



МРНТИ 65.13.13

Научная статья

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-7263-2024-146-1-132-150>

Критериальное уравнение при оптимизации режимов работы фильтрующей центрифуги

М.К. Шаяхметова^{1*}, А.Л. Касенов², А.К. Шаяхметова¹, Б.А. Лобасенко³

¹ НАО «Университет имени Шакарима города Семей», Семей, Казахстан

² НАО «Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина», Астана, Казахстан

³ Кемеровский государственный университет, Кемерово Россия

(E-mail: ¹madina07sh@mail.ru)

Аннотация. В Республике Казахстан одним из приоритетных направлений развития средних и малых предприятий является внедрение технологий безотходной переработки сырья. К числу таких производств следует отнести средние и малые мясоперерабатывающие предприятия. В совершенствовании безотходной технологии мясopодуктов производство сухих кормов весьма востребовано по причине большой пищевой ценности последних, которые зачастую превосходят другие кормовые продукты. В производстве сухих кормов для животных процесс центрифугирования используется для отделения жира от шквары. Применение процесса центрифугирования в выделении жира из шквары приводит к тому, что качество выделяемого жира значительно выше, чем в процессах прессования и экстракции.

С учетом потребностей развития мясоперерабатывающего производства большое значение имеет совершенствование процесса разделения жидких неоднородных систем на центробежном оборудовании, предусматривающее снижение удельных энергозатрат оборудования и собственные возможности увеличения объемов производства продукции. В свете вышеизложенного была сформулирована цель научного исследования: совершенствование конструктивных характеристик и режимов работы фильтрующей центрифуги для получения шквары как целевого конечного продукта. В качестве основных направлений исследования выбраны различные варианты конструктивной композиции опытной установки, испытание и физико-математический анализ данных, на основании которых получили наиболее оптимальные режимы работы центробежной установки с технико-экономических позиций.

В качестве идей научного исследования полагали физико-математическую обработку данных эксперимента, на основании которых построили математические и физические модели. Последние использовали для решения поставленных практических задач научного исследования.

Ключевые слова: процесс, технология, технико-экономическая оптимизация, центрифуга, модель, производство, критериальные уравнения.

Введение

Актуальность выбранной темы по совершенствованию конструкции и режимов работы фильтрующей центрифуги обусловлена необходимостью внедрения технологии безотходной переработки мясного сырья с целью производства сухих кормов, обладающих высокой пищевой ценностью. Важнейшим звеном в данной переработке является технологическое оборудование для разделения неоднородных жидких систем, представленное в данной работе фильтрующей центрифугой. Вполне понятно, что важнейшими требованиями к эксплуатации данного оборудования (в нашем случае центрифуги) являются совершенствование конструкции и оптимизация режимов работы центрифуги, что необходимо для повышения производительности и снижения удельных энергозатрат. Последнее особенно актуально в свете внедрения в общемировом масштабе ресурсосберегающих технологий и перехода к так называемой "зелёной" экономике [1].

Работа основана на опыте отечественных и зарубежных учёных

Большой вклад в разработку теории и совершенствование конструкций пищевых центрифуг технико-экономической оптимизацией работы последних внесли отечественные учёные: Г.М. Знаменский, В.И. Соколов, Е.В. Томбаев, С.М. Гребенюк, А.И.Пелеев, С. Г. Либерман, В.Г. Жуков, Аснер В.И., Бремер Г.И., Гельперин; В. А. Масликов, И.А. Рогов, А. В. Горбатов, А.Н. Мачихин, М. Б. Азаров, У.Ч.Чоманов, Д.Т. Жайлаубаев, С.Н. Туменов, Оспанов, Е. С. Спандияров, А. Б. Оспанов, С.В. Федотов, А. Е. Еренгалиев., А. К. Какимов., А. Л. Касенова.

Следует отметить авторов конструкций горизонтальных шнековых центрифуг для разделения жира: Лимонов Г.Е., Деханов В.А. (линия Я8-ФОБ-М); фильтрующих центрифуг для извлечения жира из измельчённой кости: М.Л.Файвишевский, С.Г. Либерман, К.Д. Синицын, В.П. Петровский (ФМД-802К-05 в линии Я8-ФЛК); М.Л.Файвишевский, Н.П.Кузьменко (интегральная обработка мякотного сырья на усовершенствованной машине Я8-ФИБ).

К числу зарубежных учёных следует отнести Д.Рассела; Д. Милнера; М.Кастельяно; П.Переса; И. Лодоса, Грейса Д., Дъери И., Ненигера Е., Сторроу И.

Методология

Выработана блок-схема проведения эксперимента, в которой показана последовательность всех отдельных операций и процессов. Отображена схема экспериментальной центробежной установки. Рассмотрены технологические операции, сформированы весовые партии сырья. Выбраны временные промежутки опытов, скоростные режимы ротора центрифуги. Показаны необходимые замеры параметров и режимов. Данные замеров и дальнейших вычислений по каждому опыту помещены в интегральную таблицу (базу данных эксперимента). На основании данной таблицы в дальнейших разделах выполнили требуемые расчёты получили математические и физические модели.

В качестве исходного сырья использовали отходы производства переработки свинины в виде агломерата свиного жира, шквары, водной суспензии. Для интенсификации процесса центрифугирования свиное сырьё разогревали до температурного диапазона 75–80С. Сырьё дробили на отдельные партии по весу, в среднем, от 400 до 1000 г по 12 навесок. В свою очередь сформировали 4 такие партии в соответствии с выбранной траекторией эксперимента. Все 4 партии предназначались для 4-х частотных режимов оборотов ротора центрифуги: 1000, 1500, 2000, 2500 мин⁻¹. Применили электродвигатель центрифуги с регулировкой частоты вращения ротора. Каждый частотный режим включал в себя 3 временных цикла центрифугирования: 5, 7, 10, 15 мин (с повтором 3 раза). При этом загрузка по массе (весу) составляла от 410 до 1000 г.

По окончании каждого опыта полученная фаза шквары взвешивалась. Все результаты ($G_{ш} \cdot t$) сводились в журнал наблюдений. Таким образом, каждый частотный режим состоял из 12-ти опытов. Все 4 частотных режима в сумме составили 48 опытов. Рассчитали производительность центрифуги по выходу шквары $G_{ш}$ г/мин, производительность центрифуги по загружаемому сырью G_c , г/с. Рассчитали потребляемую мощность электродвигателя центрифуги в кВт, $N_{эдв} \cdot 10^3$, а также значения нагрузки мощности электродвигателя за период каждого опыта $N_{эдв} \cdot 6 \cdot 10^4$ кВт·ч. Все значения замеров в опытах и полученные расчётным путём внесли в таблицу 1. Опытные и расчётные данные эксперимента.

Числовые значения опытов математически обработали. Получили математические модели эксперимента с проверкой адекватности вычислений. В результате провели оптимизацию работы центрифуги на основе математического моделирования. Практические испытания подтвердили правильность, адекватность полученной модели (раздел «Математическая модель»).

Практические результаты эксперимента представили в виде графических зависимостей (раздел «Физическая модель»). Анализируя полученные графики, были сделаны выводы и получены алгебраические выражения полученных функций.

Продолжая физическое моделирование, используя теоремы подобия, получили ряд критериальных уравнений, описывающих энергетические и материальные зависимости при центрифугировании. Полученные критериальные уравнения позволяют достаточно просто рассчитать оптимальные значения производительности установки и затраты мощности при различных режимах эксплуатации [2,3].

На основании опытных и расчётных значений эксперимента были сделаны обоснованные выводы по оптимальным значениям частоты оборотов ротора и максимальных выходах шквары в процентном соотношении и по производительности. Выяснены оптимальные технико-экономические режимы работы экспериментальной фильтрующей центрифуги.

В ходе проведения эксперимента выяснили следующие недостатки экспериментальной центрифуги: низкую производительность; короткий вал шнека питателя; толстые стенки фильтрующего барабана; низкий процент отделения жира от шквары.

С целью совершенствования конструкции установки произвели следующие изменения:

1. Удлинили шнековое разгрузочное устройство, чтобы шнек доставал дно фильтрующего барабана для полной выгрузки.

2. Разгрузочное устройство снабдили подвижным скребком, совмещенным с рычагом, позволяющем смещать скребок и периодически снимать твердую фазу с поверхности фильтрующего барабана, направляя твердую фазу в разгрузочное устройство. При этом геометрическая ось скребка совпадает с направлением результирующих двух сил: силы центрифугирования, направленной перпендикулярно поверхности барабана, и поступательной силы вращения барабана.

С целью увеличения процента выхода шквары при центрифугировании в ходе эксперимента, увеличивая частоту вращения ротора, определили оптимальное число оборотов ротора, при котором был обеспечен максимальный выход искомого жира [13].

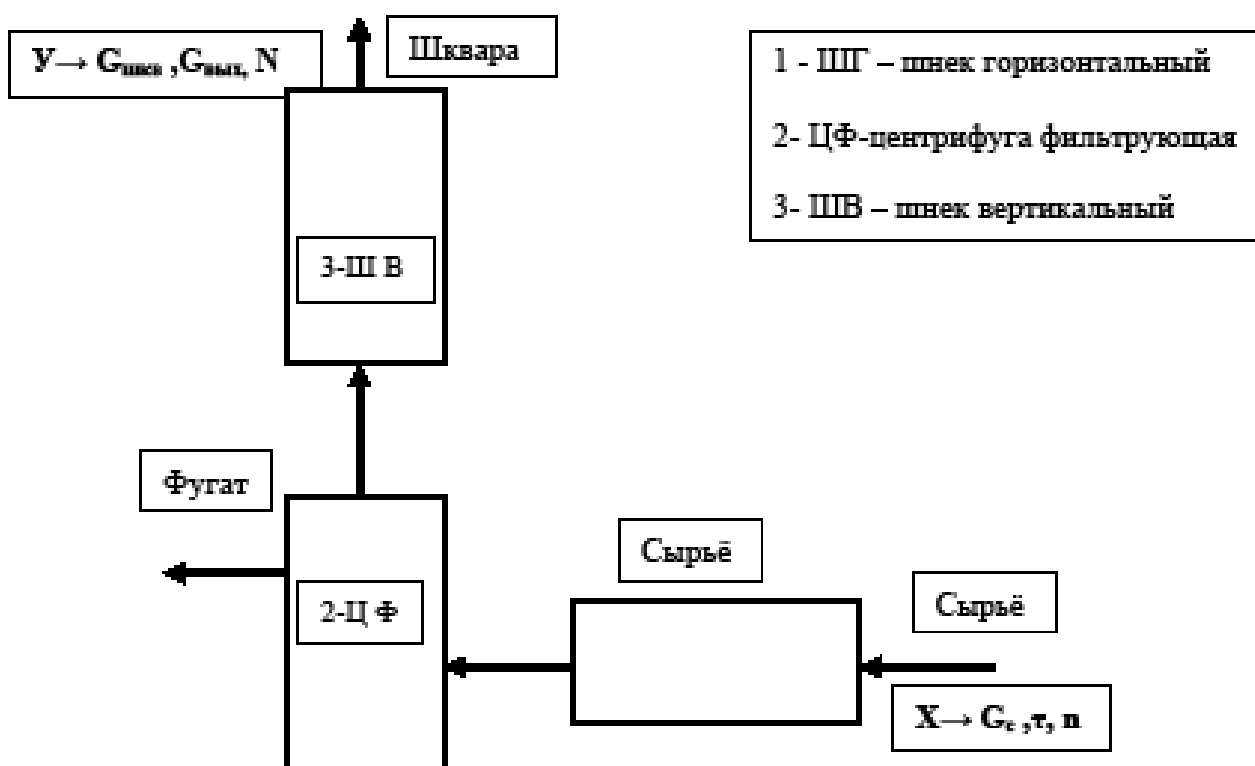


Рисунок 1. Блок-схема экспериментальной установки

Таблица 1

Параметры блок-схемы

Управляющие параметры X:	Управляемые параметры Y:
1. Масса загружаемого сырья. G_c , г	1. Массовый выход шквары $G_{\text{вых}}$, г.
2. Время обработки сырья. τ , мин	2. Производительность по шкваре $G_{\text{ш}}$, г/мин
3. Частота вращения ротора центрифуги n , б/мин.	3. Потребная мощность, N, кВт.

2. Частный вид физической модели. Представили в виде дифференциального уравнения, позволяющего выполнить материальный расчёт периодического, а также непрерывного процессов фильтрования при известных значениях избыточного давления и табличных или расчётных значений сопротивления осадка и фильтрующей перегородки.

$$\frac{dV}{F \cdot dt} = \frac{\Delta p}{\mu \cdot (R_{oc} + R_{ф.п.})} \quad (1)$$

где dV – элементарный объём (m^3) неоднородной жидкой системы (суспензии), прошедший через фильтр, через поверхность фильтра F за элементарное время dt ;

dV/dt – объёмный расход суспензии, m^3/c ;

Δp – избыточное давление, вызванное центробежной силой, Па;

R_{oc} – сопротивление слоя осадка, $1/m^2$;

$R_{ф.п.}$ – сопротивление фильтрующей перегородки, $1/m^2$;

μ – динамический коэффициент вязкости суспензии, Па·с.

Величина центробежной силы (ЦБС), действующей на частицы жидкости и осадка, непрерывно изменяется во времени в пусковой период и затем становится постоянной до периода критической толщины слоя осадка [3,4]. Динамическое сопротивление процесса фильтрования существенно возрастает R_{oc} . Затем центробежное давление увеличивают до некоторого рабочего значения [5]. Обеспечивается постоянная скорость фильтрования. Возможен также режим постоянного избыточного давления. В этом случае скорость фильтрования постепенно снижается до некоторого критического значения.

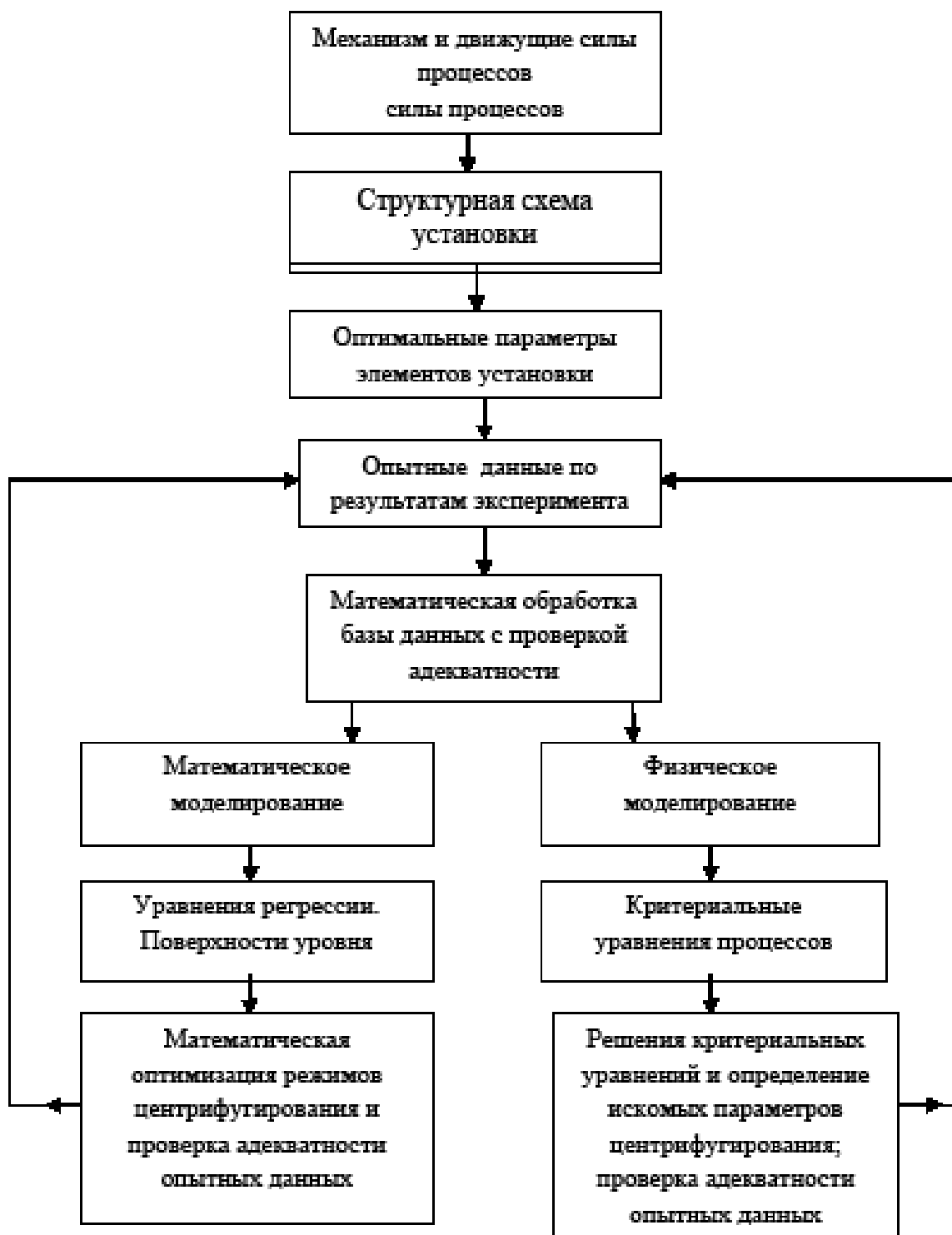


Рисунок 2. Блок-схема эксперимента и физико-математического моделирования

3. Физические модели центрифугирования

Дифференциальное уравнение баланса давлений на бесконечно тонкий слой примет вид:

$$-dp = -dp_c - dp_k - dp_{тр} \quad (2)$$

где dp – полный перепад давления (фильтрующий напор);

– dp_c – градиент давления в жидкости, движущейся через осадок в центробежном поле;

– $d_{рк}$ – градиент давления в жидкости, появляющийся в результате изменения кинетической энергии потока;

– $dp_{тр}$ – градиент давления, затрачиваемый на преодоление сил трения.

Дифференциальное уравнение материального баланса по твёрдой фазе в элементарном слое осадка с поверхностью $F_{oc} = 2\pi \cdot r \cdot h$:

$$C \cdot dV = 2\pi \cdot r \cdot h \cdot \rho_{мс} \cdot [1 - \varepsilon] dr \quad (3)$$

где C – концентрация твёрдой фазы в исходной суспензии, кг/м³ фильтрата;

dV – увеличение объёма фильтрата за время вращения dt , м³;

$\rho_{тв}$ – плотность твёрдой фазы, кг/м³;

ε – порозность осадка;

h – высота барабана центрифуги, м.

Дифференциальное уравнение материального баланса по фильтрату для выделенного элемента в слое:

$$\frac{dV}{d\tau} = 2\pi \cdot r \cdot h \cdot w \quad (4)$$

w – скорость фильтрата, движущегося через слой осадка толщиной dr .

Продифференцируем уравнение (4):

$$dw = \frac{dV}{d\tau} \cdot \frac{dr}{2\pi \cdot h \cdot r^2} \quad (5)$$

$$dp_k = 2\pi \cdot r \cdot h \cdot w \quad (6)$$

С учётом уравнений (4) и (5) уравнение (2) примет вид:

$$dp_k = -\rho \cdot \left(\frac{dV}{d\tau} \right)^2 \cdot \frac{dr}{(2\pi \cdot h)^2 \cdot r^3} \quad (7)$$

Градиент давления при фильтровании в центробежном поле:

$$dp_y = \rho \cdot \omega^2 \cdot r dr \quad (8)$$

Градиент давления за счёт сопротивления сил трения выразим в соответствии с общим уравнением фильтрования:

$$-dp_{\text{тр}} = \frac{\rho_{\text{мс}} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot R_{\text{ос}} \cdot \mu}{2} \cdot \left(\frac{dV}{d\tau} \right) \cdot \left(\frac{dr}{r} \right) \quad (9)$$

С учётом подстановки всех слагаемых уравнения получим основное уравнение фильтрования в центробежном поле:

$$-\int_{p_2}^{p_3} dp = -\rho \cdot \omega^2 \int_{r_2}^{r_3} r dr + \frac{\rho}{(2\pi \cdot h)^2} \cdot \left(\frac{dV}{d\tau} \right)^2 \cdot \int_{r_2}^{r_3} \frac{dr}{r^3} + \frac{\rho_{\text{мс}} \cdot \mu}{2\pi \cdot h} \cdot \left(\frac{dV}{d\tau} \right) \cdot \int_{r_2}^{r_3} R_{\text{ос}} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \frac{dr}{r} \quad (10)$$

где p_2 и p_3 – давления на поверхность осадка и стенки ротора, Па;

r_2 и r_3 – внутренний и наружный радиусы поверхности осадка и стенок ротора соответственно, м;

ε – порозность в некоторой точке слоя;

$R_{\text{ос}} = R / \text{ос}$ – удельное сопротивление осадка в некоторой точке слоя, $1/\text{м}^2$;

h – высота стенки барабана центрифуги, м;

$dV/d\tau$ – объёмный расход фильтрата (объёмная скорость процесса), $\text{м}^3/\text{с}$;

ω – угловая скорость вращения барабана центрифуги, с^{-1} .

4. Критериальные уравнения центробежного фильтрования

В соответствии с заявленной темой статьи рассмотрим полученные при исследовании критериальные уравнения центробежного фильтрования, позволяющие упростить расчёты материальных, кинетических, динамических параметров центробежной фильтрации [6,7].

Согласно второй теореме подобия, количественные результаты опытов следует представлять в форме критериальных уравнений данного процесса (в данном случае – центробежного фильтрования). Критериальные уравнения как вид физического моделирования получим на основе теории подобия [8].

Как известно, полное подобие включает в себя: геометрическое, кинематическое и динамическое виды подобия натурального объекта и физической модели. Положим, что это требование априори соблюдается.

Применим метод анализа размерностей, π – теорему, для вывода 1-го критериального уравнения. Для последующих критериальных уравнений используем метод упрощения дифференциальных уравнений центробежного фильтрования [9, 10, 11.12].

1. Вывод 1-го критериального уравнения.

Основная задача оптимизации: получение максимальной производительности по выходу шквары ($G_{\text{ш}}$) при оптимальном числе оборотов (n) ротора центрифуги.

Применим метод анализа размерностей. Рассмотрим искомую производительность установки по выходу шквары $G_{\text{ш}}$, как функцию ряда аргументов – физических параметров.

$$G_{ш} = f(\mu, \rho, n, D) \quad (11)$$

где $G_{ш}$ – удельная массовая производительность центрифуги по шкваре, $кг/с \cdot м^2$.

μ – динамический коэффициент вязкости исходного жирового сырья, $Па \cdot с$.

ρ – плотность жирового сырья, $кг/м^3$.

n – число оборотов вала центрифуги, $с^{-1}$.

D – внутренний диаметр барабана центрифуги, м.

Согласно второй теореме подобия, функциональная зависимость физических процессов всегда имеет вид показательного уравнения. Имеем:

$$G_{ш} = B \cdot \mu^x \cdot \rho^y \cdot n^z \cdot D^q \quad (12)$$

B – численный коэффициент;

x, y, z, q – показатели степеней

Имеем 5 переменных. Следовательно, согласно п-теореме, число критериев определим:
 $\theta = 5 - 3 = 2$.

Распишем размерности величин, входящих в уравнение (12):

$$[G_{ш}] = кг/с \cdot м^2 = кг \cdot с^{-1} \cdot м^2$$

$$[\mu] = Па \cdot с = Н \cdot с/м^2 = кг \cdot м \cdot с/с^2 \cdot м^2 = кг \cdot с^{-1} \cdot м^{-1}$$

$$[\rho] = кг/м^3 = кг \cdot м^{-3}$$

$$[n] = с^{-1}$$

$$[D] = м$$

Подставим размерности величин в уравнение (12):

$$кг \cdot с^{-1} \cdot м^2 = B \cdot (кг \cdot с^{-1} \cdot м^{-1})^x \cdot (кг \cdot м^{-3})^y \cdot (с^{-1})^z \cdot (м)^q$$

Преобразуем:

$$кг \cdot с^{-1} \cdot м^2 = B \cdot (кг \cdot с^{-1} \cdot м^{-1})^x \cdot (кг \cdot м^{-3})^y \cdot (с^{-1})^z \cdot (м)^q$$

$$кг \cdot с^{-1} \cdot м^{-2} = B \cdot (кг)^{x+y} \cdot (с)^{-x-z} \cdot (м)^{-x-3y+q}$$

$$кг. 1 = x + y$$

$$с. -1 = -x - z$$

$$м. -2 = -x - 3y + q$$

Выразим все неизвестные показатели через «х».

$$y = 1 - x$$

$$z = 1 - x$$

$$-2 = -x - 3y + q$$

$$q = x + 3y - 2 = x + 3(1-x) - 2 = x + 3 - 3x - 2 = 1 - 2x$$

Подставим показатели в уравнение (3.3.2.38). Получим:

$$G_{ш} = B \cdot \mu^x \cdot \frac{\rho}{\rho^x} \cdot \frac{n}{n^x} \cdot \frac{D}{D^{2x}}$$

Получим уравнение:

$$G_{ш} = B \cdot \left(\frac{\mu}{\rho \cdot n \cdot D^2} \right)^x \cdot \rho \cdot n \cdot D \quad (13)$$

Распишем размерности отдельных комплексов, входящих в уравнение (13):

$$\left(\frac{\mu}{\rho \cdot n \cdot D^2} \right) = \frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\frac{\text{кг} \cdot 1 \cdot \text{м}^2}{\text{м}^3 \cdot \text{с}}} = \frac{\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}}{\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}} = \frac{\frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{с}^2 \cdot \text{м}^2}}{\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}} = \frac{\text{с} \cdot \text{м}}{\text{кг}} = 1$$

Выяснили, что комплекс $\left(\frac{\mu}{\rho \cdot n \cdot D^2} \right)$

является величиной безразмерной.

Таким образом, получили величину, обратную модифицированному критерию Рейнольдса для центрифугирования $Re_{цф}$:

$$\left(\frac{\mu}{\rho \cdot n \cdot D^2} \right) = \frac{1}{Re_{цф}} \quad (14)$$

$$Re_{цф} = \frac{\rho \cdot n \cdot D^2}{\mu}$$

$Re_{цф}$ характеризует режим движения жидкого сырья при центрифугировании наряду с критерием Фруда $Fr = n^2 \cdot D / 1800$.

$$|\rho \cdot n \cdot D| = \frac{\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}}}{\frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}}$$

Левую часть уравнения (5.3.5) делим на комплекс $\rho \cdot n \cdot D$:

$$\left| \frac{G_{ш}}{\rho \cdot n \cdot D} \right| = \frac{\frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}}{\frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}} = 1 \quad (15)$$

Полученное дробное выражение (5.3.6) представляет собой безразмерный комплекс – критерий производительности Π (в данном случае по шкваре). Здесь величина $\rho n D$, обратная удельной производительности, показывает сопротивление R_{Π} величине производительности, которое пропорционально плотности среды (ρ), числу оборотов барабана (n) и определяющему геометрическому размеру, внутреннему диаметру барабана центрифуги (D).

$$\Pi = \frac{G_{ш}}{\rho \cdot n \cdot D} = \frac{G_{ш}}{R_{ш}} \quad (16)$$

Таким образом, в результате получено критериальное уравнение массовой удельной производительности:

$$\Pi = \frac{G_{ш}}{\rho \cdot n \cdot D} = B \cdot (Re_{цф})^k \quad (17)$$

где $k = -x$ – показатель степени, зависящий от режима и определяемый опытным путём. B – числовой коэффициент, зависящий от интенсивности центрифугирования, также определяемый из опытов. Величины B и x также отражены в графиках.

Или в другой форме:

$$G_{ш} = B \cdot \rho \cdot n \cdot D \cdot (Re_{цф})^k \quad (18)$$

По опытным данным для оптимальной частоты $n = 2000$ об/мин имеем:
 $D = 180$ мм. Средняя расчётная площадь осаждения $F = 0,0635 \text{ м}^2$

Таблица 2

Основные данные для расчёта параметров критериального уравнения производительности

№	Частота вращения ротора об/мин n	Оптимальное время центрифугирования τ , мин	Загрузка сырья в центрифугу G_с , г	Число Рейнольдса Re_{цф}	Параметр; $\rho n D$ кг/м ² ·с	Коэффициент B	Показатель степени k=-x	Удельный выход шквары в кг/с·м ² G_{вых}	Максимальная производительность по шкваре, г/мин G_ш
1	1000	5	880	38507	2995,0	1,73	1,155	0,0262	100,0
2	1500	5	870	56989	4432,5	1,73	1,155	0,0306	116,6
3	2000	5	870	75986	5910,0	1,73	1,155	0,0350	133,35
4	2500	5	580	94982	7387,5	1,73	1,155	0,0386	147,07

Используя откорректированную программу MathCAD, получили: $x = -0,545$ и $B = 0,0027$. Имеем:

$$G_{вых} = 0,0027 \cdot \rho \cdot n \cdot D \cdot (Re_{цф})^{-0,545} \quad (19)$$

Проверили правильность полученного уравнения, вычисляя значения параметров в таблице 2.

Рассчитали удельный выход шквары $G_{\text{вых}}$ (кг/с·м²) (удельную производительность по шкваре):

1. При 1000 об/мин. $G_{\text{вых}} = 0,0027 \cdot 2995 \cdot (38507)^{-0,545} = 4,792 \cdot (1/38507)^{0,545} = 8,184 \cdot 0,0032 = 0,02619 \text{ кг/с} \cdot \text{м}^2$

2. При 1500 об/мин. $G_{\text{вых}} = 0,0027 \cdot 4432,5 \cdot (56989)^{-0,545} = 11,968 \cdot (1/56989)^{0,545} = 11,968 \cdot 0,00256 = 0,0306 \text{ кг/с} \cdot \text{м}^2$

3. При 2000 об/мин. $G_{\text{вых}} = 0,0027 \cdot 5910 \cdot (75986)^{-0,545} = 15,957 \cdot (1/75986)^{0,545} = 15,957 \cdot 0,00219 = 0,035 \text{ кг/с} \cdot \text{м}^2$

4. При 2500. $G_{\text{вых}} = 0,0027 \cdot 7387,5 \cdot (94982)^{-0,545} = 19,946 \cdot (1/94982)^{0,545} = 19,946 \cdot 0,00194 = 0,0386 \text{ кг/с} \cdot \text{м}^2$

Производительность центрифуги по шкваре $G_{\text{ш}}$ (г/мин) находим по элементарной формуле:

$$G_{\text{ш}} = 60 \cdot 1000 \cdot G_{\text{вых}} \cdot F \quad (20)$$

где $G_{\text{вых}}$ – удельная массовая секундная производительность центрифуги с единицы площади поверхности осаждения в кг/с·м²;

F – фактическая площадь осаждения центрифуги (внутренняя поверхность барабана), м². Известна по конструктивным данным установки и составляет $F=0,0635 \text{ м}^2$.

60– перевод из секунд в минуты.

1000 – перевод из размерности "кг" в размерность "г".

Рассчитали массовую минутную производительность центрифуги по шкваре $G_{\text{ш}}$ (г/мин):

1. При 1000 об/мин. $G_{\text{ш}} = G_{\text{вых}} \cdot F \cdot 6 \cdot 10^4 = 0,0262 \cdot 0,0635 \cdot 6 \cdot 10^4 = 99,822 \approx 100 \text{ г/мин}$

2. При 1500 об/мин. $G_{\text{ш}} = G_{\text{вых}} \cdot F \cdot 6 \cdot 10^4 = 0,0306 \cdot 0,0635 \cdot 6 \cdot 10^4 = 116,6 \text{ г/мин}$

3. При 2000 об/мин. $G_{\text{ш}} = G_{\text{вых}} \cdot F \cdot 6 \cdot 10^4 = 0,035 \cdot 0,0635 \cdot 6 \cdot 10^4 = 133,35 \text{ г/мин}$ 4. При 2500 об/мин. $G_{\text{ш}} = G_{\text{вых}} \cdot F \cdot 6 \cdot 10^4 = 0,0386 \cdot 0,0635 \cdot 6 \cdot 10^4 = 147,07 \text{ г/мин}$

$G_{\text{вых}}$ (кг/с·м) от $Re_{\text{цф}}$ – число Рейнольдса, характеризующего режим центрифугирования. Построены соответствующие графики.

$$G_{\text{вых}} = f (Re_{\text{цф}})$$

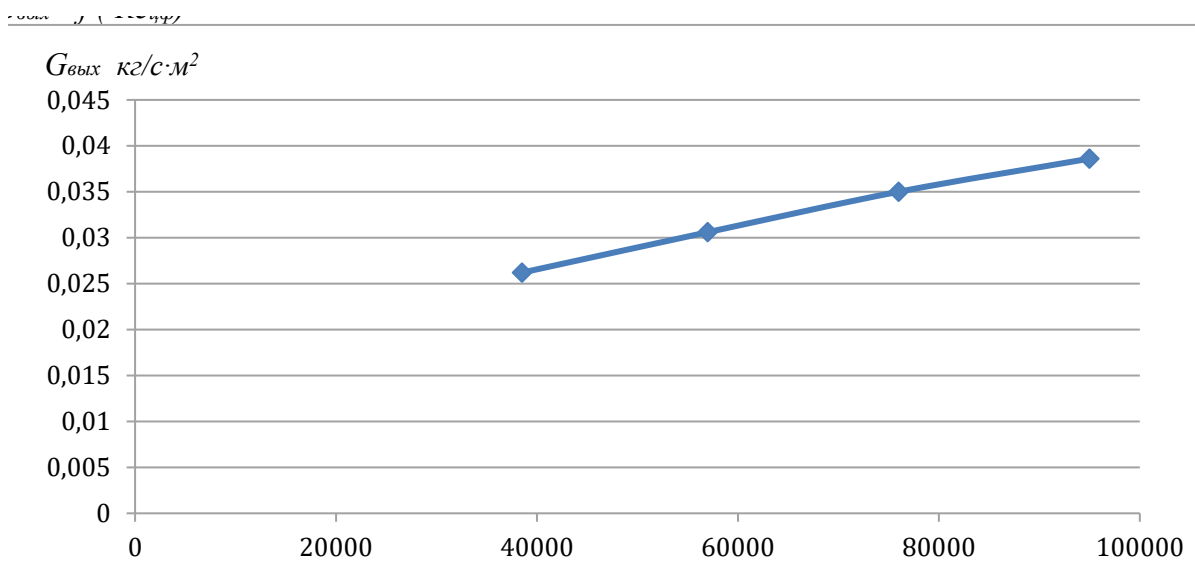


Рисунок 3. График функции зависимости удельной массовой производительности по шкваре $G_{\text{вых}}$ (кг/с·м) от $Re_{\text{цф}}$ – числа Рейнольдса, характеризующего режим центрифугирования

Таблица 3

Данные для графика $G_{\text{вых}} = f(Re_{\text{цф}})$

Число Рейнольдса $Re_{\text{цф}}$	Удельный выход шквары в кг/с·м ² $G_{\text{вых}}$
38507	0,0262
56989	0,0306
75986	0,0350
94982	0,0386

$w = f(Re_{\text{цф}})$

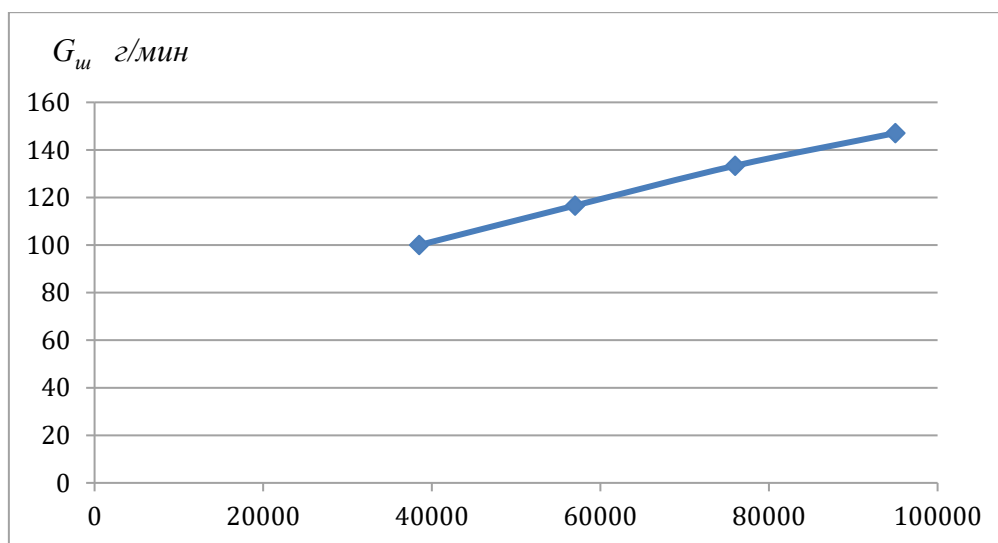


Таблица 4

Данные для графика $G_{ш} = f(Re_{цф})$

Число Рейнольдса $Re_{цф}$	Производительность по шкваре, г/мин $G_{ш}$
38507	100,0
56989	116,6
75986	133,35
94982	147,07

Результаты и обсуждение

Оптимизация процесса центрифугирования при получении шквары, в частности, состояла в обеспечении такого режима работы, при котором абсолютный выход шквары $G_{вых}$ (г) и процентная доля $\Delta Ш$ (%) будут максимально возможными при оптимальном (минимальном) времени центрифугирования τ (мин), а также при относительно небольшой затраченной мощности $N_{эдр}$. Опытным путём такой режим работы был получен.

Рассчитали и определили оптимальный режим с позиций математической обработки экспериментальных данных.

Выбирали параметр оптимизации y ($G_{вых}$), зависящий от факторов X_1, X_2, \dots, X_n . Задача оптимизации: определение таких значений факторов, при которых этот параметр достигает экстремума (минимума или максимума).

Параметр оптимизации y (критерий оптимизации, целевая функции) количественно характеризует исследуемый процесс.

В нашем случае в качестве целевой функции была выбрана производительность центрифуги по выходу шквары $G_{вых}$. Факторы, определяющие параметр оптимизации y - это масса загрузки сырья m (X_1) время центрифугирования τ (X_2).

На основании физико-математической обработки массива данных получили оптимальные технологические режимы работы центрифуги.

Как видно из полученных графиков и вычислений, наибольший выход шквары наблюдался при частоте вращения ротора центрифуги $n = 2000$ об/мин.

Наибольшая производительность по выходу шквары для всех режимов по частоте вращения ротора центрифуги наблюдалась при времени обработки сырья $\tau = 5$ мин. При этом при частоте $n = 2500$ об/мин была получена максимальная производительность $G_{ш} = 147,07$ г/мин

Результатами выполненной исследовательской работы в узких рамках статьи являются экспериментально подтвержденная правильность конструктивных решений разработанной установки; теоретически и практически подтвержденные оптимальные технико-экономические режимы работы центрифуги.

Применив теорию подобия, получили адекватные для практических расчётов критериальные уравнения, одно из которых рассмотрели в данной статье.

Выводы

Математические и физико-математическая обработка с проверкой адекватности вычислений опытных данных позволила получить требуемые математические и физические модели процессов центробежного осаждения с одновременной фильтрацией. Анализ теоретических и практических результатов позволил определить оптимальные технико-экономические режимы работы центрифуги. Выполнена практическая реализация результатов эксперимента и расчётов, включающая системную и экономическую оптимизацию работы всей комплексной установки, а также инженерную методику расчётов последней. Таким образом, поставленные цели и задачи исследовательской работы решены.

Вклад авторов:

Касенов А.Л. – интерпретация результатов, концепция методологии.

Шаяхметова А.К. – сбор данных, оформление список литературы.

Лобасенко Б.А. – написание моделирования статьи, анализ, редактирование.

Список литературы

1. Реализация Послания Президента РК в АПК: увеличение инвестиций и рост производства продукции животноводства. Электронный ресурс <https://www.zakon.kz/4998370-realizatsiya-poslaniya-prezidenta-rk-v.html>. (дата обращения: 10.12.2019 г.).
2. Соколова А.Я. Основы расчета и конструирования машин и автоматических пищевых производств // Издательство «Машиностроение» Москва 1969. - 637 с.
3. Пелеев А.И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности. - М.: Пищевая промышленность, 1971. - 328 с.
4. Леонтьева А.И. Машины и аппараты химических производств: учеб. пособие. - Тамбов: ТГТУ, 1991. - 104 с.
5. Greenspan H. P. The theory of rotating fluids. Cambridge at the university press, 1968. - P. 3-27.
6. Horanyi R. and Nemeth J. Theoretical Investigation of the clarification process in a tube centrifuge. «Acta Chemica Academiae Scientiarum Hungarica», 69 (1) 1971. - P. 59-75.
7. Уразбаев Ж.З., Уалиев С.Н., Какимов А.К., Кабулов Б.Б. Основы механической обработки сырья животного и растительного происхождения и технологии производства комбинированных мясных продуктов: монография. – Семей: Семипалатинский государственный университет имени Шакарима, 2010.- 260 с.
8. Шаменов М.Е., Касенов А.Л. Центрифуга для разделения жировой массы // «Стратегия развития пищевой и легкой промышленности»: материалы международной научно-практической конференции. – Алматы: АТУ, 2004. – С. 156-157.

9. Еренгалиев А.Е., Паримбеков З.А., Шаменов М.Е. Определение эффективности очистки суспензий при использовании центрифуг // Вестник Семипалатинского государственного университета имени Шакарима. – Семей: Семипалатинский государственный университет имени Шакарима, 2010. №1. С. 80-83.

10. Шаменов М.Е., Касенов А.Л., Туменов С.Н. Обработка жировой массы на центрифугах // «Стратегия развития пищевой и легкой промышленности»: материалы международной научно-практической конференции. – Алматы: АТУ, 2004. – С. 323-325.

11. Шкоропад Д.Е. Центрифуги для химических производств. - М.: Машиностроение, 1987. 256 с.

12. Шкоропад Д. Е., Новиков О. П. Центрифуги и сепараторы для химических производств. - М.: Химия. 1987. - 256 с.

13. Патент 35832, Казахстан, МПК 51 В02С 18/36 (2006.01). Центрифуга для разделения жидких неоднородных систем // Шаяхметова М.К., Касенов А.Л., Ибрагимов Н.К. РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности». бюл. № 45 – 09.09.2022. - 4 с.

М.К. Шаяхметова^{1*}, А. Л. Касенов², А.К. Шаяхметова¹, Б.А. Лобасенко⁴

¹НАО «Университет имени Шакарима города Семей», Семей, Казахстан

²НАО «Казахский агротехнический университет имени С.Сейфуллина», Астана, Казахстан

³Кемеровский государственный университет, Кемерово Россия

Оңтайландыру кезіндегі критерийлік теңдеу сүзгі центрифугасының жұмыс режимдері

Аңдатпа. Қазақстан Республикасында орта және шағын кәсіпорындарды дамытудың басым бағыттарының бірі шикізатты қалдықсыз қайта өңдеу технологияларын енгізу болып табылады. Мұндай өндірістердің қатарына орта және шағын ет өңдеу кәсіпорындары жатады. Ет өнімдерінің қалдықсыз технологиясын жетілдіруде құрғақ жем өндірісі басқа жемшөп өнімдерінен сапасы жағынан жоғары болғандықтан, соңғысы тағамдық құндылығына байланысты үлкен сұранысқа ие. Құрғақ мал азығын өндіруде центрифугалау процесі майды шквардан бөлу үшін қолданылады. Майдың бөлінуінде центрифугалау процесін қолдану шквар нәтижесінде пайда болатын майдың сапасы престоу және экстракция процестеріне қарағанда едәуір жоғары болады.

Ет өңдеу өндірісін дамыту қажеттігін ескере отырып, жабдықтың меншікті энергия шығынын азайтудың және өнім өндіру көлемін ұлғайтудың өзіндік мүмкіндіктерін көздейтін тепкіш жабдықта сұйық гетерогенді жүйелерді бөлу процесін жетілдірудің маңызы зор. Мақалада басты зерттеу бағыты ретінде орныққан тәжірибе, мәліметтердің физика-математикалық сипаттары қолданылып, нәтижесінде техника-экономикалық позицияда оңтайлы жұмыс режимі таңдалды. Сонымен қатар, зерттеудің қолданбалы маңызы анықталды.

Түйін сөздер: процесс, технология, техникалық-экономикалық оңтайландыру, центрифуга, модель, өндіріс, критерийлік теңдеулер.

M. Shayakhmetova¹, A. Kasenov², A. Shayakhmetova¹, B. Lobosenko⁴

¹NAO «Shakarim Semey University», 071412, Kazakhstan, Semey, Glinka str. 20A.

²NAO «S.Seifullin Kazakh Agrotechnical University», 010011, Kazakhstan, Astana Zhenis avenue, 62

³Kemerovo State University, 20-a Glinka str., Kemerovo, 0714, Russia

The criterion equation for optimizing the operating modes of the filter centrifuge

Abstract. In the Republic of Kazakhstan, one of the priority areas for the development of medium and small enterprises is the introduction of waste-free processing of raw materials. These industries include medium and small meat processing enterprises. In improving the waste-free technology of meat products, the production of dry feed is in high demand due to the high nutritional value of the latter, which often surpasses other feed products. In the production of dry animal feed, the centrifugation process is used to separate the fat from the flakes. The use of the centrifugation process in the separation of fat from the pulp leads to the fact that the quality of the fat released is significantly higher than in the pressing and extraction processes.

Taking into account the needs of the development of meat processing production, it is of great importance to improve the separation process of liquid heterogeneous systems on centrifugal equipment, which provides for a reduction in the specific energy consumption of equipment and its own opportunities to increase production volumes.

Keywords: process; technology; technical and economic optimization; centrifuge; model; production; criteria equations.

References

1. Elektronnyj resurs Realizaciya Poslaniya Prezidenta RK v APK: uvelichenie investicij i rost proizvodstva produkci zivotnovodstva [Electronic resource Implementation of the Message of the President of the Republic of Kazakhstan in the agro-industrial complex: increased investment and growth of livestock production] <https://www.zakon.kz/4998370-realizatsiya-poslaniya-prezidenta-rk-v.html>. (10.12.2019). - [in Russian]
2. Sokolova A. Ja. Osnovy rascheta i konstruirovaniya mashin i avtomaticheskikh pishhevyyh proizvodstv [Fundamentals of calculation and design of machines and automatic food production]// Izdatel'stvo «Mashinostroenie» Moskva (1969).- 637 s. - [in Russian]
3. Peleev A. I. Tehnologicheskoe oborudovanie predpriyatij mjasnoj promyshlennosti. [Technological equipment of meat industry enterprises]- M.: Pishhevaja promyshlennost', (1971). - 328 s. - [in Russian]
4. Leonteva A. I. Mashiny i apparaty himicheskikh proizvodstv. [Chemical production machines and apparatuses] Ucheb. posobie. Tambov: TGTU, (1991). - 104 s. - [in Russian]
5. Greenspan H. P. The theory of rotating fluids. Cambridge at the university press, (1968). - P. 3-27
6. Horanyi R. and Nemeth J. Theoretical Investigation of the larification process in a tube centrifuge. «Acta Chemica Academiae Scientiarum Hungarical», 69 (1) (1971). - P. 59-75.
7. Urazbaev Zh. Z., Ualiev S. N., Kakimov A. K., Kabulov B. B. Monografija. Osnovy mehanicheskoy obrabotki syrja zivotnogo i rastitelnogo proishozhdenija i tehnologii proizvodstva kombinirovannyh mjasnyh produktov. [Fundamentals of mechanical processing of raw materials of animal and vegetable origin

and technology of production of combined meat products] - Semej, Semipalatinskij gosudarstvennyj universitet imeni Shakarima, (2010).- 260 s. - [in Russian]

8. Shamenov M.E., Kassenov A.L. Centrifuga dlja razdelenija zhirovoj massy [Centrifuge for separation of fat mass] // Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. «Strategija razvitija pishhevoj i legkoj promyshlennosti» – Almaty: ATU, (2004). – S. 156-157. - [in Russian]

9. Erengaliev A.E., Parimbekov Z.A., Shamenov M.E. Opredelenie effektivnosti ochistki suspenzii pri ispolzovanii tcentrifug [Determination of the efficiency of cleaning suspensions using centrifuges] // Nauchnyj zhurnal «Vestnik Semipalatinskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Shakarima» – Semej: Semipalatinskij gosudarstvennyj universitet imeni Shakarima. (2010). №1. S. 80-83. - [in Russian]

10. Shamenov M.E., Kassenov A.L., Tumenov S.N. Obrabotka zhirovoj massy na tcentrifugakh [Processing of fat mass on centrifuges] // Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. «Strategija razvitija pishchevoj i legkoj promyshlennosti» – Almaty: ATU, (2004). – S. 323-325. - [in Russian]

11. Shkoropad D.E. Tcentrifugi dlja khimicheskikh proizvodstv. [Centrifuges for chemical production] M.: Mashinostroenie, (1987). 256 s. - [in Russian]

12. Shkoropad D. E., Novikov O. P. Tcentrifugi i separatory dlja khimicheskikh proizvodstv. [Centrifuges and separators for chemical industries] - M. : Khimiia. 1987. - 256 s.- [in Russian]

13. Pat. 35832, Kazakhstan, MPK 51 V02S 18/36 (2006.01). Tcentrifuga dlja razdeleniia zhidkikh neodnorodnykh sistem [Centrifuge for separation of liquid heterogeneous systems] // Shayakhmetova M.K., Kassenov A.L., Ibragimov N.K., RGP «Natsionalnyi institut intellektualnoi sobstvennosti» biul. № 45 – (09.09.2022). - 4 s. - [in Russian]

Сведения об авторе (авторах):

Шаяхметова М.К. – докторант, Некоммерческое акционерское общество «Университет имени Шакарима города Семей», Семей, Казахстан.

Касенов А.Л. – доктор технических наук, профессор, Казахский агротехнический университет имени С.Сейфуллина, Астана, 10000, Казахстан.

Шаяхметова А.К. – магистр, Некоммерческое акционерское общество «Университет имени Шакарима города Семей», Семей, Казахстан.

Лобасенко Б.А. – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Кемеровский Государственный университет» (КемГУ), 650000, Россия, г. Кемерово.

Шаяхметова М. К. – "Технологиялық жабдық және машина жасау" кафедрасының докторанты, Семей қаласының Шәкәрім атындағы университетінің коммерциялық емес акционерлік қоғамы, 070000, Қазақстан

Касенов А.Л. – техника ғылымдарының докторы, профессор, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті, 10000, Нұр-Сұлтан

Шаяхметова А.К. – магистр, "Технологиялық жабдық және машина жасау" кафедрасының оқытушысы, Семей қаласының Шәкәрім атындағы университетінің коммерциялық емес акционерлік қоғамы, 070000, Қазақстан

Лобасенко Б.А. – техника ғылымдарының докторы, "өнеркәсіптік дизайн" кафедрасының профессоры, "Кемерово мемлекеттік университеті" ФГБОУ (Кемму), 650000, Ресей, Кемерово қ.

Shayakhmetova M.K. – Doctoral student of the Department "Technological Equipment and Mechanical Engineering", Non-profit Joint-stock Company of the Shakarim University of Semey, 070000, Kazakhstan

Kasenov A.L. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Kazakh Agrotechnical University named after S.Seifullin, Nur-Sultan, 10000, Kazakhstan

Shayakhmetova A.K. – Master's degree, lecturer of the Department "Technological Equipment and Mechanical Engineering", Non-profit Joint-stock Company of the Shakarim University of Semey, 070000, Kazakhstan

Lobasenko B.A. – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Industrial Design, Kemerovo State University (KemSU), 650000, Russia



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).