

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ НА ПРИВОД ВАЛА ВОСКОТОПКИ-ЦЕНТРИФУГИ

Н.М. Максимов,

доцент каф. автомобилей, тракторов и сельскохозяйственных машин Великолукской государственной
сельскохозяйственной академии, канд. техн. наук, доцент
(Российская Федерация, Псковская обл., г. Великие Луки)

Д.А. Григорьев,

зав. каф. технологий и механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции БГАТУ,
канд. техн. наук, доцент

Представлена схема усовершенствованной воскотопки-центрифуги. Приведены расчетные схема и формулы для определения сил, действующих на восковое сырье внутри вращающегося барабана и обеспечивающих преодоление сил вязкого трения и силы тяжести. Представлены зависимости для определения момента и радиуса инерции барабана. Обоснован баланс мощности электропривода при отжиме воска из воскосырья. Полученные зависимости позволяют определить производительность воскотопки-центрифуги и удельный расход энергии на реализацию исследуемого процесса. Анализ полученных уравнений для расчета мощности привода воскотопки-центрифуги показывает, что энергозатраты возможно уменьшить за счет выбора рациональных параметров процесса отжима воска из мервы, а также уменьшением действующей силы трения.

Ключевые слова: пчеловодство, перетопка воска, воскотопка-центрифуга, силы, действующие на воскосырье, момент инерции, баланс мощности, производительность, удельный расход энергии.

The schematic diagram, of the improved wax extractor-centrifuge are described. Analytical models and formulas are provided to calculate the forces acting on the wax raw material inside the rotating drum, which overcome viscous friction and gravitational forces. Dependencies for calculating the moment of inertia and radius of inertia of the drum. The power balance of the electric drive during the wax extraction process is substantiated. The obtained relationships make it possible to determine the performance of the wax extractor-centrifuge and the specific energy consumption for implementing the investigated process. Analysis of the derived equations for calculating the drive power shows that energy consumption can be reduced through the rational selection of process parameters for wax extraction from slumgum, as well as by reducing friction forces.

Key words: beekeeping, wax remelting, wax extractor-centrifuge, forces acting on wax raw material, moment of inertia, power balance, performance, specific energy consumption.

Введение

Пчелиный воск является уникальным продуктом жизнедеятельности медоносных пчел. Он используется в различных отраслях народного хозяйства и находит применение в косметике и медицине, кондитерской промышленности, радиотехнике, металлургической и лакокрасочной промышленности, трехмерном моделировании, печати и многих других. Несмотря на востребованность, до 80 % получаемого пасечного воска используется для производства вошины (искусственной основы для постройки пчелиных сот) [1; 4].

Одним из основных путей увеличения производства воска на пасеках является снижение его потерь за счет внедрения эффективных и высокопроизводительных агрегатов [3-5]. К их числу можно отнести пасечную воскотопку-центрифугу [6]. Разогрев воскового сырья в данном агрегате осуществляется за счет тепловой энергии водяного пара. Источником пара может служить парогенератор по разработанной

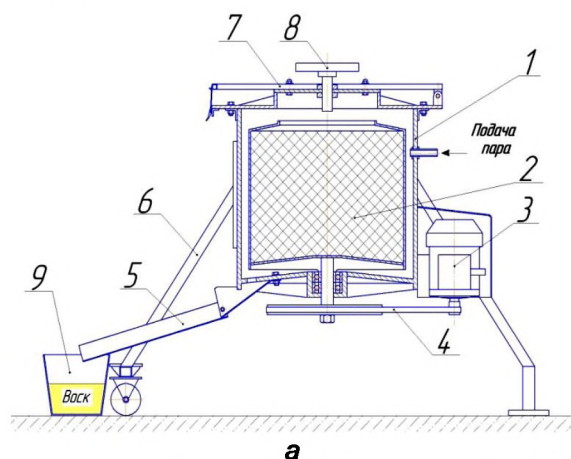
конструкции [4]. Принцип выделения воска в центрифугах основывается на воздействии центробежных сил на разогретое воскосырье.

Ввиду сложности и отсутствия рентабельности транспортировки пасечных вытопок до воскоэкстракционных заводов с последующим извлечением воска, для небольших пасек необходимо организовывать самостоятельное извлечение воска из этого воскосырья.

Целью данного исследования является определение мощности на привод вала воскотопки-центрифуги.

Основная часть

Схема и общий вид воскотопки-центрифуги представлены на рисунке 1. Корпус центрифуги выполнен из нержавеющей кислотоупорной стали (рис. 1а). Внутри корпуса 1 на подшипниках вращается барабан 2, приводимый в действие от коллекторного электродвигателя 3 мощностью 300 Вт посредством ременной передачи 4.



а

б

Рисунок 1. Воскотопка-центрифуга для получения воска из пасечной мервы:
а – схема устройства; б – общий вид; 1 – корпус центрифуги; 2 – барабан; 3 – электродвигатель; 4 – ременная передача; 5 – лоток для слива воска; 6 – опоры; 7 – загрузочный люк; 8 – термометр; 9 – контейнер

Регулирование оборотов двигателя осуществлялось при помощи широтно-импульсного модулятора (ШИМ) частоты оборотов «US-52» (Китай), встроенного в электрическую цепь питания электродвигателем. Замер частоты вращения барабана воскотопки-центрифуги производился при помощи цифрового тахометра (Китай), оснащенного датчиком Холла, закрепленного на корпусе установки. Корпус центрифуги 1 имеет приваренные к нему жесткие опоры 6. Загрузка воскосырья внутрь барабана центрифуги осуществлялась через загрузочный люк 7, на котором размещен биметаллический термометр 8. Для получения воска из воскового сырья использовалась проницаемая тканевая оболочка, помещаемая внутрь центрифуги. В корпус центрифуги 1 при ее работе подается острый пар, который разогревает воскосырье до температуры, выше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. При вращении ротора жидкий воск извлекается из разогретого воскового сырья, который сливается через лоток 5 в контейнер 9 для сбора воска [4].

Работа центрифуги предусматривает следующие технологические операции: загрузку проницаемой оболочки с пасечной мервой внутрь барабана, центрифугирование и выгрузку оболочки с отжатыми выпотками. В качестве такой проницаемой оболочки может использоваться любая ткань, выдерживающая температуру подаваемого водяного пара, сшитая по размерам барабана. В нашем эксперименте была задействована мешковина, сшитая в два ряда, но предпочтительнее использовать ткань лавсановую фильтровальную (ФЛ-4), которая имеет высокую механическую прочность и стойкость к высоким температурам.

В ходе исследования было проведено теоретическое обоснование процесса работы пасечной центрифуги. Схема работы центрифуги при отжиме воска из мервы представлена на рисунке 2.

При рассмотрении работы воскотопки-центрифуги сделано допущение, что восковая масса равномерно распределяется на внутренней поверхности барабана. Уплотнением мервы во время отжима воска пренебрегаем ввиду малых оборотов барабана.

Воскотопка-центрифуга с электроприводом представляет собой механическую систему, в которой происходит отделение воска от мервы и потеря ее массы. Экспериментальные исследования позволили выявить рациональные режимные параметры, обеспечивающие максимальную производительность центрифуги, которые показали, что выделение воска из пасечной мервы происходит при следующих значениях: температура $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; $n = 1000\text{ мин}^{-1}$; время отжима $T = 15\text{ мин}$. [3]. При указанных параметрах производительность центрифуги по воску составляет 10 кг/ч .

На представленной схеме (рис. 2) приведены силы, действующие на расплавленный воск:

F_y – удерживающая сила (сила вязкого трения), Н;

$F_{\text{ц}}$ – центробежная сила, Н;

F_T – сила тяжести, обусловленная гравитационным полем, Н.

Задержка выхода воска из мервы в процессе центрифугирования связана с удерживающей силой F_y [2]. Ее величина находится в функциональной зависимости от частоты вращения ротора ω и температуры нагрева воска T , находящегося в пасечной мерве (рис. 2).

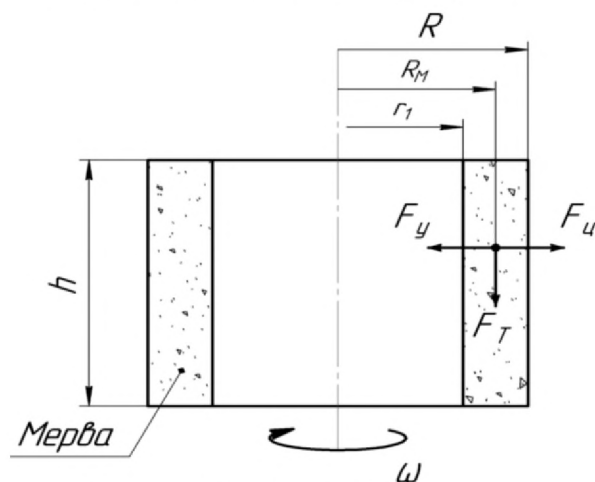


Рисунок 2. Схема работы воскотопки-центрифуги с пасечной мервой

Для дальнейшего определения производительности центрифуги обозначим следующие величины:

R – внутренний радиус барабана центрифуги, м;

r_1 – внутренний радиус слоя материала, который находится в центрифуге, м;

h – высота барабана, м;

ρ – плотность материала, который находится в центрифуге, кг/м³;

V_B – объем барабана центрифуги, м³;

V_M – объем материала, который находится в центрифуге, м³.

Рассмотрим каждую из действующих сил более подробно.

Сила тяжести F_T может быть определена из выражения:

$$\bar{F}_T = m_M \cdot \bar{g}, \text{ Н}, \quad (1)$$

где m_M – масса пасечной мервы, загруженной в центрифугу, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Для центробежной силы, действующей на восковую массу, будет справедливо уравнение:

$$\bar{F}_c = m_M \cdot \bar{a}_c, \text{ Н}, \quad (2)$$

где a_c – центробежное ускорение, м/с².

В свою очередь, центробежное ускорение может быть найдено по формуле:

$$a_c = \frac{v_M^2}{R_M}, \text{ м/с}^2, \quad (3)$$

где v_M – линейная скорость воска в слое мервы, м/с;

R_M – радиус инерции загруженного в барабан слоя мервы (расстояние от центра вращения центрифуги до слоя мервы, в котором сосредоточена масса загруженной в центрифугу мервы), м.

Линейная скорость воска в мерве будет равна

$$v_M = \omega \cdot R_M, \text{ м/с}. \quad (4)$$

Угловая скорость воска в мерве может быть определена по формуле:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}, \text{ рад/с}, \quad (5)$$

где n – число оборотов барабана, мин⁻¹.

Подставляя известные данные в формулу (2), получим:

$$F_c = m_M \cdot R_M \cdot \left(\frac{\pi \cdot n}{30} \right)^2 \text{ Н}. \quad (6)$$

Результирующий вектор действия сил F_T и F_c направлен к радиусу цилиндра под углом ψ , который может быть определен из выражения:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\omega^2 R_M}{g}. \quad (7)$$

Для определения радиуса R_B инерции барабана и загруженной в него мервы необходимо вычислить его момент инерции. Кинетическая энергия вращающегося

тела с непрерывно распределенной массой определяется как сумма энергий множества материальных точек:

$$E_K = \sum_{i=1}^n \frac{m_i \cdot r_i^2 \cdot \omega^2}{2}, \text{ Дж}, \quad (8)$$

где m_i – масса материальной точки в слое мервы, кг;

r_i – радиус материальной точки в слое мервы, м;

ω – угловая скорость, рад/с.

Общий приведенный момент инерции I_B определяется из выражения:

$$I_B = I_M + I_{B1} + I_{B2}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (9)$$

где I_M – момент инерции загруженного слоя мервы, кг·м²;

I_{B1} – момент инерции вертикальных стенок барабана, кг·м²;

I_{B2} – момент инерции основания барабана, кг·м².

Найдем момент инерции загруженного слоя мервы:

$$\begin{aligned} I_M &= \int R_M^2 dm_M = \sum_j \int_{r_j}^R 2\pi\rho h R_M^3 dR_M = \\ &= 2\pi\rho h \sum_j \int_{r_j}^R R_M^3 dR_M = 2\pi\rho h \cdot \sum_j \frac{R_M^4}{4} \Big|_{r_j}^R = \\ &= \frac{\pi\rho h}{2} \cdot \sum_j (R^4 - r_j^4) = \frac{\pi\rho h}{2} \times \\ &\times \sum_j (R^2 - r_j^2)(R^2 + r_j^2) = \\ &= \frac{m_M}{2} \sum_j (R^2 + r_j^2), \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \end{aligned} \quad (10)$$

где r_j – расстояние от центра вращения до j слоя мервы, м.

Объем барабана центрифуги может быть определен по формуле:

$$V_B = \pi \cdot R^2 \cdot h, \text{ м}^3 \quad (11)$$

Объем загруженной в барабан мервы может быть записан в виде:

$$V_M = \pi \cdot (R^2 - r_1^2) \cdot h, \text{ м}^3. \quad (12)$$

Масса загруженной в барабан мервы:

$$m_M = \rho \cdot V_M = \rho \cdot \pi \cdot (R^2 - r_1^2) \cdot h, \text{ кг}. \quad (13)$$

Сумма моментов инерции (10) в процессе работы центрифуги будет меняться по неуставленной зависимости. Учитывая, что наибольшая нагрузка на электропривод центрифуги приходится на момент начала ее пуска, то расчет может быть проведен для условий, когда барабан заполнен мервой равномерно по стенкам барабана. Момент инерции заполненного мервой барабана составит:

$$I_M = \frac{1}{2} m_M (R^2 + r_1^2), \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (14)$$

Момент инерции вертикальных стенок барабана определим по формуле:

$$I_{Б1} = m_{Б1} R^2, \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (15)$$

Момент инерции основания барабана:

$$I_{Б2} = \frac{1}{2} m_{Б2} R^2, \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (16)$$

где $m_{Б1}$ – масса стенок барабана, кг;

$m_{Б2}$ – масса днища барабана, кг.

С учетом формул (14) – (16) формула (9) примет вид:

$$I_{Б} = \frac{1}{2} m_{М} (R^2 + r_1^2) + m_{Б1} R^2 + m_{Б2} \frac{1}{2} R^2, \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (17)$$

Радиус инерции загруженного барабана определится из выражения:

$$R_{Б} = \sqrt{\frac{I_{Б}}{m_{БМ}}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{2} m_{М} (R^2 + r_1^2) + m_{Б1} R^2 + m_{Б2} \frac{1}{2} R^2}{m_{М} + m_{Б1} + m_{Б2}}}, \text{ м} \quad (18)$$

где $m_{БМ}$ – масса барабана с загруженной в него мервой, кг.

Сила, удерживающая воск в мерве, зависит от вязкости воска и определится из выражения:

$$\bar{F}_y = -\bar{v}_M \cdot \beta_T, \text{ Н}, \quad (19)$$

где $\bar{v}_M$ – средняя скорость движения воска (или среднего потока воска), м/с;

β_T – коэффициент вязкого сопротивления (зависит от температуры T , состава воска и геометрии канала), Н·с/м.

Сила извлечения воска из мервы должна быть больше суммы сил, удерживающих его в мерве. Исходя из этого условия, будет справедливо неравенство:

$$|\bar{F}_ц| > |\bar{F}_y| + |\bar{F}_T|. \quad (20)$$

Расход энергии для пасечной центрифуги, работающей в периодическом режиме, можно рассчитать отдельно для пускового и основного (рабочего) режимов.

Максимальная мощность на привод центрифуги требуется в начальный период, когда преодолевается инерция массы вращающихся частей центрифуги и загруженного материала (мервы). В основном режиме работы центрифуги расход энергии будет ниже.

Полный расход энергии в центрифуге периодического действия будет складываться из следующих затрат:

1) на сообщение барабану центрифуги необходимой скорости – $N_{Б}$;

2) на сообщение кинетической энергии мерве, находящейся внутри барабана – $N_{М}$;

3) на преодоление трения в подшипниках центрифуги – N_T ;

4) на преодоление трения барабана о паровоздушную смесь внутри корпуса центрифуги – $N_{Б}$;

Для начала пуска центрифуги, когда угловая скорость барабана близка к нулю, совершаемая работа будет соответствовать работе силы при повороте тела на конечный угол φ и определяться моментом силы

$$A_{Б} = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M d\varphi, \text{ Дж}, \quad (21)$$

где $A_{Б}$ – работа, совершаемая электродвигателем при пуске центрифуги, Дж;

M – крутящий момент на валу электродвигателя, Н.

φ_1, φ_2 – начальное и конечное значения угла поворота, рад;

$d\varphi$ – бесконечно малое приращение угла поворота барабана центрифуги.

Работа, затрачиваемая на сообщение барабану необходимой скорости, определится по формуле:

$$A_{Б} = \frac{\left(m_{Б1} R^2 + m_{Б2} \frac{1}{2} R^2 \right) \cdot \omega^2}{2}, \text{ Дж}. \quad (22)$$

Мощность, необходимая для разгона барабана до рабочей частоты вращения

$$N_{Б} = \frac{A_{Б}}{1000 \cdot \tau}, \text{ кВт}, \quad (23)$$

где τ – время разгона центрифуги, с.

На основании полученных практических данных установлено, что время разгона барабана центрифуги составляет до одной минуты.

Работа, затрачиваемая на сообщение кинетической энергии мерве, находящейся внутри барабана, определится по формуле:

$$A_{М} = \frac{m_{М} (r_1^2 + R^2) \cdot \omega^2}{4}, \text{ Дж}, \quad (24)$$

где $m_{М}$ – масса загружаемой мервы, кг.

Мощность, необходимая на сообщение кинетической энергии отжимаемой мерве

$$N_{М} = \frac{A_{М}}{1000 \cdot \tau \cdot \eta_{\odot}} \text{ кВт}, \quad (25)$$

где $\eta_{\odot}$ – коэффициент, учитывающий снижение расхода электроэнергии на привод за счет уменьшения массы мервы.

Мощность, необходимая на преодоление трения в подшипниках, запишется в виде:

$$N_T = \frac{m \cdot f \cdot v_{Б}}{1000}, \text{ кВт}, \quad (26)$$

где m – масса вращающихся частей центрифуги и воскосырья, кг;

f – коэффициент трения;

$v_{Б}$ – окружная скорость шейки вала центрифуги, м/с;

Окружная скорость на поверхности шейки вала центрифуги будет:

$$v_B = \frac{\pi \cdot d_B \cdot n}{60}, \text{ рад/с}, \quad (27)$$

где d_B – диаметр шейки вала, м;

n – число оборотов вала, мин⁻¹.

Мощность, необходимая на преодоление трения барабана о паровоздушную смесь внутри корпуса центрифуги

$$N_B = \frac{\rho_{\text{отн}} \pi^3 \cdot \mu \cdot H \cdot R^3 \cdot n^2}{45000 \cdot h}, \text{ кВт}, \quad (28)$$

где $\rho_{\text{отн}}$ – коэффициент относительной плотности, учитывающий свойства и состав паровоздушной смеси;

μ – коэффициент трения (динамическая вязкость паровоздушной смеси), Н·с/м²;

H – высота барабана, м;

R – радиус барабана, м;

n – число оборотов барабана, мин⁻¹;

h – расстояние между барабаном и корпусом, м;

$\pi^3 / 45000$ – комбинация перевода единиц (обороты/мин → рад/с, Вт → кВт).

Максимальная расчетная мощность на валу центрифуги

$$N_{\Pi} = N_B + N_T + N_{\text{в}} + N_{\text{м}}, \text{ кВт}. \quad (29)$$

В раскрученном состоянии расход электроэнергии на центрифугу значительно меньше

$$N_{\Pi} = N_B + N_T, \text{ кВт}. \quad (30)$$

Производительность центрифуги можно определить по формуле:

$$G = \frac{q}{t}, \text{ кг/ч}, \quad (31)$$

где q – количество полученного на центрифуге воска, кг;

t – продолжительность полного цикла работы центрифуги, ч.

Удельный расход электроэнергии при центрифугировании мервы

$$W_{\text{уд}} = \frac{N_{\Pi}}{G}, \text{ кВт·ч/кг}. \quad (32)$$

Анализ уравнений (29), (30) показывает, что затраты мощности на привод центрифуги могут быть снижены за счет выбора оптимальных конструктивных и режимных параметров центрифуги.

Заключение

1. Применение воскотопки-центрифуги в составе технологической линии по переработке пасечного воскосырья позволяет повысить качество продукции и снизить потери воска, а также уменьшить энергоёмкость и трудоемкость процесса его отжима из мервы.

2. Баланс мощности рассчитывается при условии, что центробежная сила, действующая на загруженную мерву, должна превышать сумму сил трения и тяжести, что делает возможным отделение воска. Максимальная мощность, потребляемая приводом воскотопки-центрифуги, приходится на момент пуска и определяется исходя из момента инерции загруженного барабана и действующих сил трения.

3. Полученные зависимости позволяют определить производительность и удельный расход электроэнергии на привод центрифуги. Энергоёмкость процесса может быть снижена за счет рационального выбора параметров отжима воска из мервы и уменьшения действующих сил трения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бышов, Д.Н. Анализ перспективных направлений повышения качества и выхода сортового пчелиного воска / Д.Н. Бышов, Д.Е. Каширин, В.В. Павлов // Технологические новации как фактор устойчивого и эффективного развития современного агропромышленного комплекса: материалы Национальной науч.-практ. конф., Рязань, 20 ноября, 2020 г. – Часть II. – С. 77-81.
2. Хорошунов, Н.Г. Режим работы электропривода центрифуги для откочки меда: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Хорошунов Н.Г.; Кубанский гос. аграр. ун-т. – Краснодар, 2011. – 144 л.
3. Максимов, Н.М. Многофакторное исследование режимных параметров центрифуги для отжима воска из пасечных вытопок / Н.М. Максимов, Т.Е. Федорова-Семенова, Д.В. Рыжов // Известия Великолукской гос. с.-х. академии. – 2022. – № 1. – С. 40-48.
4. Максимов, Н.М. Перспективная технология переработки воскового сырья на пасеках с использованием парогенератора / Н.М. Максимов, В.В. Морозов // Традиции и инновации в развитии АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Великие Луки, 17-18 апреля 2019 г. / Великолукская гос. с.-х. академия. – Великие Луки, 2019. – С. 493-498.
5. Максимов, Н.М. Определение энергозатрат центрифуги при отжиме воска из воскосырья / Н.М. Максимов, Д.В. Рыжов // Известия Великолукской гос. с.-х. академии. – 2023. – № 1 (42). – С. 19-27.
6. Патент 217028 U1 РФ, МПК7 A01K 59/06. Воскотопка-центрифуга: № 2022109514: заявлено 08.04.2022; опубл. 14.03.2023 / Максимов Н.М.; заявитель: Максимов Н.М. – 2 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 20.04.2024