки и остаточной концентрацией нерастворённых органических загрязнений.

Для количественного описания процесса диспергирования органических загрязнений при очистке воскового сырья в водной среде используют модель одномерной диффузии, отражающую перенос частиц загрязняющего компонента через пограничный слой в объём жидкости.

Такой подход позволяет получить аналитические зависимости, связывающие интенсивность механического перемешивания, продолжительность процесса и степень очистки, выраженную остаточной концентрацией нерастворённых компонентов. В качестве исходного уравнения принимают одномерное дифференциальное уравнение диффузии:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \ 0 < x < l, \quad t > 0 \\ \left.\frac{\partial C}{\partial x}\right|_{x=0} = 0, \qquad\qquad t > 0 \\ -D\left.\frac{\partial C}{\partial x}\right|_{x=l} = k(C|_{x=l} - C_1), \ t > 0 \\ C|_{t=0} = C_0(x), \ 0 < x < l \end{cases}. \quad (3)$$

Уравнение (3) описывает распределение концентрации частиц пыльцы в пространстве и времени *C*(x, t). Для упрощения дальнейшего анализа и получения универсальных результатов осуществим переход к относительной безразмерной концентрации. С этой целью введём величину

$$U = \frac{C - C_1}{C_m - C_1}, \quad (4)$$

где *C* – концентрация загрязняющих частиц, %; C_1 – концентрация частиц пыльцы в объёме жидкости, %; C_m – максимальная концентрация частиц пыльцы в структуре перги, %.

С учётом того, что масса жидкости существенно превышает массу загрязняющих компонентов, величину *U* в дальнейшем принимают равной нулю. В этом случае безразмерная концентрация характеризует долю нерастворённых загрязнений, и она может быть интерпретирована как относительное количество оставшейся перги.

С учётом введённого преобразования исходная краевая задача будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} = D\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}, \ 0 < x < l, \quad t > 0 \\ \left.\frac{\partial U}{\partial x}\right|_{x=0} = 0, \qquad\qquad t > 0 \\ -D\left.\frac{\partial U}{\partial x}\right|_{x=l} = kU|_{x=l}, \ t > 0 \\ U|_{t=0} = U_0(x), \ 0 < x < l \end{cases}, \quad (5)$$

где *l* – расстояние, м, на протяжении которого диффузия преобладает над конвекцией.

Линейность уравнения (5) позволяет представить его общее решение в виде ряда по собственным функциям

$$U(x,t) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot e^{-\lambda_k^2 Dt} \cdot cos\,\lambda_k\, x, \quad (6)$$

где λ – неизвестное число из краевой задачи Штурма-Лиувилля:

$$\begin{cases} X'' + \lambda^2 X = 0, \ 0 < x < l, \\ X'(0) = 0, \\ X'(l) + h \cdot X(l) = 0 \end{cases}.$$

Для каждого собственного значения λ_k получаем последовательность частных решений $X_k(x) = \cos\lambda_k x$, которые будут обладать следующими свойствами: каждый элемент последовательности – решение задачи Штурма-Лиувилля; элементы последовательности попарно ортогональны на отрезке [0, *l*].

Произвольные постоянные A_k (k = 1, 2, …) определяются начальными условиями задачи. Для их нахождения положим t = 0 и приравняем полученное выражение начальному распределению концентрации:

$$U(x,0) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot e^{-\lambda_k^2 D \cdot 0} \cdot cos\,\lambda_k\, x = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot cos\,\lambda_k\, x = C_0(x). \quad (7)$$

Если правую часть (7) представить как разложение начального распределения концентрации в ряд Фурье, то получим выражения для коэффициентов A_k:

$$A_k = \frac{1}{\|X_k\|^2} \cdot (C_0, X_k) = \frac{1}{\|X_k\|^2} \cdot \int_0^l C_0(\xi) \cdot cos\,\lambda_k\,\xi\, d\xi, \quad (8)$$

где ξ – внутренняя переменная, по которой ведётся интегрирование в пределах от 0 до *l*.

Если подставить найденные коэффициенты A_k в общее решение (6), то получим аналитическое выражение для распределения относительной концентрации органических загрязнений в воде в произвольной точке пограничного слоя и в любой момент времени:

$$U(x,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{1}{\|X_k\|^2} \cdot \int_0^l C_0(\xi) \cdot cos\,\lambda_k\,\xi\, d\xi\right) \cdot e^{-\lambda_k^2 Dt} \cdot cos\,\lambda_k\, x. \quad (9)$$

В рамках настоящего исследования основной интерес представляет не локальное распределение концентрации, а средняя остаточная концентрация загрязняющих компонентов, зависящая от времени. Чтобы ее найти, выполним усреднение выражения (9) по координате:

$$\overline{C}(t) = \int_0^l U(x,t)dx = \int_0^l \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{1}{\|X_k\|^2} \cdot \int_0^l C_0(\xi) \cdot cos\,\lambda_k\,\xi\, d\xi\right) \cdot e^{-\lambda_k^2 Dt} \cdot cos\,\lambda_k\, x\, dx = \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{sin^2\,\lambda_k l}{l\lambda_k^2 \|X_k\|^2} \cdot \int_0^l C_0(\xi) \cdot cos\,\lambda_k\,\xi\, d\xi\right) \cdot e^{-\lambda_k^2 Dt}. \quad (10)$$

В результате интегрирования получим выражение для средней относительной концентрации нерастворённых загрязнений:

$$\overline{C}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} B_k \cdot e^{-\lambda_k^2 Dt}, \quad (11)$$

где $B_k = \frac{sin^2\,\lambda_k l}{l\lambda_k^2 \|X_k\|^2} \cdot \int_0^l C_0(\xi) \cdot cos\,\lambda_k\,\xi\, d\xi$.

Полученное выражение (11) позволяет определить остаточную концентрацию органических загрязнений в произвольный момент времени и служит аналитической основой для численного моделирования процесса очистки воскового сырья.

При этом интенсивность механического перемешивания в рамках модели учитывается опосредованно – через влияние на толщину пограничного слоя и скорость массообмена, что обеспечивает связь между энергетическими параметрами процесса и кинетикой диспергирования.

Результаты

На основе полученного аналитического выражения (11) было выполнено численное моделирование

процесса диспергирования органических загрязнений в водной среде при различных значениях интенсивности механического перемешивания и времени обработки. В качестве критерия оценки эффективности процесса использовали среднюю относительную концентрацию нерастворённых загрязняющих компонентов, которая интерпретируется как доля перги, сохраняющейся в структуре частиц в произвольный момент времени.

Результаты теоретического исследования (численного моделирования) представлены в виде зависимости остаточной концентрации органических загрязнений от времени воздействия при различных значениях интенсивности воздействия (рис. 2), а также от интенсивности при различных фиксированных значениях времени (рис. 3).

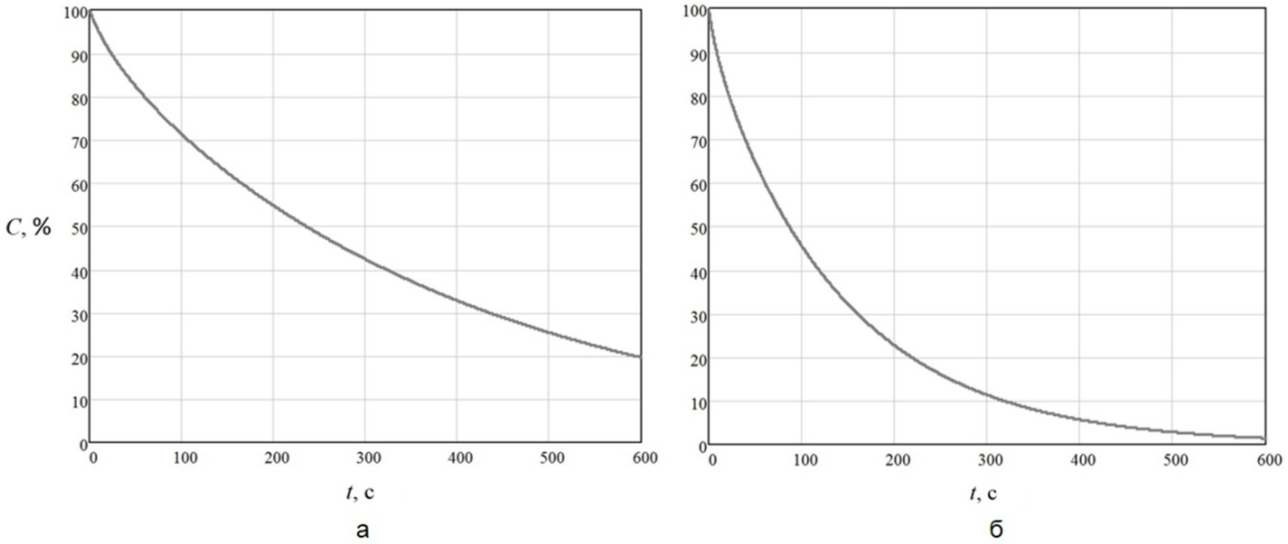


Рис. 2. Зависимость процента нерастворённой перги *C*, % от времени перемешивания *t*, с, полученная в результате теоретического моделирования: а – интенсивность перемешивания 10^4 Вт/м^3; б – интенсивность перемешивания $2 \cdot 10^4$ Вт/м^3

Из графиков (рис. 3) следует, что при интенсивности порядка 10000 Вт/м^3 растворение осуществляется весьма медленно, и для достижения остаточной концентрации ≤ 3 % требуется время >> 600 с. Повышение интенсивности до 20000 Вт/м^3 приводит к заметному ускорению процесса, и аналогичная степень очистки достигается в интервале времени 400…600 с. Данный эффект обусловлен уменьшением толщины пограничного слоя при возрастании скорости омывающего потока, что напрямую отражается на величине показателя экспоненты в уравнении (11).

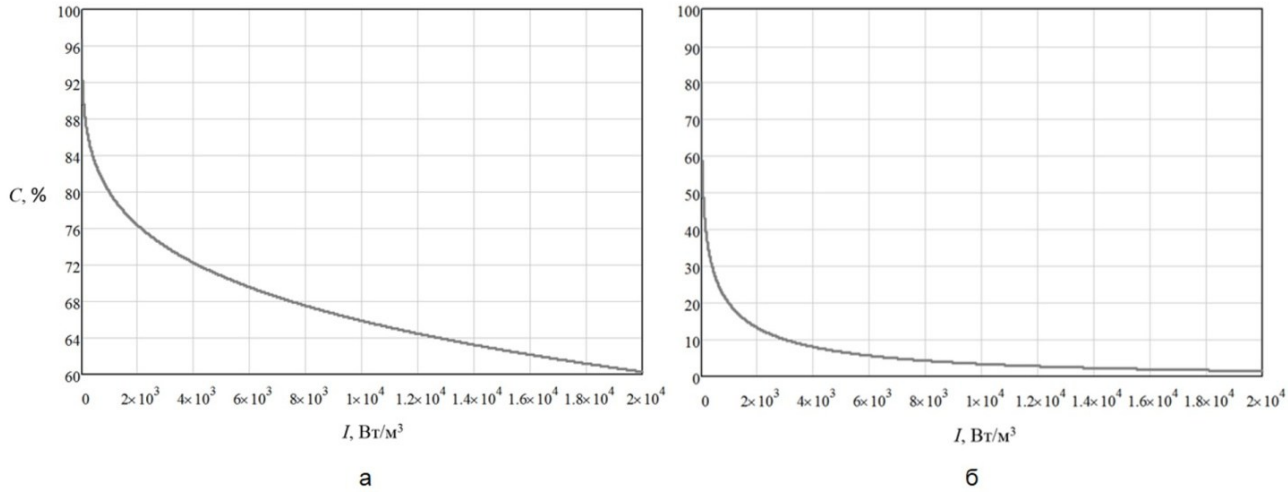


Рис. 3. Теоретическая зависимость процента нерастворённой перги *C*, % от интенсивности перемешивания *I*, Вт/м³: а – время перемешивания 60 с; б – время перемешивания 600 с

Представленные зависимости позволяют проанализировать влияние интенсивности перемешивания при фиксированном времени процесса. Из анализа данных кривых следует, что в диапазоне интенсивностей от 0 Вт/м³ до 2000 Вт/м³ наблюдается наиболее интенсивный рост скорости массоотдачи, что выражается в резком снижении остаточной концентрации нерастворённых загрязнений. В этом

диапазоне увеличение интенсивности перемешивания сопровождается существенным уменьшением толщины пограничного слоя и, как следствие, значительным ростом коэффициента массообмена. При дальнейшем увеличении интенсивности темп снижения остаточной концентрации заметно уменьшается, а при интенсивности, превышающей $1{,}5 \cdot 10^4$ Вт/м^3, влияние данного параметра на скорость диспергирования становится незначительным.

Обсуждение

Анализ полученных зависимостей показал, что характер изменения остаточной концентрации носит выраженный нелинейный характер, что согласуется с теоретическими предпосылками, заложенными в модель одномерной диффузии. Поэтому можно сделать вывод, что для сокращения времени процесса очистки необходимо существенно увеличить интенсивность перемешивания. Выявленный характер зависимостей свидетельствует о наличии области рациональных значений интенсивности механического перемешивания, превышение которых не приводит к пропорциональному росту эффективности процесса, но сопровождается увеличением энергетических затрат. Таким образом, полученные результаты подтверждают, что интенсификация процесса диспергирования за счёт увеличения мощности перемешивания имеет ограниченный характер и должна рассматриваться в совокупности с временными параметрами обработки.

В целом разработанная математическая модель адекватно отражает физическую сущность процесса диспергирования органических загрязнений при очистке воскового сырья. Полученные зависимости качественно согласуются с экспериментальными данными, представленными в ряде работ [1, 4, 11], посвящённых очистке воскового сырья и переработке воскоперговой массы. Это позволяет рассматривать полученную модель как эффективный инструмент для предварительного расчёта и обоснования режимов работы перемешивающих аппаратов и специализированных установок для очистки воскового сырья.

Заключение

Использование базовых положений пленочно-пенетрационной теории массообмена позволило установить функциональную зависимость между исследуемыми параметрами: интенсивностью воздействия, временем и качеством очистки, характеризуемой показателем остаточного содержания нерастворённых загрязняющих частиц в жидкости.

Полученное аналитическое выражение для средней остаточной концентрации позволяет количественно оценить кинетику диспергирования органических загрязнений в водной среде и использовать его для прогнозирования времени, необходимого для достижения заданной степени очистки. Численное моделирование на основе разработанной модели показало, что процесс диспергирования носит выраженный нелинейный характер, а увеличение интенсивности механического перемешивания приводит к снижению времени полного растворения загрязнений лишь в определённом диапазоне значений данного параметра (от 10000 Вт/м³ до 20000 Вт/м³).

Установлено, что интенсивность перемешивания приводит к увеличению скорости процесса растворения примесей. Этому способствует уменьшение толщины пограничного слоя. Пределом увеличения интенсивности воздействия, за которым дальнейшее ее повышение не приводит к заметной интенсификации массообмена, является значение 15000 Вт/м^3. Это свидетельствует о наличии области рациональных режимов перемешивания, превышение которых приводит лишь к росту энергозатрат без соответствующего повышения эффективности очистки.

Полученные результаты подтверждают целесообразность предварительной очистки воскового сырья в водной среде до стадии его тепловой переработки. Реализация данного подхода позволяет снизить потери воска, связанные с переходом его части в связанное состояние, и повысить качество конечного продукта. Разработанная модель может быть использована при проектировании аналогичных перемешивающих аппаратов и установок для очистки сыпучих материалов, в том числе воскового сырья в измельченном состоянии.

Литература

1. Исследование очистки суши сотов от органических загрязнений в водной среде / А. В. Шемякин,Д. Е. Каширин, В. В. Павлов и др. // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2025. Т. 17. № 1. С. 171-178. doi: 10.36508/RSATU.2025.79.66.023. EDN OTITGW.

2. Исследование физико-механических свойств органических загрязнений воскового сырья / А. В. Шемякин, Д. Е. Каширин, А. Н. Алексеев и др. // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2024. Т. 16. № 4. С. 176-182. doi: 10.36508/RSATU.2024.78.36.025.

3. Maksimov N. M. Theoretical justification of the operation of a wax press «Lisitsa» in squeezing wax from merwa // Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. 2020. № 1(45). P. 97-99. doi: 10.36508/RSATU.2020.45.1.017

4. Максимов Н. М., Федорова-Семенова Т. Е., Рыжов Д. В. Многофакторное исследование режимных параметров центрифуги для отжима воска из пасечных вытопок // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 1(38). С. 40-48. EDN MURNTM.

5. Максимов Н.М. Исследование качественных показателей пасечного воска // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 3(32). С. 48-54. EDN JROVGE.

6. Brueschweiler H., Felber H. Beeswax – Composition and determination of purity by gas chromatographic

analysis // Deutsche Lebensmittel-Rundschau. 1999. Vol. 95. No. 5. P. 145-150

7. Bogdanov S. Beeswax: quality issues today // Bee World. 2004. Vol. 85. No. 3. P. 47-50. doi: 10.1080/0005772X.2004.11099624

8. The beeswax processing by product: a potential antibacterial ingredient for food applications / G. Peron, M. Zaccarin, S. Bovo, et al. // International Journal of Food Science & Technology. 2023. Vol. 58. No. 3. P. 1456-1465. doi: 10.1111/ijfs.16289

9. Некрашевич В. Ф., Курочкин А. А., Афанасьев А. М. Комбинированный агрегат для переработки пчеловодной продукции // Пчеловодство. 2016. № 5. С. 48-49. EDN ZBKVHF.

10. Некрашевич В. Ф., Курочкин А. А., Афанасьев А. М. Совершенствование средств механизации первичной переработки продукции пчеловодства // Инновационная техника и технология. 2016. № 1(6). С. 19-23. EDN VVADTP.

11. К вопросу обоснования рациональных условий очистки воскового сырья в воде при интенсивном механическом перемешивании / Д. Е. Каширин, В. В. Павлов, И. А. Успенский и др. // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2020. № 1(45). С. 87-91. doi: 10.36508/RSATU.2020.45.1.015.

12. Levich V. G. Physicochemical Hydrodynamics. Prentice-Hall, 1962. 702 p.

13. Elizarov D. V., Elizarov V. V. Hydrodynamic Model and Kinetics of Dispersion of a Solid Disperse Phase in the Process of Mixing in a Viscous Liquid Medium // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2023. Vol. 96. No. 1. P. 29-38. doi: 10.1007/s10891-023-02658-4.

14. Literature survey of turbulent mass transfer coefficients in impeller agitated two-phase systems / A. Brucato, M. Ciofalo, F. Grisafi, et al. // Chemical Engineering Science. 1998. Vol. 53. No. 15. P. 2625-2645. doi: 10.1016/S0009-2509(98)00079-4

15. Study of Liquid–Solid Mass Transfer and Hydrodynamics in Micropacked Bed with Gas–Liquid Flow / E. Cao, A. N. P. Radhakrishnan, R. B. Hasanudin, et al. // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2021. Vol. 60. No. 29. P. 10489-10501. doi: 10.1021/acs.iecr.1c00089

16. Toor H. L., Marchello J. M. Film-penetration model for mass and heat transfer // AIChE Journal. 1958. Vol. 4. No. 1. P. 97-101. doi: 10.1002/aic.690040118

17. Dorao C. A., Fernandino M. Simulation of mass transfer in turbulent flows using the film-penetration theory // Chemical Engineering Science. 2011. Vol. 66. № 21. P. 5184-5191. doi: 10.1016/j.ces.2011.06.033

18. Kasat G. R., Pandit A. B. Review on mixing characteristics in solid-liquid and solid-liquid-gas reactor vessels // Canadian Journal of Chemical Engineering. 2005. Vol. 83. № 4. P. 618-643. doi: 10.1002/cjce.5450830403

19. Shevchenko A., Kovalenko A. Mathematical modeling of mass transfer processes in heterogeneous systems with mechanical agitation // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1679. No. 2. Art. 022045. doi: 10.1088/1742-6596/1679/2/022045

20. Nienow A. W. On impeller circulation and mixing effectiveness in the turbulent flow regime // Chemical Engineering Science. 1997. Vol. 52. No. 15. P. 2557-2565. doi: 10.1016/S0009-2509(97)00072-9

References

1. Investigation of the purification of honeycomb scraps from organic impurities in an aqueous medium / A.V. Shemyakin, D.E. Kashirin, V.V. Pavlov, et al. // Vestnik of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. 2025. Vol. 17, No. 1. P. 171-178. doi: 10.36508/RSATU.2025.79.66.023. EDN OTITGW.

2. AInvestigation of the physicochemical and mechanical properties of organic impurities in wax raw materials / A. V. Shemyakin, D.E. Kashirin, A.N. Alekseev, et al. // Vestnik of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. 2024. Vol. 16. No. 4. P. 176-182. doi: 10.36508/RSATU.2024.78.36.025.

3. Maksimov N. M. Theoretical justification of the operation of a wax press "Lisitsa" in squeezing wax from merwa // Vestnik of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. 2020. No. 1(45). P. 97-99. doi: 10.36508/RSATU.2020.45.1.017

4. Maksimov N. M., Fedorova-Semenova T. E., Ryzhov D. V. Multifactorial study of operating parameters for a centrifuge extracting wax from apiary wax residues // Proceedings of the Velikie Luki State Agricultural Academy. 2022. No. 1(38). P. 40-48. EDN MURNTM.

5. Maksimov N. M. Study of quality parametres of apiary wax // Proceedings of the Velikie Luki State Agricultural Academy. 2020. No. 3(32). P. 48-54. EDN JROVGE.

6. Brueschweiler H., Felber H. Beeswax – Composition and determination of purity by gas chromatographic analysis // Deutsche Lebensmittel-Rundschau. 1999. Vol. 95. No. 5. P. 145-150

7. Bogdanov S. Beeswax: quality issues today // Bee World. 2004. Vol. 85. No. 3. P. 47-50. doi: 10.1080/0005772X.2004.11099624

8. The beeswax processing by-product: a potential antibacterial agent ngredient for food applications / G. Peron, M. Zaccarin, S. Bovo et al. // International Journal of Food Science & Technology. 2023. Vol. 58. No. 3. P. 1456-1465. doi: 10.1111/ijfs.16289

9. Nekrashevich V. F., Kurochkin A. A., Afanasyev A. M. Combined unit for processing beekeeping products // Beekeeping. 2016. No. 5. P. 48-49. EDN ZBKVHF.

10. Nekrashevich V. F., Kurochkin A. A., Afanasyev A. M. Improvement of mechanization equipment for the primary processing of beekeeping products // Innovative Machinery and Technology. 2016. No. 1(6). P. 19-23. EDN VVADTP.

11. On the justification of rational conditions for cleaning wax raw materials in water under intensive mechanical stirring / D. E. Kashirin, V. V. Pavlov, I. A. Uspensky, et al. // Vestnik of the Ryazan State

Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. 2020. No. 1(45). P. 87-91. doi: 10.36508/RSATU.2020.45.1.015.

12. Levich V. G. Physicochemical Hydrodynamics. Prentice-Hall, 1962. 702 p.

13. Elizarov D. V., Elizarov V. V. Hydrodynamic Model and Kinetics of Dispersion of a Solid Disperse Phase in the Process of Mixing in a Viscous Liquid Medium // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2023. Vol. 96. No. 1. P. 29-38. doi:10.1007/s10891-023-02658-4.

14. References survey of turbulent mass transfer coefficients in impeller agitated two-phase systems / A. Brucato, M. Ciofalo, F. Grisafi, et al. // Chemical Engineering Science. 1998. Vol. 53.No. 15. P. 2625-2645. doi: 10.1016/S0009-2509(98)00079-4

15. Study of Liquid–Solid Mass Transfer and Hydrodynamics in Micropacked Bed with Gas–Liquid Flow / E. Cao, A. N. P. Radhakrishnan, R. B. Hasanudin, et al. // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2021. Vol. 60.No. 29. P. 10489-10501. doi: 10.1021/acs.iecr.1c00089

16. Toor H. L., Marchello J. M. Film-penetration model for mass and heat transfer // AIChE Journal. 1958. Vol. 4.No. 1. P. 97-101. doi: 10.1002/aic.690040118

17. Dorao C. A., Fernandino M. Simulation of mass transfer in turbulent flows using the film-penetration theory // Chemical Engineering Science. 2011. Vol. 66, No. 21. P. 5184-5191. doi: 10.1016/j.ces.2011.06.033

18. Kasat G. R., Pandit A. B. Review on mixing characteristics in solid-liquid and solid-liquid-gas reactor vessels // Canadian Journal of Chemical Engineering. 2005. Vol. 83. No. 4. P. 618–643. doi: 10.1002/cjce.5450830403

19. Shevchenko A., Kovalenko A. Mathematical modeling of mass transfer processes in heterogeneous systems with mechanical agitation // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1679. No. 2. Art. 022045. doi: 10.1088/1742-6596/1679/2/022045

20. Nienow A. W. On impeller circulation and mixing effectiveness in the turbulent flow regime // Chemical Engineering Science. 1997. Vol. 52. No. 15. P. 2557–2565. doi: 10.1016/S0009-2509(97)00072-9