

Математическое описание и физика процесса удаления жидкости из влажного сыпучего пористого материала при центрифугировании

Б.М. Локштанов^{1а}, В.В. Орлов^{1б}, Л.А. Жукова^{1с}, Л.А. Андреева^{1д},
Д.А. Ильюшенко^{2е}

¹ Военная академия связи им. С.М. Буденного, Тихорецкий пр., 3, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, Россия

^а blokshтанov@mail.ru, ^б artictvetal1987@gmail.com, ^с zhukovalud@yandex.ru, ^д lyudmila_andreeva_57@bk.ru,
^е dilium@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-5390-1457>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-1693-0515>,

^с <https://orcid.org/0000-0003-1784-9564>, ^д <https://orcid.org/0000-0003-3548-0131>,

^е <https://orcid.org/0000-0002-7758-5110>

Статья поступила 03.02.2022, принята 16.02.2022

Авторы статьи рассматривают процесс центрифугирования влажных пористых сыпучих материалов. Дается классификация центрифуг, обозначены схемы центрифуг непрерывного действия. Приведен расчет сил, действующих на сыпучее вещество при центрифугировании. Основной характеристикой процесса центрифугирования является фактор разделения. В статье приведены формулы для определения фактора разделения в зависимости от показателей: угловой скорости вращения барабана центрифуги, окружной скорости центра тяжести масс сыпучего материала, частоты вращения барабана на примере расчета фактора разделения. На основании допущения, что влажный пористый сыпучий материал сам является фильтратом, через который должна пройти удаляемая жидкость при центрифугировании, а также на основании теории движения жидкости в фильтрате (теория Стокса) описаны уравнения для расчета скорости фильтрации (прохождения жидкости через фильтрат). Рассмотрены процессы, происходящие в пористом влажном сыпучем материале, например, древесной щепы при центрифугировании. Сделаны расчеты для определения величины скорости фильтрации жидкости (удаление свободной влаги из щепы), центробежной силы, разделяющей способности центрифуги, индекса производительности и других параметров, характеризующих процесс центрифугирования сыпучего материала. В качестве примера расчета взята влажная щепа, которую подвергли центрифугированию на полупромышленной установке с различными факторами разделения. приводится изображение центрифуги для исследований обезвоживания сыпучих материалов; показан график интенсивности обезвоживания сосновой щепы при первоначальной влажности 120 % при различных факторах разделения. На основании теоретических исследований и результатов экспериментов выполнены расчеты промышленной центрифуги производительностью 10 пл. м/ч обезвоженной щепы и количества удаляемой из нее жидкости.

Ключевые слова: центрифугирование; обезвоживание; пористый материал; фактор разделения.

Mathematical description and physics of the process of removing liquid from a wet bulk porous material during centrifugation

B.M. Lokshтанov^{1а}, V.V. Orlov^{1б}, L.A. Zhukova^{1с}, L.A. Andreeva^{1д},
D.A. Ilyushenko^{2е}

¹ Military Academy of Communication under name of S.M. Budenny; 3, Tikhoretsky Ave., St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia

^а blokshтанov@mail.ru, ^б artictvetal1987@gmail.com, ^с zhukovalud@yandex.ru, ^д lyudmila_andreeva_57@bk.ru,
^е dilium@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-5390-1457>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-1693-0515>,

^с <https://orcid.org/0000-0003-1784-9564>, ^д <https://orcid.org/0000-0003-3548-0131>,

^е <https://orcid.org/0000-0002-7758-5110>

Received 03.02.2022, accepted 16.02.2022

In this paper, the process of centrifugation of wet porous bulk materials is considered. A classification of centrifuges and schemes of continuous centrifuges is given. The calculation of forces acting on a granular substance during centrifugation is presented. The main characteristic of the centrifugation process is the separation factor. The article provides formulas for determining the separation factor depending on the indicators: the angular speed of rotation of the centrifuge drum, the peripheral speed of the center of gravity of the

bulk material, the drum rotation speed and an example of calculating the separation factor. Based on the assumption that the wet porous bulk material is itself a filtrate through which the removed liquid must pass during centrifugation, and also on the basis of the theory of fluid motion in the filtrate (Stokes theory), equations are given for calculating the filtration rate (fluid passage through the filtrate). The processes occurring in a porous wet bulk material, for example, wood chips during centrifugation, are considered. Calculations are given to determine the rate of liquid filtration (removal of free moisture from chips), centrifugal force, separating ability of the centrifuge, productivity index and other parameters characterizing the process of centrifugation of bulk material. As an example for the calculations of the centrifugation process, wet chips are taken, which are centrifuged in a semi-industrial plant with various separation factors. The image of a centrifuge for studies of dehydration of bulk materials is provided; a graph of the intensity of pine chips dewatering at an initial moisture content of 120% with different separation factors is shown. On the basis of the obtained theoretical calculations and the results of experiments, the calculation of an industrial centrifuge with a capacity of 10 m³ / hour of dewatered chips and the calculation of the amount of liquid removed from it are carried out.

Keywords: centrifugation; dewatering; porous material; separation factor.

Введение. Для разделения неоднородных систем, таких как эмульсии, суспензии, жидкие и твердые вещества (мед и соты, белое и вода, древесина и жидкость, сливки и масло, очистка воды от нефтепродуктов [18; 19] и т. д.) широко применяют центрифугирование, которое на несколько порядков ускоряет процессы отстоя, фильтрации, разделения [1; 16].

Центрифугирование основано на процессах, происходящих в поле центробежных сил, возникающих при быстро вращающихся барабанах (роторах) и самих вращающихся материалов [2; 4; 6]. Под действием центробежных сил, например, суспензии разделяются на осадок и жидкую фазу. Последнюю фазу называют фугатом. Осадок остается в роторе, а жидкая фаза удаляется из ротора (через перфорацию или сетку).

Центрифуги классифицируют по следующим показателям:

- по величине фактора разделения (рассмотрены ниже);
- по физической сущности процесса: осадительные и фильтрующие;
- по характеру работы: периодические и непрерывные;
- по расположению ротора: горизонтальные, вертикальные, наклонные;
- по способу выгрузки осадка (материала): ножевые, инерционные, шнековые, скребковые, вибрационные, вибрационно-пульсирующие.

Методика исследования. Основной характеристикой центрифуги является фактор разделения [3; 5]. По фактору разделения центрифуги делят на нормальные, с фактором разделения $K_p < 3000$, и скоростные, или сверхцентрифуги с $K_p > 3500$.

При небольших объемах обработки веществ применяют центрифуги периодического действия, а при больших промышленных объемах — центрифуги непрерывного действия [11; 15] (рис. 1). За период центрифугирования осадок или твердая фаза вещества должна пройти по стенке барабана и выйти из него с требуемыми параметрами. Ниже приведен расчет сил, действующих на сыпучее вещество (например, лузга от семечек, опилки, щепа, песок строительный при обезвоживании или удалении масла и т. д.) при центрифугировании и перемещении вещества по барабану вдоль его оси до выхода вещества из центрифуги.

В связи со сложностью закономерностей, происходящих при центрифугировании, и разнообразия конструкций центрифуг, применяемых на практике, разработка теории процесса и точных методов расчета за-

труднена [14; 20]. Отметим, что наиболее надежные данные для расчета процесса центрифугирования можно получить на основании опытов на лабораторных центрифугах и наметить оптимальные условия для работы центрифуг, особенно для центрифуг непрерывного действия [10; 13].

Создание центрифуг обусловлено стремлением повысить скорость разделения неоднородных систем в поле центробежных сил по сравнению со скоростью разделения этих систем в отстойниках, фильтрах, сушилках. В связи с тем, что в центрифугах возникают огромные центробежные силы, мы будем вести расчеты при силах, не разрушающих сам материал (твердые вещества, такие как соты, лузга, щепа, белое и т. д.) [7; 8].

Оценку процесса центрифугирования в общем виде начнем с отношения центробежной силы к силе тяжести сыпучего вещества и сравним ускорения, действующие на тело в центробежном и гравитационном полях, так как применительно к сыпучему телу (и не только к сыпучему) определенной массы силы пропорциональны ускорениям.

Разделяющее действие при центрифугировании возрастает пропорционально величине центробежного фактора разделения K_p , который представляет собой отношение центробежного ускорения к ускорению силы тяжести g :

$$K_p = \frac{\omega^2 \cdot r}{g}, \quad (1)$$

где ω — угловая скорость вращения барабана центрифуги, rad/s ; r — радиус от центра вращения барабана центрифуги до центра тяжести сыпучего вещества, m ; g — ускорение свободного падения вещества $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Если числитель и знаменатель в формуле (1) умножить на массу вращающегося вещества m , то в числителе мы получим центробежную силу $F_{ц}$, а в знаменателе — силу тяжести F_T , или:

$$m \cdot \omega^2 \cdot r = F_{ц}, \quad (2)$$

$$m \cdot g = F_T. \quad (3)$$

Таким образом, фактор разделения K_p можно определить как отношение центробежной силы $F_{ц}$ к силе тяжести:

$$K = \frac{F_{ц}}{F_T} \quad (4)$$

Центрифуги (роторы, барабаны) имеют скорость вращения, а сыпучее вещество, находящееся в барабане, обладает определенной линейной (окружной) скоростью v (м/с), которую можно определить из формулы $\omega = \frac{v}{r}$. Подставив это значение в формулу (1), получим:

$$K_p = \left(\frac{v}{r}\right)^2 \cdot \frac{r}{g} = \frac{v^2}{r \cdot g} \quad (5)$$

Если скорость вращения центрифуги задана числом оборотов в минуту n , то угловую скорость ω можно выразить $\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi \cdot n}{30}$. Подставив это выражение в формулу (1), получим:

$$K_p = \left(\frac{\pi \cdot n}{30}\right)^2 \cdot \frac{r}{g} = \frac{\pi^2 \cdot n^2 \cdot r}{900 \cdot g} \quad (6)$$

Если принять, что численное значение π^2 и g примерно равны, то получим:

$$K_p = \frac{n^2 \cdot r}{900} \quad (7)$$

Например, для центрифуги с ротором диаметром 1 000 мм (1 м) или радиусом $r = 0,5$ м, вращающимся со скоростью $n = 1\,200$ оборотов в минуту, фактор разделения K_p будет:

$$K_p = \frac{1200^2 \cdot 0,5}{900} = 800.$$

Рассмотрим, что происходит с сыпучим материалом при центрифугировании. Материал влажный, а нам необходимо удалить влагу. Примем, что сыпучий материал сам выполняет роль фильтра, т. е. через него проходит влага (из него выходит жидкость).

Скорость фильтрации определяется из равенства силы сопротивления и центробежной силы. В области Стокса [9; 21] для самых мелких частиц при $Re < 2$ скорость фильтрации будет:

$$W_{\text{фильтрации}} = W_{\text{фильтр}}^0 \cdot K_p \quad (9)$$

где $W_{\text{фильтр}}^0$ — скорость фильтрации данной частицы (жидкость) под действием силы тяжести.

В переходной области при $Re = 2 \div 500$:

$$W_{\text{фильтр}} = W_{\text{фильтр}}^0 \cdot K_p^{0,75} \quad (10)$$

В автомодельной области при $Re > 500$:

$$W_{\text{фильтр}} = W_{\text{фильтр}}^0 \cdot K_p^{0,5} \quad (11)$$

Так как центробежная сила F_u выражается равенством:

$$F_u = \frac{m \cdot v^2}{r} = \frac{G \cdot v^2}{g \cdot r} \quad (12)$$

где m — масса вращающегося материала в центрифуге, кг; G — вес вращающегося материала (сыпучего), Н; v — окружная (линейная) скорость вращения центра

масс сыпучего материала в центрифуге, м/с; r — радиус вращения центра масс сыпучего вещества.

Тогда окружную скорость v можно определить по формуле:

$$v = \omega \cdot r = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} r, \quad (13)$$

где ω — угловая скорость вращения барабана, рад/с; n — число оборотов барабана в минуту.

Учитывая формулы для определения составляющих (12) и (13), получим значения для определения центробежной силы:

$$F_u = \frac{G}{r \cdot g} \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} r\right)^2 \quad (14)$$

или:

$$F_u = \frac{G \cdot r \cdot n^2 \cdot \pi^2}{900 \cdot g} = \frac{G \cdot r \cdot n^2}{900} \quad (15)$$

Площадь цилиндрической поверхности фильтра (сыпучего материала):

$$F = \pi(D-h) \cdot H, \quad (16)$$

где D — диаметр расположения центра масс, м; h — толщина слоя сыпучего материала, м; H — высота барабана, м.

Разделяющая способность центрифуг характеризуется индексом производительности Σ , который является произведением площади F на фактор разделения K_p :

$$\Sigma = F \cdot K_p \quad (17)$$

Отсюда:

$$\frac{\Sigma}{F} = K_p \quad (18)$$

Подставив в формулу (17) известные величины для F и K_p , получим:

$$\Sigma = F \cdot K_p = \pi \cdot H \frac{(D-h)^2 \pi^2 \cdot n^2}{1800 \cdot g} \quad (19)$$

В центрифугах непрерывного действия материал, загружаемый в барабан, должен переместиться по поверхности барабана и выйти из него за время, необходимое для обработки материала (удаления жидкости из влажного сыпучего материала).

В связи с этим поверхность барабана выполняют конической формы [17]. Отметим, что угол конусности (наклона стенки барабана) выполняют очень малым (в пределах 1–2°), так как при больших значениях угла резко увеличиваются скорости движения сыпучих материалов по поверхности барабана.

Ниже приводится пример расчета параметров центрифуги непрерывного действия для удаления свободной влаги из измельченной древесины (щепы).

На основании опытов по обезвоживанию щепы на лабораторной центрифуге периодического действия было установлено время, за которое происходило обезвоживание щепы, произведенной из разных пород древесины. Кроме того, щепа была нарублена из древесины с первоначальной влажностью 60; 100 и 120 %

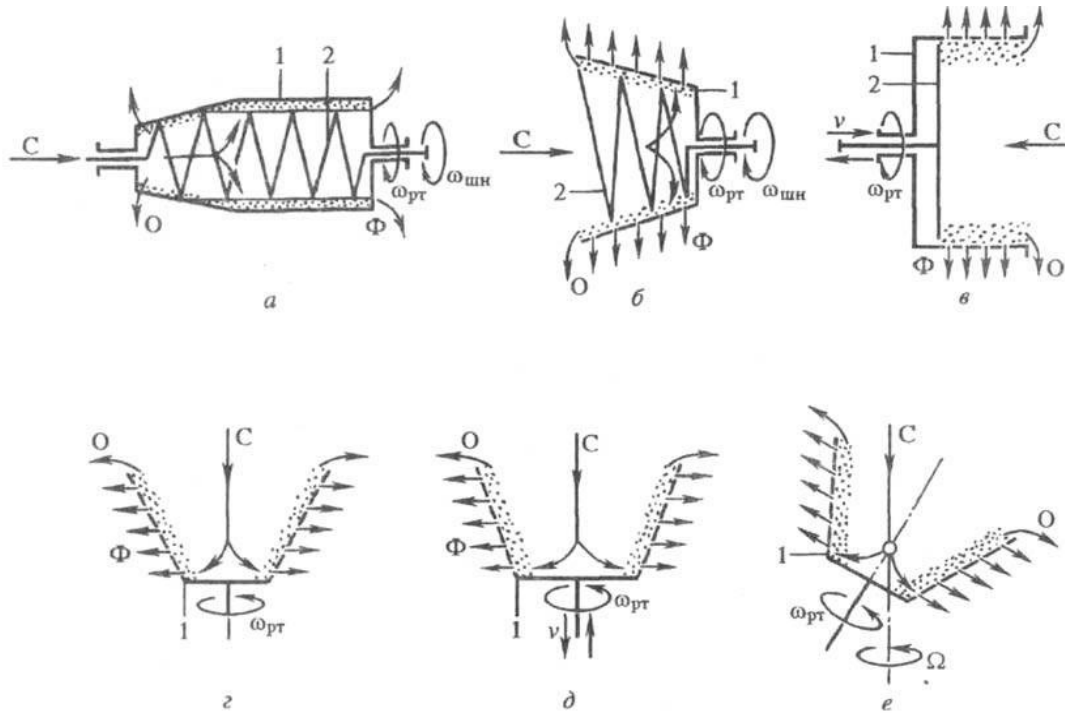


Рис. 1. Центрифуги непрерывного действия: *a* — осадительная шнековая; *б* — фильтрующая шнековая; *в* — с пульсирующей выгрузкой осадка; *г* — инерционная; *д* — вибрационная; *е* — прецессионная; 1 — ротор; 2 — механизм выгрузки

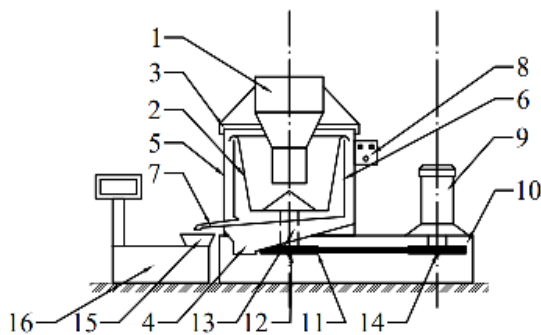


Рис. 2. Центрифуга для исследований обезвоживания сыпучих материалов

Благодаря некоторой конусности барабана (угол конусности 3–4°) обеспечивается движение слоя щепы вверх и выход обезвоженной щепы из барабана в пространство между корпусом центрифуги 5 и отбойником жидкости 6. Сухая щепа выходит из установки через выпуск 4. Удаляемая жидкость из щепы через перфорацию барабана сливается через выпуск 7 в чашку 15 электронных весов 16. С пульта управления 8 ведутся включение двигателя 9 и установка режима его работы. Через съемные шкивы 12, 14 и вал 13 производят изменения скорости вращения центрифуги для обеспечения факторов разделения $K_p = 350; 700; 1\ 050$.

Экспериментальная модернизированная центрифуга для обезвоживания сыпучего вещества (щепы) позволяет проводить опыты в непрерывном и периодическом режиме [12; 13]. Для этого центрифуга имеет регулируемую боковую стенку барабана. Регулируемая стенка выполнена с разрезом и смонтирована внахлест, что обеспечивает конусность стенки с разными углами, в том числе и в виде цилиндра (прямая). Съемная стенка имеет перфорацию (отверстия диаметром 1–3 мм) для выхода жидкости из цилиндра.

С помощью подвижного загрузочного устройства 1 (рис. 2) можно регулировать количество материала, загружаемого в барабан 2, т. е. регулировать толщину слоя щепы, располагаемого по внутренней поверхности барабана. Это достигается тем, что загрузочное устройство 1 можно поднимать и тем самым увеличивать зазор между устройством и днищем барабана — количество подаваемой щепы увеличивается и опускать — количество подаваемой щепы уменьшается.

Привод центрифуги имеет сменные шкивы, благодаря которым можно изменять скорость вращения барабана и создавать требуемую величину фактора разделения. В данном случае имеется возможность обеспечивать фактор разделения по трем величинам: 350; 700; 1 050. На рис. 3 [13] показаны результаты обезвоживания сосновой щепы с первоначальной влажностью 120 % при различных факторах разделения.

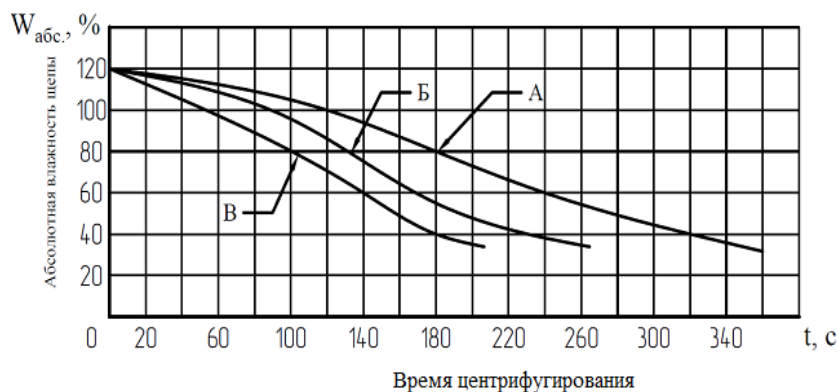


Рис. 3. Интенсивность обезвоживания сосновой щепы при первоначальной влажности 120 % при различных факторах разделения F: А — при факторе разделения 350; Б — 700; В — 1 050

Расчет производительности промышленной центрифуги для обезвоживания щепы. Центрифуга для обезвоживания щепы до влажности 30...40 % (абс.) устанавливается, например, на раме мобильной рубительной машины, и ее производительность должна соответствовать производительности рубительной машины. Центрифуга представляет собой барабан с перфорацией и небольшой конусностью. Центральный угол перевернутого конуса составляет 4° , угол наклона образующей конуса — 2° .

Размеры центрифуги, которая устанавливается на мобильную рубительную машину, не должны превышать габариты машины. Высота центрифуги (барабана) принимается $H = 1$ м. Диаметр центрифуги $D = 1,5$ м, при этом радиус центрифуги $R = 0,75$ м. Скорость вращения барабана центрифуги $n = 2\,000$ об/мин. Тогда: угловая скорость:

$$\omega = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} = \frac{3,14 \cdot 1,5 \cdot 2000}{60} = 157 \text{ с}^{-1};$$

фактор разделения:

$$K_p = \frac{R \cdot \omega^2}{g} = \frac{0,75 \cdot 157^2}{9,85} = 1876.$$

При расчете производительности центрифуги принимаем, что толщина слоя щепы, находящейся в центрифуге, $S = 0,12$ м. Тогда насыпной объем щепы в центрифуге V_n составит:

$$V_n = \pi \cdot D \cdot S \cdot H = 3,14 \cdot 1,5 \cdot 0,12 \cdot 1 = 0,562 \text{ м}^3.$$

Плотный объем щепы в центрифуге $V_{пл}$ рассчитаем с учетом коэффициента полндревесности щепы: $K = 0,45$:

$$V_{пл} = V_n \cdot K = 0,562 \cdot 0,45 = 0,252 \text{ пл. м}^3.$$

Этот плотный объем щепы должен пройти через центрифугу за время центрифугирования $t_{ц} = 90$ с и выйти из центрифуги за счет уклона боковой поверхности (угол 2°). Скорость движения слоя щепы тол-

щиной $S = 0,12$ м по поверхности центрифуги $V = 0,01$ м/с. Тогда часовая производительность центрифуги будет:

$$P = \frac{V_{пл} \cdot 3600}{t_{ц}} = \frac{0,252 \cdot 3600}{90} = 10,1 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Мы хотим снизить влажность щепы с первоначального показателя 100 % (абс.) или 50 % (отн.) до ~ 40 % (абс.) или 30 % (отн.). Таким образом, мы хотим уменьшить массу щепы на 0,2 (в долях).

Тогда количество влаги, удаляемой из щепы с первоначальной плотностью древесины $\rho = 800$ кг/м³, за 1 ч работы центрифуги, $Q_{вл}$ составит:

$$Q_{вл} = P \cdot \rho \cdot 0,2 = 10,1 \cdot 800 \cdot 0,2 = 1612 \text{ кг.}$$

Таким образом, за 1 ч работы центрифуги масса нарубленной щепы снизится с $m_1 = 10,1 \cdot 800 = 8\,080$ кг до $m_2 = 6\,468$ кг. Объем щепы остался прежним — 10,1 м³. Плотность щепы (древесины) снизилась до 640,4 кг/м³.

Полученная производительность центрифуги ~ 10 м³/ч должна согласовываться с рубительной машиной той же производительности. Если производительность центрифуги меньше, чем рубительной машины, тогда устанавливают несколько центрифуг.

Выводы

1. Центрифугирование позволяет удалять жидкость с влажных пористых сыпучих веществ с фактором разделения K_p с 350 до 3 000, т. е. на нормальных центрифугах по классификации, приведенной в статье. При этом разрушение самого материала не наблюдается;

2. Исследования по обезвоживанию влажного пористого материала, такого как древесная щепа с высокой начальной влажностью 120 % (отн.) показали, что свободная влага может быть вся удалена с помощью центрифугирования в пределах 1,5–2 мин, что позволяет конструировать промышленные центрифуги с минимальными габаритами.

Литература

1. Соколов В.И. Современные промышленные центрифуги. 2-изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1967. 523 с.

2. Пятакин В.И. Проблема повышения плавучести круглых лесоматериалов. М.: Лесная пром-сть, 1976. 264 с.
3. Шкоропад Д.Е., Новиков О.П. Центрифуги и сепараторы для химических производств. М.: Химия, 1987. 256 с.

4. Пятакин В.И. Проблема обезвоживания и сохранения плавучести древесины: дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛТА, 1979. Т. 1. 309 с.
5. Локштанов Б.М., Бачериков И.В., Орлов В.В. Математическая модель процесса обезвоживания щепы центрифугированием // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2014. Вып. 209. С. 185-197.
6. Васильев А.С. Обезвоживание древесного сырья центробежным способом // Глобальный научный потенциал. 2012. № 12. С. 53-55.
7. Богданов Д.М. Развитие исследований в области обезвоживания древесины и коры центробежным способом // Перспективы науки. 2014. № 10 (61). С. 81-84.
8. Васильев А.С. Новый метод обезвоживания пиломатериалов центробежным способом // Политематический сетевой электрон. науч. журнал КубГАУ. 2012. № 05 (79). URL: <http://ej.kubagro.ru/2012/05/pdf/21.pdf> (дата обращения: 23.02.2022).
9. Базаров С.М. К обезвоживанию и пропитке древесины в силовом механическом поле. М.: ВНИПИЭИ, 1989. № 2568.
10. Оти Мото П.М. Результаты исследования качества обезвоженной древесины при хранении // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2007. Вып. 181. С. 145-150.
11. Соколов В.И. Центрифугирование. М.: Химия, 1976. 405 с.
12. Локштанов Б.М., Бачериков И.В., Орлов В.В. Обезвоживание и очистка топливной щепы в условиях лесосеки // Леса России XXI века: материалы одиннадцатой Междунар. науч.-технической конф. СПб.: СПбГЛТУ, 2014. № 1. С. 160-166.
13. Орлов В.В. Повышение эксплуатационных свойств топливной щепы из лесосечных отходов путем ее обезвоживания: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб.: С.-Петерб. гос. лесотехн. акад. им. С.М. Кирова, 2016. 19 с.
14. Barker T.A. Centrifugung. Chemical and Process Engineering. 1963. V. 44. № 4. P. 192-197.
15. Scroll centrifuge separates fine particles. Chem. Eng. 71. 1964. № 19. P. 114.
16. Smith I.C. Centrifugation Equipment: Applications, industrial and Eng. Chem. 1961. V. 53. № 6. P. 439-444.
17. Trawinski H.F. Zentrifugen und Hydrozyklonen, Chem-Ing-Techn., 30. 1958. № 12. P. 831-838.
18. Trowbridge M.E. O.K. Centrifugal Purification of Oils for Marine Service. Trans. Inst. Mar. Eng. 1960. V. 75. № 1. P. 1-22.
19. Bradley D. Medium - speed Centrifuges, Chemical and Process Engineering, 46. 1965. № 1. P. 595-606.
20. Keith F.W. Centrifugal Concentration and Coalescence Equipment. Chemical Engineering Progress. 1963. V. 59. № 4. P. 35-42.
21. Разделение гетерогенных систем в поле центробежных сил / сост. И.Д. Брус, Н.С. Тураев, Р.В. Оствальд, В.А. Гребнев. Томск, 2008. 14 с. URL: <https://portal.tpu.ru/SHARED/o/OSTVALD/Education/3cours e/Tab1/centrifugirovanie.pdf> (дата обращения: 05.01.2022).
1. Sokolov V.I. Modern industrial centrifuges. 2-izd., pererab. i dop. M.: Mashinostroenie, 1967. 523 p.
2. Patyakin V.I. The problem of increasing the buoyancy of round timber. M.: Lesnaya prom-st', 1976. 264 p.
3. SHkoropad D.E., Novikov O.P. Centrifuges and separators for chemical industries. M.: Himiya, 1987. 256 p.
4. Patyakin V.I. The problem of dehydration and preservation of the buoyancy of wood: dis. ... kand. tekhn. nauk. L.: LTA, 1979. V. 1. 309 p.
5. Lokshtanov B.M., Bacherikov I.V., Orlov V.V. Mathematical model of the chip dehydration process by centrifugation // Izvestia SPbLTA. 2014. Vyp. 209. P. 185-197.
6. Vasil'ev A.S. Dewatering of wood raw materials by centrifugal method // Global Scientific Potential. 2012. № 12. P. 53-55.
7. Bogdanov D.M. Development of research in the field of dewatering of wood and bark by centrifugal method // Science Prospects. 2014. № 10 (61). P. 81-84.
8. Vasil'ev A.S. A new method of dewatering sawn timber by centrifugal method // Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University Scientific Journal of KubSAU. 2012. № 05 (79). URL: <http://ej.kubagro.ru/2012/05/pdf/21.pdf> (data obrashcheniya: 23.02.2022).
9. Bazarov S.M. To dehydration and impregnation of wood in a mechanical force field. M.: VNIPIEI, 1989. № 2568.
10. Oti Moto P.M. Results of the study of the quality of dehydrated wood during storage // Izvestia SPbLTA. 2007. Vyp. 181. P. 145-150.
11. Sokolov V.I. Centrifugation. M.: Himiya, 1976. 405 p.
12. Lokshtanov B.M., Bacherikov I.V., Orlov V.V. Dewatering and cleaning of fuel chips in a cutting area // Lesa Rossii XXI veka: materialy odinnadcatoj Mezhdunar. nauch.-tekhneskoj konf. SPb.: SPbGLTU, 2014. № 1. P. 160-166.
13. Orlov V.V. Improving the operational properties of fuel chips from logging waste by dewatering it: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb.: S.-Peterb. gos. lesotekhn. akad. im. S.M. Kirova, 2016. 19 p.
14. Barker T.A. Centrifugung. Chemical and Process Engineering. 1963. V. 44. № 4. P. 192-197.
15. Scroll centrifuge separates fine particles. Chem. Eng. 71. 1964. № 19. P. 114.
16. Smith I.C. Centrifugation Equipment: Applications, industrial and Eng. Chem. 1961. V. 53. № 6. P. 439-444.
17. Trawinski H.F. Zentrifugen und Hydrozyklonen, Chem-Ing-Techn., 30. 1958. № 12. P. 831-838.
18. Trowbridge M.E. O.K. Centrifugal Purification of Oils for Marine Service. Trans. Inst. Mar. Eng. 1960. V. 75. № 1. P. 1-22.
19. Bradley D. Medium - speed Centrifuges, Chemical and Process Engineering, 46. 1965. № 1. P. 595-606.
20. Keith F.W. Centrifugal Concentration and Coalescence Equipment. Chemical Engineering Progress. 1963. V. 59. № 4. P. 35-42.
21. Separation of heterogeneous systems in the field of centrifugal forces / sost. I.D. Brus, N.S. Turaev, R.V. Ostval'd, V.A. Grebnev. Tomsk, 2008. 14 p. URL: <https://portal.tpu.ru/SHARED/o/OSTVALD/Education/3cours e/Tab1/centrifugirovanie.pdf> (data obrashcheniya: 05.01.2022).

References