УДК 638.171

Д.Н. Бышов, Д.Е. Каширин, В.В. Павлов

К ВОПРОСУ ОЧИСТКИ ВОСКОВОГО СЫРЬЯ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ: МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ ПЕРГИ В ВОДЕ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ МЕХАНИЧЕСКОМ ПЕРЕМЕШИВАНИИ

D.N. Byshov, D.E. Kashirin, V.V. Pavlov

TO THE QUESTION OF CLEANING WAX RAW MATERIALS FROM POLLUTION: MODELING THE PROCESS OF BEEBREAD DISSOLUTION IN WATER UNDER INTENSIVE MECHANICAL MIXING

Бышов Д.Н. **–** канд. техн. наук, доц. каф. эксплуатации машинно-тракторного парка Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева, г. Рязань. E-mail: kadm76@mail.ru

Каширин Д.Е. **–** д-р техн. наук, доц., зав. каф. электроснабжения Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева, г. Рязань. E-mail: kadm76@mail.ru

Павлов В.В. **–** асп. каф. электроснабжения Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева, г. Рязань. E-mail: vikp76@mail.ru

Byshov D.N. **–** Cand. Techn. Sci., Assoc. Prof.,Chair of Operation of Machine and Tractor Park, Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev, Ryazan. E-mail: kadm76@mail.ru

Kashirin D.E. **–** Dr. Techn. Sci., Assoc. Prof., Head, Chair of Power Supply, Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, Ryazan. E-mail: kadm76@mail.ru

Pavlov V.V. – Post-Graduate Student, Chair of Power Supply, Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, Ryazan. E-mail: vikp76@mail.ru

Цель данного исследования – теоретическое обоснование параметров процесса влажной очистки воскового сырья от перги путем ее растворения при интенсивном механическом перемешивании измельченных пчелиных сотов в воде. В основу построения модели легли основные идеи новейшей пленочно-пенетрационной теории, определяющие уравнения массоотдачи при растворении частиц твердой фазы в жидкости. Результаты численного моделирования показали, что коэффициент массоотдачи монотонно возрастает при увеличении интенсивности перемешивания. В соответствии с принятой моделью, при заданных исходных параметрах наибольший темп увеличения коэффициента массоотдачи наблюдается при изменении интенсивности перемешивания от 0 до 2500 Вт/м^3, далее рост замедляется. На время полного растворения твердого дисперсного компонента (перги) существенное влияние оказывает начальный гранулометрический состав. При значении интенсивности перемешивания 10000 Вт/м^3 и коэффициента массоотдачи 1,025·10^{-5} м/с навеска перги, состоящая из частиц с начальным средним размером 2 мм, полностью растворяется через 300–350 секунд, тогда как для полного растворения крупных фракций измельченного материала требуется более 10 мин. Теоретически установлено, что при увеличении интенсивности значительно сокращается время полного растворения. При значении 19000 Вт/м^3 навеска, состоящая из частиц со средним размером 3,8 мм, полностью растворяется менее чем через 10 минут. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании перемешивающих аппаратов, в частности устройств для очистки воскового сырья.

Ключевые слова*: пчелиные соты, восковое сырье, воск, перга, очистка, перемешивание, интенсивность, растворение.*

The purpose of the study was theoretical substantiation of the parameters of wet cleaning of waxy materials from beebread by dissolving them by intensive mechanical stirring of crushed bee honeycombs in water. The basis for building the model was made by the main ideas of the latest film-penetration theory, determining the mass trans-

fer equations for dissolving solid particles in a liquid. The results of numerical simulation showed that the mass transfer coefficient increased monotonically with increasing in the intensity of hashing. In accordance with accepted model with given initial parameters, the highest rate of increase in the mass transfer coefficient was observed when mixing intensity changed from 0 to 2500 W/m^3, then the growth slowed down. At the time of complete dissolution of solid dispersed component (pollen) a significant effect was made by initial particle size distribution. If mixing intensity was 10,000 W/m^3 and the mass transfer coefficient was 1.025·10^{-5} m/s, beebread hinge plate consisting of the particles with an initial average size of 2 mm completely dissolved after 300–350 seconds, whereas for complete dissolution of large fractions of crushed material it took more than 10 minutes. It was theoretically established that increasing the intensity significantly reduced the time for complete dissolution. With a value of 19,000 W/m^3, the hitch sample consisting of particles with an average size of 3.8 mm completely dissolves in less than 10 minutes. The research results can be used in the design of mixing devices, in particular devices for cleaning wax raw materials.

***Keywords**: honeycombs, wax raw materials, wax, beebread, cleaning, mixing, intensity, dissolution.*

Введение. В основе технологии производства пчелиного воска как в пасечных, так и в заводских условиях лежит тепловая переработка воскового сырья, предполагающая нагрев суши сотов выше температуры плавления воска сухим или влажным способом либо разваривание вторичного воскового сырья (вытопок и мервы) в горячей воде перед прессованием [1, 2]. Присутствие в сотах каких-либо посторонних включений, таких как перга, прополис, экскременты пчел, механические примеси и т.п., существенно снижает не только качество вытапливаемого воска, загрязняя его, но и приводит к связыванию свободно стекающего воска в процессе перетопки, уменьшая тем самым выход готового продукта [3–5]. Применяемые в настоящее время способы повышения качества воска и очистки его от примесей основаны преимущественно на обработке готового воска уже после его получения. Сюда относится прежде всего отстаивание расплавленного воска над поверхностью горячей воды в течение достаточно продолжительного времени. В ряде случаев применяют отбеливание воска, однако такой воск уже является несортовым. Прессовой воск, полученный при отжатии разваренных вытопок на специальных прессах, как правило, сильно загрязнен и также является некондиционным, низкокачественным воском [4, 5]. Значительный потенциал повышения качества и выхода товарного воска кроется в возможности очистки воскового сырья до его горячей переработки, то есть удаления перги и других загрязнений из сотов перед вытопкой воска [6, 7]. Однако данное направление на сегодняшний день исследовано недостаточно и в реальных производственных условиях практически не применяется.

Цель исследования. Обоснование параметров процесса влажной очистки воскового сырья от перги путем ее растворения в воде при интенсивном механическом перемешивании [8–12]. Предполагается, что содержащиеся в предварительно измельченном восковом сырье загрязнения в виде перги при перемешивании растворяются с течением времени. В основу исследования легли идеи достаточно новой, т.н. пленочно-пенетрационной теории, определяющие основные уравнения массоотдачи при растворении твердых тел в жидкости [13–15].

Материалы и методы исследования. При изучении процессов в аппарате с мешалкой дополнительную трудность представляет определение скорости фаз. Поле скоростей движения жидкости в данном случае очень сложное, и единственной измеряемой величиной для сравнения может служить окружная скорость концов лопастей мешалки.

В связи с вышесказанным аналитический расчет коэффициентов массоотдачи в ряде случаев представляет неразрешимую задачу, и для их определения необходимо прибегать к экспериментальным исследованиям.

Для определения массы $m_п$, кг, компонента твердой фазы – перги, растворенной в воде за время τ, с, применим приближенное уравнение Хиксона и Боума [13, 15]

$$m_П = k_c \cdot \overline{F} \cdot \overline{\Delta C}_П \cdot \tau, \qquad (1)$$

где k_c – коэффициент массоотдачи, м/с; $\overline{F}$ – средняя площадь поверхности массообмена, м^2

для периода τ; $\overline{\Delta C}_П = \left(\overline{C_П^* - C_П}\right)$ – средняя разность концентраций для периода (движущая сила процесса), кг/м³; $C_П^*$ – предельная концентрация растворенной перги на межфазной поверхности (концентрация насыщения), кг/м³; $C_П$ – концентрация растворенной перги в растворе, кг/м³.

Для установления зависимости растворенной массы от времени процесса растворения необходимо проинтегрировать выражение (1) и определить величины k_c, $\overline{F}$ и $\overline{\Delta C}_П$. Рассмотрим три случая.

1. Растворяемый компонент представляет собой труднорастворимые твердые частицы, поверхность F которых с течением времени изменяется незначительно. Вводимые допущения: F = const; $dC_П \neq$ const. Средняя движущая сила процесса $\overline{\Delta C}_П$ выражается как средняя логарифмическая величина за период t.

$$\overline{\Delta C}_П = \frac{\Delta C_{П1} - \Delta C_{П2}}{\ln \dfrac{\Delta C_{П1}}{\Delta C_{П2}}}, \qquad (2)$$

где $\Delta C_{П1}$ и $\Delta C_{П2}$ – разность концентраций растворенного компонента соответственно в начале процесса и через время t.

2. Растворяемый компонент представляет собой легкорастворимые твердые частицы, при этом количество растворителя велико по сравнению с содержанием дисперсной фазы, концентрация которой изменяется незначительно. Вводимые допущения: $F \neq$ const; $dC_П$ = const.

Средняя поверхность массообмена $\overline{F}$ за время τ выражается следующим образом:

$$\overline{F} = \frac{\sqrt{F_1^3} - \sqrt{F_2^3}}{3 \cdot \left(\sqrt{F_1} - \sqrt{F_2}\right)}, \qquad (3)$$

где нижний индекс означает состояние поверхности массообмена в начальный момент растворения (F_1) и через время τ то есть (F_2).

3. В общем случае в процессе растворения изменяется как площадь поверхности массообмена, так и движущая сила процесса (разность концентраций). Учитывая полученные выражения для средних значений этих величин (2) и (3), запишем приближенную формулу (1) для расчета количества массы, растворенной за время τ в следующем виде:

$$m_П = \frac{\left(\sqrt{F_1^3} - \sqrt{F_2^3}\right) \cdot \left(\Delta C_{П1} - \Delta C_{П2}\right) \cdot k_c \cdot \tau}{3 \cdot \left(\sqrt{F_1} - \sqrt{F_2}\right) \cdot \ln \dfrac{\Delta C_{П1}}{\Delta C_{П2}}}. \qquad (4)$$

При полном растворении перги F_2 = 0, и выражение (4) примет вид

$$m_П = \frac{F_1 \cdot \left(\Delta C_{П1} - \Delta C_{П2}\right) \cdot k_c \cdot \tau}{3 \cdot \ln \dfrac{\Delta C_{П1}}{\Delta C_{П2}}}. \qquad (5)$$

Произведем оценку коэффициента массоотдачи

$$k_c = C \cdot \mathrm{Re}^A \cdot \mathrm{Sc}^B \cdot \frac{D_A}{l_1}, \qquad (6)$$

где Sc – критерий Шмидта; A, B, C – эмпирические константы [15].

В качестве линейного размера l_1 примем диаметр элемента дисперсной фазы (зерна пыльцы) d_r.

Существует множество модификаций критерия Рейнольдса Re. Для случая перемешивания дисперсных систем в аппарате с мешалкой воспользуемся модификацией, предложенной Оямой, Коларжем и Кольдербанком [14, 15]

$$\mathrm{Re} = \frac{d_r^{2/3} \cdot \gamma^{1/3}}{\eta^{1/2}} \cdot \left(\frac{N(n)}{V}\right)^{1/3} = \frac{d_r^{2/3} \cdot \gamma^{1/3}}{\eta^{1/2}} \cdot I(n)^{1/3} \qquad (7)$$

где γ – плотность растворителя (воды), кг/м³; η – динамическая вязкость растворителя (воды), Па·с; $N(n)$ – полезная мощность мешалки в зависимости от частоты вращения, Вт; $I(n) = N(n)/V$ – интенсивность перемешивания, Вт/м³.

Данное определение Re позволяет избежать зависимости от типа мешалки, поскольку влияние геометрии мешалки уже учтено в полезной мощности N.

Для определения величины коэффициента диффузии D_A примем допущение, что диффундирующий с поверхности массообмена компонент, состоящий из зерен пыльцы, представляет собой броуновские частицы. Тогда величина D_A определяется выражением (формула Эйнштейна)

$$D_A = \frac{k \cdot T}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_r}, \qquad (8)$$

где k – постоянная Больцмана, Дж/К; T – температура воды, К.

Результаты и их обсуждение. Численное моделирование процесса массоотдачи проводили с использованием программы Mathcad 14.0. Результаты моделирования представлены в виде графических зависимостей на рисунках 1, 2. Зависимыми переменными являются коэффициент массоотдачи, определенный по выражению (6), и процент нерастворенной твердой фазы от первоначальной массы навески m, кг, найденный из выражения (1) путем преобразования

$$P(\tau) = \left(1 - \frac{m_П(\tau)}{m}\right) \cdot 100. \qquad (9)$$

Как следует из полученных теоретических зависимостей, коэффициент массоотдачи k_c монотонно возрастает при увеличении интенсивности перемешивания. В соответствии с принятой моделью при заданных исходных параметрах наибольший темп увеличения коэффициента массоотдачи наблюдается при изменении интенсивности от 0 до 2500 Вт/м³, далее рост замедляется (рис. 1).

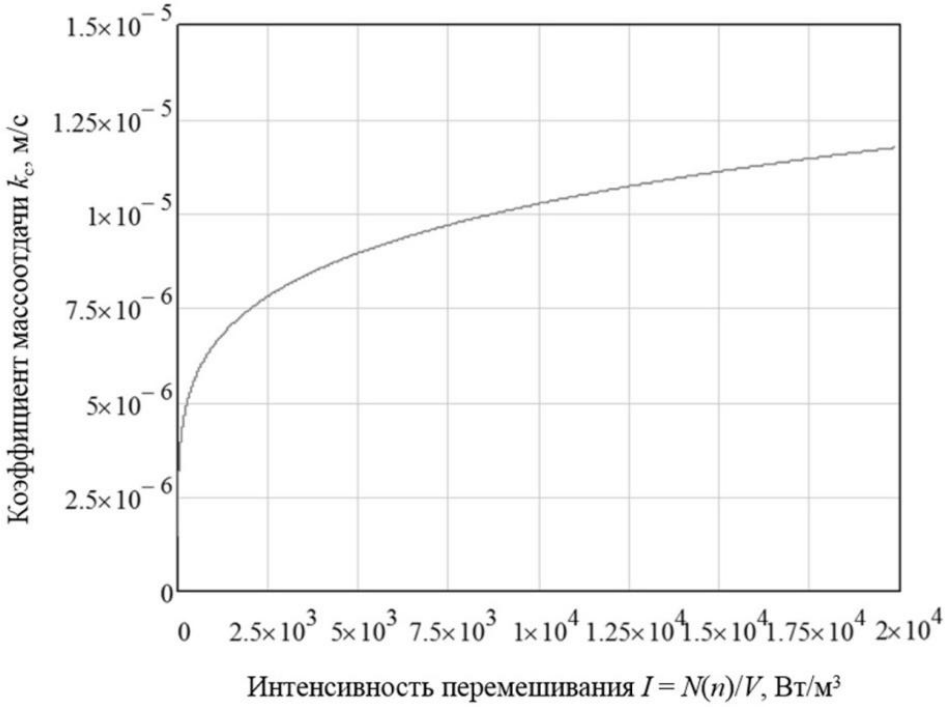

Рис. 1. Результаты численного моделирования процесса растворения перги в воде при интенсивном механическом перемешивании: зависимость коэффициента массоотдачи от интенсивности перемешивания

На время полного растворения дисперсного компонента (перги) существенное влияние оказывает начальный гранулометрический состав. Так, при значении интенсивности перемешивания I = 10000 Вт/м³ и коэффициента массоотдачи k_c = 1,025·10⁻⁵ м/с навеска, состоящая из частиц с начальным средним размером 2 мм, полностью растворяется через 300–350 секунд (рис. 2, б, линия 1), тогда как для полного растворения крупных фракций измельченного ма-

териала требуется более 10 мин (рис. 2, б, линии 2 и 3).

Увеличение интенсивности значительно сокращает время полного растворения. При значении I = 19000 Вт/м^3 навеска, состоящая из частиц со средним размером 3,8 мм, полностью растворяется менее чем через 10 минут (рис. 2, а, линия 3).

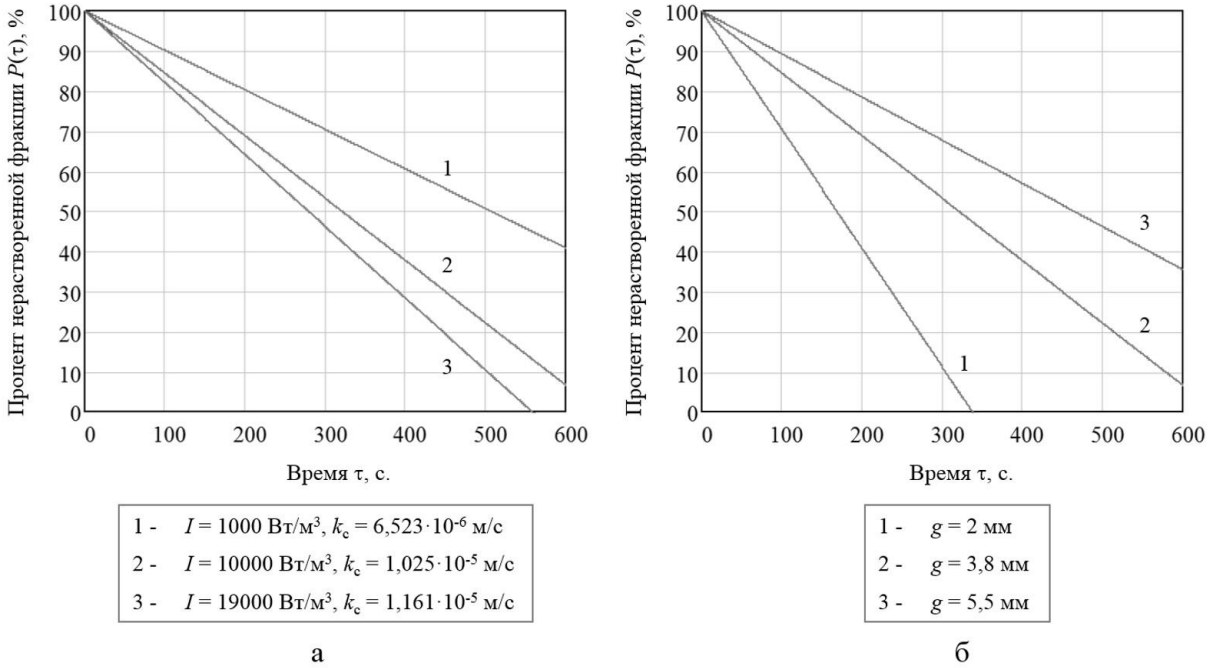

Рис. 2. Результаты численного моделирования процесса растворения перги в воде при интенсивном механическом перемешивании: а – зависимость процента нерастворенной перги P, % от времени перемешивания при различных значениях интенсивности перемешивания I, Вт/м^3 для фракции с начальным средним размером частиц g = 3,8 мм; б – зависимость процента нерастворенной перги P, % от времени перемешивания при различных начальных значениях гранулометрического состава растворяемого компонента g, мм, и значениях интенсивности перемешивания I = 10000 Вт/м^3

Выводы. Проведено численное моделирование процесса массообмена в системе «жидкость – дисперсная фаза» при растворении перги в воде в результате механического перемешивания. Как следует из полученных теоретических зависимостей, коэффициент массоотдачи монотонно возрастает при увеличении интенсивности перемешивания. В соответствии с принятой моделью, при заданных исходных параметрах наибольший темп увеличения коэффициента массоотдачи наблюдается при изменении интенсивности от 0 до 2500 Вт/м^3, далее рост замедляется. На время полного растворения дисперсного компонента (перги) существенное влияние оказывает начальный гранулометрический состав. Так, при значении интенсивности перемешивания I = 10000 Вт/м^3 и коэффициента массоотдачи k_c = 1,025·10^{-5} м/с навеска, состоящая из частиц с начальным средним размером 2 мм, полностью растворяется через 300–350 секунд, тогда как для полного растворения крупных фракций требуется более 10 мин. Теоретически установлено, что при увеличении интенсивности значительно сокращается время полного растворения. При значении I = 19000 Вт/м^3 навеска, состоящая из частиц со средним размером 3,8 мм, полностью растворяется менее чем через 10 минут. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании перемешивающих аппаратов, в частности устройств для очистки воскового сырья.

Литература

1. Исследование процесса получения воска из воскового сырья различного качества / *Н.В. Бышов, Д.Н. Бышов, Д.Е. Каширин* [и др.] //

Вестник КрасГАУ. – 2015. – № 6. – С. 145–149.
2. *Бышов Н.В., Каширин Д.Е.* Исследование отделения перги от восковых частиц // Техника в сельском хозяйстве. – Белгород, 2013. – № 1. – С. 26–27.
3. *Бышов Д.Н, Каширин Д.Е., Павлов В.В.* К вопросу механизации очистки воскового сырья // Продовольственная безопасность: от зависимости к самостоятельности: сб. мат-лов Всерос. науч.-практ. конф. – Орел, 2017. – С. 45–48.
4. *Бышов Д.Н., Каширин Д.Е., Павлов В.В.* К вопросу механизированной очистки воскового сырья // Аграрная наука в инновационном развитии АПК: мат-лы Междунар. молодежного аграрного форума. – Уфа, 2018. – С. 49–55.
5. К вопросу механической очистки перговых гранул / *Д.Н. Бышов* [и др.] // Вестник РГАТУ. – 2017. – № 2 (34). – С. 57–61.
6. Пат. № 2483812 РФ. МПК B07B 1/40 A01K 59/00. Способ очистки пчелиных сотов / *Н.В. Бышов, Д.Е. Каширин, А.В. Куприянов*. – Заявл. 20.12.2011; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 16. – 4 с.
7. Пат. № 2656968 РФ. МПК A01K 51/00. Способ очистки воскового сырья / *Д.Н. Бышов, Д.Е. Каширин, В.В. Павлов*. – Заявл. 20.02.2017; опубл. 07.06.2018, Бюл. № 16.
8. *Бышов Н.В., Каширин Д.Е., Харитонова М.Н.* Исследование гигроскопических свойств перги // Вестник КрасГАУ. – 2013. – № 2. – С. 122–124.
9. *Бышов Н.В., Каширин Д.Е., Куприянов А.В.* Исследование гигроскопических свойств перги // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2011. – № 2-2. – С. 14–15.
10. Исследование эффективности очистки воскового сырья в воде при интенсивном механическом перемешивании / *Д.Н. Бышов* [и др.] // Вестник КрасГАУ. – 2017. – № 12 (135). – С. 115–122.
11. *Бышов Д.Н., Каширин Д.Е., Павлов В.В.* Результаты многофакторного экспериментального исследования дисперсионных свойств перги // Вестник КрасГАУ. – 2017. – № 2 (125). – С. 115–121.
12. *Бышов Д.Н., Каширин Д.Е., Павлов В.В.* Исследование дисперсионных свойств перги различного гранулометрического состава // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2017. – № 1 (33). – С. 69–74.
13. *Аксельруд Г.А., Молчанов А.Д.* Растворение твердых веществ. – М.: Химия, 1977. – 272 с.
14. *Плановский А.Н.* [и др.]. Общие вопросы тепло- и массообмена. – Минск: Наука и техника, 1966.
15. *Стренк Ф.* Перемешивание и аппараты с мешалками: пер. с пол. – Л.: Химия, 1975. – 384 с.

Literatura

1. Issledovanie processa poluchenija voska iz voskovogo syr'ja razlichnogo kachestva / *N.V. Byshov, D.N. Byshov, D.E. Kashirin* [i dr.] // Vestnik KrasGAU. – 2015. – № 6. – S. 145–149.
2. *Byshov N.V., Kashirin D.E.* Issledovanie otdelenija pergi ot voskovyh chastic // Tehnika v sel'skom hozjajstve. – Belgorod, 2013. – № 1. – S. 26–27.
3. *Byshov D.N, Kashirin D.E., Pavlov V.V.* K voprosu mehanizacii ochistki voskovogo syr'ja // Prodovol'stvennaja bezopasnost': ot zavisimosti k samostojatel'nosti: sb. mat-lov Vseros. nauch.-prakt. konf. – Or'ol, 2017. – S. 45–48.
4. *Byshov D.N., Kashirin D.E., Pavlov V.V.* K voprosu mehanizirovannoj ochistki voskovogo syr'ja // Agrarnaja nauka v innovacionnom razvitii APK: mat-ly Mezhdunar. molodezhnogo agrarnogo foruma. – Ufa, 2018. – S. 49–55.
5. K voprosu mehanicheskoj ochistki pergovyh granul / *D.N. Byshov* [i dr.] // Vestnik RGATU. – 2017. – № 2 (34). – S. 57–61.
6. Pat. № 2483812 RF. MPK V07V 1/40 A01K 59/00. Sposob ochistki pchelinyh sotov / N.V. Byshov, D.E. Kashirin, A.V. Kuprijanov. – Zajavl. 20.12.2011; opubl. 10.06.2013, Bjul. № 16. – 4 s.
7. Pat. № 2656968 RF. MPK A01K 51/00. Sposob ochistki voskovogo syr'ja / *D.N. Byshov, D.E. Kashirin, V.V. Pavlov*. – Zajavl. 20.02.2017; opubl. 07.06.2018, Bjul. № 16.

8. *Byshov N.V., Kashirin D.E., Haritonova M.N.* Issledovanie gigroskopicheskih svojstv pergi // Vestnik KrasGAU. – 2013. – № 2. – S. 122–124.
9. *Byshov N.V., Kashirin D.E., Kuprijanov A.V.* Issledovanie gigroskopicheskih svojstv pergi // Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2011. – № 2-2. – S. 14–15.
10. Issledovanie jeffektivnosti ochistki voskovogo syr'ja v vode pri intensivnom mehanicheskom peremeshivanii / *D.N. Byshov* [i dr.] // Vestnik KrasGAU. – 2017. – № 12 (135). – S. 115–122.
11. *Byshov D.N., Kashirin D.E., Pavlov V.V.* Rezul'taty mnogofaktornogo jeksperimental'nogo issledovanija dispersionnyh svojstv pergi // Vestnik KrasGAU. – 2017. – № 2 (125). – S. 115–121.
12. *Byshov D.N., Kashirin D.E., Pavlov V.V.* Issledovanie dispersionnyh svojstv pergi razlichnogo granulometricheskogo sostava // Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo agrotehnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva. – 2017. – № 1 (33). – S. 69–74.
13. *Aksel'rud G.A., Molchanov A.D.* Rastvorenie tverdyh veshhestv. – M.: Himija, 1977. – 272 s.
14. *Planovskij A.N.* [i dr.]. – Obshhie voprosy teplo- i massoobmena. – Minsk: Nauka i tehnika, 1966.
15. *Strenk F.* Peremeshivanie i apparaty s meshalkami: per. s pol. – L.: Himija, 1975. – 384 s.