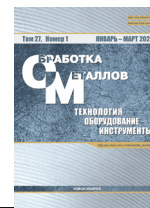




Обработка металлов

(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Проектирование механизма гомогенизации

Юрий Подгорный^{1, 2, a, *}, Вадим Скиба^{1, b}, Татьяна Мартынова^{1, c}, Артур Садыкин^{1, d},
Никита Мартюшев^{3, e}, Дмитрий Лобанов^{4, f}, Арина Пелемешко^{1, g}, Андрей Попков^{1, h}

¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия² Новосибирский технологический институт (филиал) Российского государственного университета им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Красный пр., 35 (ул. Потанинская, 5), г. Новосибирск, 630099, Россия³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия⁴ Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Московский пр-т, 15, г. Чебоксары, Чувашская Республика, 428015, Россия^a  <https://orcid.org/0000-0002-1664-5351>,  pjui@mail.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>,  skeeba_vadim@mail.ru;^c  <https://orcid.org/0000-0002-5811-5519>,  martynova@corp.nstu.ru; ^d  <https://orcid.org/0009-0002-2061-650X>,  artur060779@gmail.com;^e  <https://orcid.org/0000-0003-0620-9561>,  martjushev@tpu.ru; ^f  <https://orcid.org/0000-0002-4273-5107>,  lobanovdv@list.ru;^g  <https://orcid.org/0009-0004-5916-6782>,  pyatkova.arina@gmail.com; ^h  <https://orcid.org/0009-0006-5587-9990>,  andrei.popkov.2013@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.8, 519.6:539.3

История статьи:

Поступила: 14 декабря 2024

Рецензирование: 09 января 2025

Принята к печати: 31 января 2025

Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:

Гомогенизация
Цикловая диаграмма работы
Кинематическая схема
Кулачковый механизм
Толкатель
Ролик
Скорость
Ускорение
Перемещение
Профиль кулачка

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Тематического плана НИР НГТУ по проекту ТП-ПТМ-1_25.

Благодарности

Исследования выполнены на оборудовании ИЦ «Проектирование и производство высокотехнологичного оборудования».

АННОТАЦИЯ

Введение. Производство пищевого оборудования преследует основную цель: создание технологического оборудования высокой эффективности, позволяющего повысить производительность труда при одновременном снижении энергетических затрат. Совершенствование существующего и создание нового высокопроизводительного оборудования для пищевого производства является одной из основных тенденций развития современного машиностроения. Под гомогенизацией (буквально слово «гомогенизация» означает «повышение однородности») понимают процесс обработки эмульсий, который приводит к дроблению дисперсной фазы. Гомогенизация – это процесс измельчения жидких или пюреобразных пищевых продуктов за счет пропуска их с высокой скоростью и давлением через узкие кольцевые щели. Авторы предлагают для гомогенизации применить механизмы кулачкового типа. Они позволят более рационально распределить время на всасывание и нагнетание продукта. Возможность понижения скорости при нагнетании продукта будет положительно сказываться на процессе гомогенизации. **Цель работы:** снижение потребляемой мощности при гомогенизации. **Методика исследований** основывается на методах ТММ. Они позволили разработать методику синтеза механизма привода гомогенизатора и спроектировать машину, обеспечивающую ее работу в соответствии с предложенной цикловой диаграммой. **Результаты и обсуждения.** Синтез механизмов осуществлялся с учетом полезной нагрузки, которая была определена для существующих отечественных машин при получении плавного сыра. Так, при заданной производительности 550 л/ч и диаметре плунжера, равном 28 мм, технологическое усилие составило $F = 12\,315\text{ Н}$. В соответствии с предложениями авторов было проведено изменение конструкции гомогенизатора за счет внедрения кулачковых механизмов. При проектировании этого привода была предложена новая цикловая диаграмма, позволившая увеличить время на нагнетание продукта и уменьшить время на всасывание. Так, на нагнетание продукта предложено 280° , а на всасывание – 80° по цикловой диаграмме. При этом мощность на приводном валу получили равной $P = 2,5\text{ кВт}$ вместо $3,5\text{ кВт}$ для существующей конструкции, имеющей привод от кривошипно-шатунного механизма. В результате потребляемая мощность уменьшилась на 26 %.

Для цитирования: Проектирование механизма гомогенизации / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, Т.Г. Мартынова, А.В. Садыкин, Н.В. Мартюшев, Д.В. Лобанов, А.К. Пелемешко, А.С. Попков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 129–142. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-129-142.

Введение

Производство пищевого оборудования преследует основную цель: создание технологического оборудования высокой эффективности, позволяющего повысить производительность труда при одновременном снижении энергетических затрат.

* Corresponding author

Подгорный Юрий Ильич, д.т.н., профессор
Новосибирский государственный технический университет,
пр. К. Маркса, 20,
630073, г. Новосибирск, Россия
Тел.: +7 383 346-17-79, e-mail: pjui@mail.ru

ческих затрат. На отечественных предприятиях пищевой промышленности насчитывается множество наименований технологического оборудования, в том числе и машины для гомогенизации [1–9]. Современные технологические машины обладают рядом особенностей, среди которых особое место занимают техническое состояние оборудования, его производительность и качество выпускаемой продукции [10–19]. Совершенствование существующего и создание нового высокопроизводительного оборудования для пищевого производства является одной из основных тенденцией развития современного машиностроения. Растущие динамические нагрузки при увеличении рабочих скоростей предъявляют повышенные требования к проектированию отдельных элементов и узлов, в том числе и приводов, обеспечивающих прерывистые движения рабочим органам машины [7, 12–14, 16–22].

Одно из важных требований к этим машинам заключается в том, что их ведомые рабочие звенья должны совершать движения, точно отвечающие определенному закону. Поэтому в механизмах пищевых машин предлагается применить механизмы кулачкового типа. Они позволяют распределить время на всасывание и нагнетание продукта. Законы движения кулачковых механизмов можно синтезировать в большом многообразии, и благодаря этому легко приспособить к кинематическим и динамическим требованиям разработчика. Технология получения профиля отработана, и он дает возможность весьма точно осуществить требуемое движение ведомому звену [23–35]. Возможность понижения скорости при нагнетании будет положительно сказываться на процессе гомогенизации [36, 37]. Под гомогенизацией (буквально слово «гомогенизация» обозначает «повышение однородности») понимают процесс обработки эмульсий, который приводит к дроблению дисперсной фазы. Гомогенизация – это процесс измельчения жидких или пюреобразных пищевых продуктов за счет пропуска их с высокой скоростью и давлением через узкие кольцевые щели. Наибольшее распространение процесс гомогенизации получил в пищевой промышленности, а именно в молочной.

Рассмотрим кратко технологический процесс получения плавленого сыра. Плавленый сыр –

это пищевой продукт, представляющий собой массу, которая подвергнута процессу плавления и однородного распределения компонентов. Он производится из особых смесей с четкой, конкретной рецептурой, в которой содержится информация об ингредиентах: составные части молока, сливок, масла, сыров, солей-плавителей, стабилизаторов, а также ароматизаторов и вкусовых добавок. Технология изготовления плавленого сыра включает в себя несколько этапов. Сначала сыр или творог измельчается и перемешивается. Затем смесь подвергается плавлению и эмульгированию. Для этого могут использоваться специальные добавки, такие как эмульгирующие соли или структурообразователи, которые помогают достичь консистенции и текстуры продукта.

Проведенный анализ показал, что в конструкциях гомогенизаторов наиболее широко используется кривошипно-шатунные механизмы. Научные исследования [1–7, 12, 13, 36] показывают, что в любом случае ламинарный поток дает втрое увеличение степени диспергирования жировых шариков по сравнению с турбулентным. Получение сыра производится на специальных машинах, которые называются гомогенизирующими. Индикаторную диаграмму их работы можно подробно просмотреть [36]. Составляющие элементы диаграммы включают моменты всасывания продукта и нагнетания его через щель. Всасывание продукта происходит при давлении ниже атмосферного, а нагнетание – через щель при давлении от 20 МПа и выше. При этом работа кривошипно-шатунного механизма распадается на несколько участков. Первый участок – всасывание, он занимает половину пройденного пути кривошипом. Второй участок, который обеспечивает нагнетание, занимает вторую половину пути. Недостатком таких конструкций является большое потребление мощности. Поэтому мы считаем, что замена кривошипно-шатунного механизма на кулачковый является задачей перспективной, актуальной и своевременной.

Цель работы: снижение потребляемой мощности при гомогенизации продукта.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

– определена технологическая нагрузка при гомогенизации;

- проанализирована возможность замены кривошипно-шатунного механизма привода кулачковым механизмом;
- выбраны необходимые параметры для синтеза кулачковой пары и проведен синтез;
- предложена новая цикловая диаграмма работы устройства;
- определен крутящий момент от сил сопротивления как на каждом кулачковом валу, так и суммарный момент;
- определена мощность, необходимая при гомогенизации с новым приводом.

Методика исследований

Для проведения исследований необходимо прежде всего определиться с технологической нагрузкой, действующей при гомогенизации в процессе получения плавленого сыра. В соответствии с [37] в момент нагнетания жидкости рабочее давление в полости цилиндра составляет 20 Па [37]. Диаметр плунжера при производительности 550 л/час составляет $d = 28$ мм, частота вращения главного вала $n = 180$ мин⁻¹.

Соответственно необходимое усилие, с которым плунжер давит на жидкость в проходном сечении гомогенизирующей головки, получили равным $F = 12\,315$ Н. Кинетостатический расчет этого механизма показал, что необходимая потребляемая мощность для данного случая составляет 3,8 кВт.

Теперь более подробно исследуем предлагаемую авторами конструкцию гомогенизатора с кулачковым приводом. На рис. 1 показаны расположения приводных кулачков и толкателя, обеспечивающие привод к плунжерам. Функционально все остальные элементы работают так же, как и для приводов с кривошипно-шатунными механизмами. Подробно с работой конструкции гомогенизатора можно ознакомиться в [37].

В механике известно множество законов движения для кулачковых механизмов. Для выбора рационального закона движения мы предлагаем рассмотреть из них три: простой гармонический, двойной гармонический и циклоидальный законы [7, 12, 13–27, 31–35, 38–41].

Расчетная схема для кулачкового механизма приведена на рис. 2. В качестве переменных параметров были приняты профильные углы β ; фазовые углы движения для подъема и опуска-

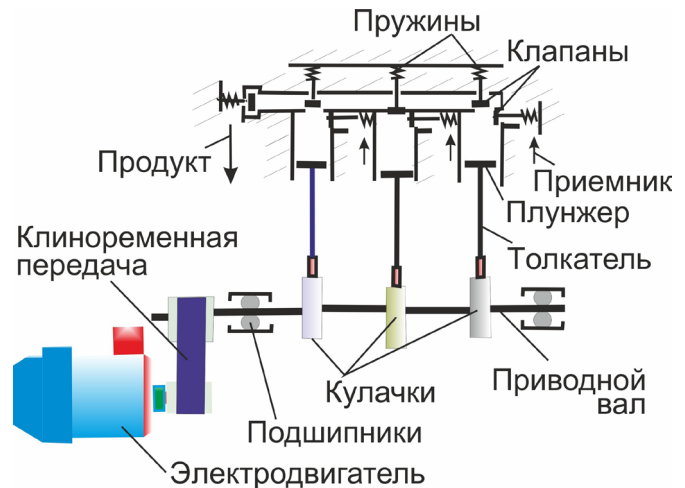


Рис. 1. Предлагаемая конструкция гомогенизатора с приводами от кулачков

Fig. 1. The proposed design of a cam-driven homogenizer

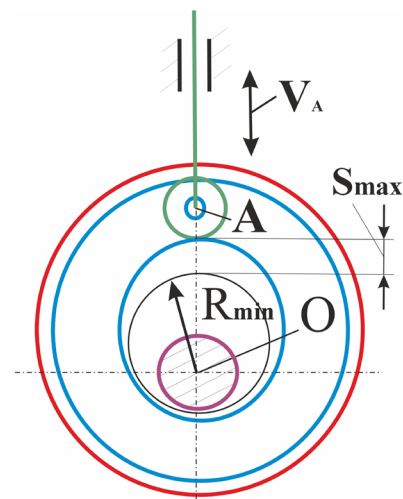


Рис. 2. Кулачковый механизм гомогенизатора

Fig. 2. Cam mechanism of the homogenizer

ния – $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ и φ_4 ; максимальные перемещения толкателя – $S_{\max}$; φ – текущее значение угла поворота кулачка. В связи с тем, что все расчеты проводились с использованием математического пакета, для удобства расчетов были введены следующие обозначения: перемещения – $s(\varphi)$; скорости – $v_1(\varphi)$; ускорения – $a_1(\varphi)$; крутящие моменты на рабочем валу – $M_1(\varphi)$, $M_2(\varphi)$ и $M_3(\varphi)$ соответственно для трех кулачков,

задействованных в конструкции; $k_1 = \frac{S_{\max}}{2}$, $k_3 = -S_{\max} \frac{6}{\varphi_3^2}$ – коэффициенты для гармониче-

ского закона движения; F_1, F_2 – полезная нагрузка для моментов нагнетания и всасывания продукта соответственно, значения $F_1 = 12\ 315$ Н и $F_2 = 2500$ Н были приняты для случая получения плавленого сыра.

В результате проведенного исследования было установлено, что наиболее рациональным оказался простой гармонический закон, максимальные значения скоростей для него оказались меньше на 25 и 30 %, чем у двой-

ного гармонического и циклоидального законов соответственно. Аналитическое выражение для этого закона будет иметь следующий вид:

$$s(\varphi) = \frac{S_{\max}}{2} \left(1 - \cos \pi \frac{\varphi}{\beta} \right). \quad (1)$$

Кинематические характеристики для него были рассчитаны в математическом пакете Mathcad, листинг представлен на рис. 3.

$$a(\varphi) := \begin{cases} k_1 \cdot \frac{\pi}{\varphi_1} \cdot \cos \left(\pi \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \right) & \text{if } 0 \leq \varphi \leq \varphi_1 \\ 0 & \text{if } \varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_1 + \varphi_2 \\ k_3 \cdot \left[1 - 2 \cdot \frac{\varphi - (\varphi_1 + \varphi_2)}{\varphi_3} \right] & \text{if } \varphi_1 + \varphi_2 \leq \varphi \leq \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 \\ 0 & \text{if } \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 \leq \varphi \leq 360 \text{ deg} \end{cases} \quad (2)$$

Скорость определится:

$$v(\varphi) := \begin{cases} \left[\left(-k_1 \cdot \frac{\pi}{\varphi_1} \right) \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot \varphi}{\varphi_1} \right) \right] & \text{if } 0 \leq \varphi \leq \varphi_1 \\ 0 & \text{if } \varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_1 + \varphi_2 \\ k_3 \cdot \left[\varphi - (\varphi_1 + \varphi_2) \right] \cdot \left[1 - \frac{\varphi - (\varphi_1 + \varphi_2)}{\varphi_3} \right] & \text{if } \varphi_1 + \varphi_2 \leq \varphi \leq \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 \\ 0 & \text{if } \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 \leq \varphi \leq 360 \text{ deg} \end{cases} \quad (3)$$

Рис. 3. Листинг программы для определения кинематических характеристик

Fig. 3. Listing of a program for determining kinematic characteristics

Перемещения были представлены как интегральная функция от скоростей (3):

$$s(\varphi) := \int_0^{\varphi} v(\varphi) \cdot d\varphi. \quad (4)$$

Момент, действующий на первый кулачок, предлагается определять согласно программе, разработанной для математического пакета и представленной листингом на рис. 4.

$$M_1(\varphi) := \begin{cases} \left[\left(k_1 \cdot \frac{\pi}{\varphi_1} \right) \cdot \sin \left(\pi \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \right) \cdot F_1 \right] & \text{if } 0 \leq \varphi \leq \varphi_1 \\ 0 & \text{if } \varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_1 + \varphi_2 \\ \left[k_3 \cdot \left(\varphi - (\varphi_1 + \varphi_2) \right) \cdot \left[1 - \frac{\varphi - (\varphi_1 + \varphi_2)}{\varphi_3} \right] \right] \cdot F_2 & \text{if } (\varphi_1 + \varphi_2) \leq \varphi \leq \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 \\ 0 & \text{if } (\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) \leq \varphi \leq 360 \text{ deg} \end{cases}, \quad (5)$$

Рис. 4. Листинг программы для определения момента на валу кулачка

Fig. 4. Listing of the program for determining the torque on the cam shaft

Крутящие моменты для второго и третьего кулачка можно представить как

$$\begin{aligned} M_2(\varphi) &= M_1(\varphi + \psi_2), \\ M_3(\varphi) &= M_1(\varphi + \psi_3), \end{aligned} \quad (6)$$

где M_2, M_3 – крутящие моменты для второго и третьего кулачка; ψ_1, ψ_2 – фазовые углы смещения для кулачков на приводном валу.

Моменты на приводном валу (кулачковом) определялись в зависимости от величины фазовых смещений углов ψ_i и профильных углов β_i . Суммарный момент M_c на приводном валу был определен как сумма составляющих моментов M_i , которых в нашем случае три. Тогда

$$M_c = \sum_{i=1}^3 M_i. \quad (7)$$

Потребляемую мощность, приведенную к приводному валу, можно представить следующим образом [34]:

$$P = M_{c\max} \omega, \quad (8)$$

где $M_{c\max}$ – максимальное значение суммарного крутящего момента.

Профильные углы β определялись ступенчато, с использованием программ, приведенных на рис. 3 и 5. В результате, определив минимальное значение скорости из семейства кривых, мы

```
i := 0, 5..180 // Дискретные значения углов
f1i1 := i1 *  $\frac{\pi}{180}$  // Перевод градусной меры в радианную на 1-м участке
v1i1 := v(f1i1) // Аналог скорости на 1-м участке
v1max := max(v1) // Аналог максимальной скорости на 1-м участке
v1max = 0.01 // Значение аналога максимальной скорости на 1-м участке
v1_90 = 0.019 // Значение аналога скорости на 1-м участке при  $\varphi=90^\circ$ 
s1i1 := s(f1i1) // Перемещение ведомого звена на 1-м участке
s1max := s(90deg) // Максимальное перемещение ведомого звена на 1-м участке
s1max = 0.015 // Значение максимального перемещения ведомого звена на 1-м участке
e2 := atan( $\frac{s3max - s1max}{v1max - v3max}$ ) // Значение угла на 2-м участке
e3 := ( $\frac{\pi}{2}$ ) -  $\delta_{dop}$  + e2 // Значение угла на 3-м участке
e1 := 2 *  $\delta_{dop}$  // Значение угла на 1-м участке
e1 := l31 * sin( $\delta_{dop}$ ) - (v1max) // Экцентриситет на 1-м участке
s1i := l31 * cos( $\delta_{dop}$ ) - s1max // Перемещение центра ролика
s1i = 0.014 // Значение перемещения центра ролика
i3 := 180, 185..360 // Дискретные значения углов
f3i3 := i3 *  $\frac{\pi}{180}$  // Перевод градусной меры в радианную на 3-м участке
v3i3 := |v(f3i3)| // Аналог скорости на 3-м участке
v3max := -max(v3) // Аналог максимальной скорости на 3-м участке
v3max = -0.014 // Значение аналога максимальной скорости на 3-м участке
v3_70 = 0.014 // Значение аналога скорости на 3-м участке при  $\varphi=70^\circ$ 
s3i3 := s(f3i3) // Перемещение ведомого звена на 3-м участке
s3max := s(270deg) // Максимальное перемещение ведомого звена на 3-м участке
s3max = 0.015 // Значение максимального перемещения ведомого звена на 3-м участке
i34 :=  $\frac{v1max - v3max}{\cos(e2)}$  // Разность максимальных значений аналогов скоростей на участке 3-4 профиля
e4 := ( $\frac{\pi}{2}$ ) -  $\delta_{dop}$  - e2 // Значение угла на 4-м участке
i31 := i34 *  $\frac{\sin(e4)}{\sin(e1)}$  // Разность максимальных значений аналогов скоростей на участке 3-1 профиля
i31 = 0.033 // Значение разности аналогов скоростей на участке 3-1 профиля
```

Рис. 5. Листинг программы для определения углов давления δ

Fig. 5. Listing of a program for determining pressure angles δ

остановились на простом гармоническом законе с профильными углами $\beta_1 = 280^\circ$ и $\beta_2 = 80^\circ$ и приступили к проектированию кулачкового механизма по заданным параметрам [12].

Далее углы давления были определены по формуле

$$\delta(\varphi) = \tan \left(\frac{v(\varphi) + e1}{sh + s(\varphi)} \right). \quad (9)$$

Для этого необходимо было определиться с минимальным радиус-вектором кулачка $R_{\min}$. Используя вычисленные функции положения $s(\varphi)$ и аналоги скоростей $v(\varphi)$ (рис. 6) на фазах подъема и опускания, построили график в координатах $v(s)$ с той лишь разницей, что для его определения используются численные значения скоростей. Такая схема приведена на рис. 7, векторы скоростей обозначены точками от A_0 до A_8 . Фаза подъема представлена точками от A_0 до A_4 , а фаза опускания – от A_5 до A_8 . Значения минимального радиус-вектора кулачка составило $R_{\min} = 90$ мм.

Следующим этапом для определения конструктивных параметров механизма является определение радиуса ролика. Алгоритм определения сводится к расчету радиусов кривизны профиля кулачка в зависимости от его угла поворота. Значения радиусов кривизны $\rho_{кр}$ можно представить по общей формуле для кулачка любого типа [23]:

$$\rho_{кр} = \frac{\left[\rho^2 + \left(\frac{d\rho}{d\beta} \right)^2 \right]^{3/2}}{\rho^2 + 2 \left(\frac{d\rho}{d\beta} \right)^2 - \rho \frac{d^2\rho}{d\beta^2}}, \quad (10)$$

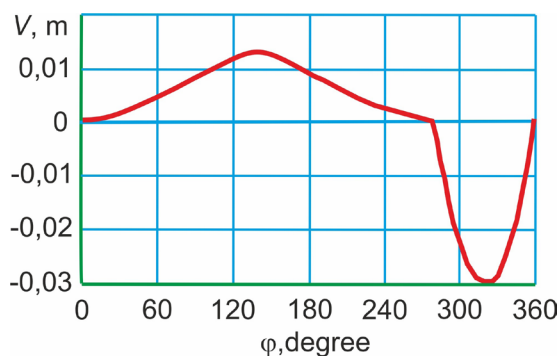


Рис. 6. График аналогов скоростей центра ролика кулачкового механизма

Fig. 6. Graph of analog speeds of the cam mechanism's roller center

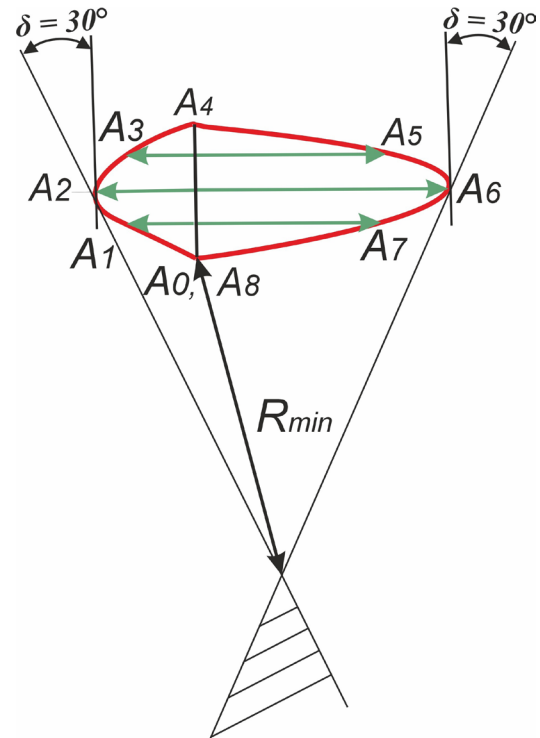


Рис. 7. Схема определения минимального радиус-вектора для механизма с толкателем

Fig. 7. Diagram of determining the minimum radius vector for a mechanism with a pusher

где ρ – радиус-вектор теоретического профиля, β – профильный угол.

В написании программы для определения минимального радиуса кривизны необходимо учесть интерполяцию значений радиус-векторов для перемещений центра ролика кулачкового механизма [12].

Листинг программы для определения кривизны поверхности кулачка приведен на рис. 8.

Результаты и их обсуждение

Анализируя полученные значения потребляемых мощностей, пришли к заключению, что для кривошипно-шатунного механизма она составляет 3,8 кВт. При простом гармоническом законе – 3,8 кВт, при циклоидальном и двойном гармоническом – 4,5 и 4,3 кВт соответственно. Эти значения были рассчитаны при равных профильных углах $\beta = 180^\circ$. Предложение авторов заключается в том, что новая цикловая диаграмма работы кулачкового привода должна обеспечить значительное снижение момента для ведомого звена и, как следствие, привести к по-

```

k := 0,5..360 // Дискретные значения углов
f := k *  $\frac{\pi}{180}$  // Перевод градусной меры в радианную
v :=  $\beta(f)$  // Аналог скорости на k-м участке по оси x
v :=  $\rho(f)$  // Аналог скорости на k-м участке по оси y
R := cspline(v, v) // Обработка массива значений аналогов скоростей сплайном
f(x) := interp(R, v, v) // Интерполяция массива значений радиус-вектора R
f'(x) :=  $\frac{d}{dx} f(x)$  // Первая производная от функции f(x)
f''(x) :=  $\frac{d}{dx} f'(x)$  // Вторая производная от функции f(x)
 $\rho(x) := \frac{(f(x) + df(x))}{f(x) + 2 \cdot df(x) - d^2 f(x) \cdot f(x)}$  // Формула, определяющая радиусы кривизны
                                                    профиля кулачка
i := 0,5..280 // Дискретные значения углов
f := i *  $\frac{\pi}{180}$  // Перевод градусной меры в радианную
 $\rho := \rho(f)$  // Радиус кривизны профиля кулачка на 1-м участке
min( $\rho$ ) = 0.03 // Минимальный радиус кривизны профиля кулачка на 1-м участке

```

Рис. 8. Листинг программы для определения кривизны поверхности кулачка

Fig. 8. Listing of a program for determining the curvature of the cam surface

нижению потребляемой мощности. Используя алгоритмы расчетов, приведенные на рис. 4, 5, 8, и задавая фазовые углы для всасывания и нагнетания с шагом 20° , получили значения для углов давления. Ниже предлагается вариант расчетов.

Вариант 1. Фазовый угол для момента нагнетания и всасывания составляет 180° . Графики для этого варианта приведены на рис. 9.

Как видно из представленного графика, значения углов давления в точках, равных 70° и 310° , больше допустимых. Поэтому этот вариант неприемлем для конструкции гомогенизатора.

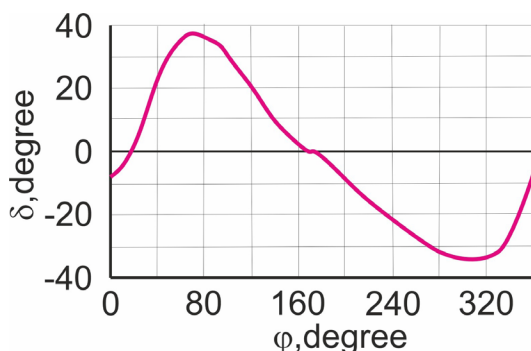


Рис. 9. График изменения углов давления

Fig. 9. Graph of pressure angle variations

В дальнейшем было предложено еще пять вариантов (табл. 1). Из семейства кривых, представленных в табл. 1, только одна кривая удовлетворяет поставленной задаче: углы давления на протяжении полного оборота (360°) этой кривой не превышают допустимого значения, равного 30° .

Эта кривая с фазовыми углами 280° для периода нагнетания продукта и 80° – для всасывания. В дальнейшем, взяв ее параметры за основу, приступили к синтезу кулачка. Для предварительного расчета при синтезе были использованы следующие параметры цикловой диаграммы: на всасывание было отведено 80° , на нагнетание жидкости – 280° от полного оборота кулачка. Для определения моментов на кулачке была использована формула (5). Численные значения сил на участках нагнетания и всасывания приняты $F_1 = 12\,315\text{ Н}$ и $F_2 = 2500\text{ Н}$ соответственно. Для одного из вариантов графики моментов при фазовых углах смещения $\psi_1 = 170^\circ$ и $\psi_2 = 340^\circ$ представлены на рис. 10. Фиолетовым цветом обозначен суммарный момент, который действует на приводном валу. Для остальных вариантов они сведены в табл. 2.

Таблица 1

Table 1

Варианты для исследования углов давления
Options for the study of pressure angles

№ п/п	Фазовые углы		Значения максимальных углов давления, град.
	φ, град. (всасывание)	φ, град. (нагнетание)	
1	200	160	32
2	220	140	33
3	240	120	32
4	260	100	31
5	280	80	25

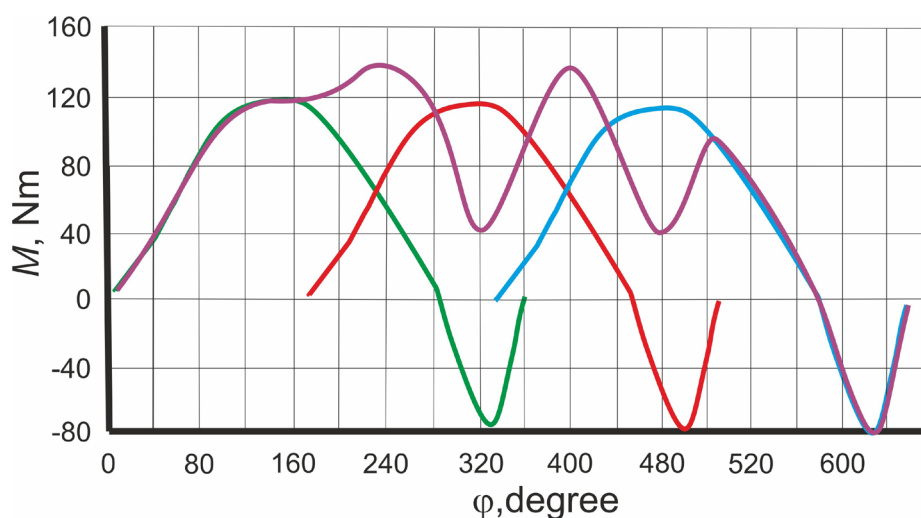


Рис. 10. Графики моментов с фазовым углом смещения $\psi_1 = 170^\circ$
и $\psi_2 = 340^\circ$:

— суммарный момент на приводном валу; — крутящий момент для первого кулачка; — крутящий момент для второго кулачка; — крутящий момент для третьего кулачка

Fig. 10. Graphs of torques with a phase displacement angle $\psi_1 = 170^\circ$
and $\psi_2 = 340^\circ$:

— total torque on the drive shaft; — torque for the first cam; — torque for the second cam; — torque for the third cam

Таблица 2

Table 2

Значения моментов на приводном валу
Torque values on the drive shaft

№ п/п	Фазовые углы		Значения моментов на приводном валу, Н·м
	φ, град. (всасывание)	φ, град. (нагнетание)	
1	120	240	185
2	140	260	186
3	160	280	185
4	180	300	186
5	170	340	137

Как видно из приведенной табл. 2, только один из вариантов (вариант 5) имеет минимальное значение суммарного момента на распределительном валу, он же представлен на рис. 10.

Проведя подробное исследование для различных вариантов, можно приступить к синтезу кулачкового механизма со следующими параметрами: для нагнетания и всасывания приняты 280° и 80° по цикловой диаграмме; ход толкателя – 30 мм; минимальный радиус кривизны – 90 мм.

Перемещения и скорости были определены в соответствии с листингом на рис. 3 и выражением (4). Перемещения представлены на рис. 11, профиль кулачка – на рис. 12.

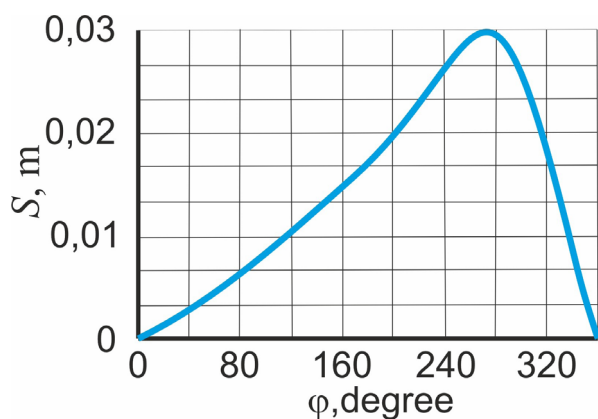


Рис. 11. График изменения перемещений

Fig. 11. Graph of displacement variations

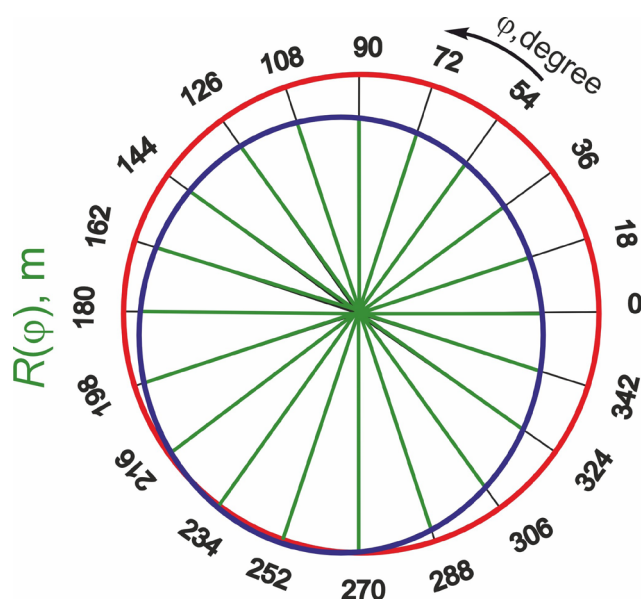


Рис. 12. Профиль кулачка

Fig. 12. Cam profile

Закключение

Основной целью, которая была поставлена в работе, является снижение потребляемой мощности гомогенизатором.

Используя аналитические зависимости (1–4) и задавая некоторые численные значения для параметров кулачкового механизма, выбрали наиболее рациональный закон движения толкателя в виде простой гармонической кривой, которая имеет минимальные значения скоростей из рассмотренного семейства математических кривых. Амплитудные значения аналогов скоростей составили в положительной области 0,012 м, а в отрицательной области $-0,03$ м. Углы давления для этой кривой во всем исследуемом диапазоне углов не превышают допустимых значений $\delta = 30^\circ$. Представленные зависимости крутящих моментов на приводном валу свидетельствуют о целесообразности их углов смещения, равных $\psi_1 = 170^\circ$ и $\psi_2 = 340^\circ$. При этом величина суммарного крутящего момента составила 137 Н·м, а мощность на приводном валу получили равной $P = 2,5$ кВт вместо 3,5 кВт для существующей конструкции, имеющий привод от кривошипно-шатунного механизма. Это указывает на то, что потребляемая мощность уменьшилась на 26 %.

Список литературы

1. Inguva P., Grasselli S., Heng P.W.S. High pressure homogenization – An update on its usage and understanding // Chemical Engineering Research and Design. – 2024. – Vol. 202. – P. 284–302. – DOI: 10.1016/j.cherd.2023.12.026.
2. Chen X., Liang L., Xu X. Advances in converting of meat protein into functional ingredient via engineering modification of high pressure homogenization // Trends in Food Science & Technology. – 2020. – Vol. 106. – P. 12–29. – DOI: 10.1016/j.tifs.2020.09.032.
3. Chevalier-Lucia D., Picart-Palmade L. High-pressure homogenization in food processing // Green food processing techniques / ed. by F. Chemat, E. Vorobiev. – Elsevier: Academic Press, 2019. – P. 139–157. – DOI: 10.1016/B978-0-12-815353-6.00005-7.
4. The influence mechanism of pH and polyphenol structures on the formation, structure, and digestibility of pea starch-polyphenol complexes via high-pressure homogenization / D. Luo, J. Fan, M. Jin, X. Zhang, J. Wang, H. Rao, W. Xue // Food Research International. – 2024. – Vol. 194. – P. 114913. – DOI: 10.1016/j.foodres.2024.114913.

5. Optimization of olive oil based O/W nanoemulsions prepared through ultrasonic homogenization: a response surface methodology approach / T. Mehmood, A. Ahmad, A. Ahmed, Z. Ahmed // *Food Chemistry*. – 2017. – Vol. 229. – P. 790–796. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.03.023.
6. Comparative study of oil-in-water emulsions encapsulating fucoxanthin formulated by microchannel emulsification and high-pressure homogenization / Z. Ma, Y. Zhao, N. Khalid, G. Shu, M.A. Neves, I. Kobayashi, M. Nakajima // *Food Hydrocolloids*. – 2020. – Vol. 108. – P. 105977. – DOI: 10.1016/j.foodhyd.2020.105977.
7. Подгорный Ю.И., Скиба В.Ю., Мартынова Т.Г. Технологическое оборудование: расчет и проектирование. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2024. – 107 с. – ISBN 978-5-7782-5308-7. – EDN DEIRZT.
8. Recent advances in design and stability of double emulsions: trends in Pickering stabilization / E. Tenorio-Garcia, A. Araiza-Calahorra, E. Simone, A. Sarkar // *Food Hydrocolloids*. – 2022. – Vol. 128. – P. 107601. – DOI: 10.1016/j.foodhyd.2022.107601.
9. Emulsifier functionality and process engineering: progress and challenges / A.L.R. Costa, A. Gomes, C.C.P. Andrade, R.L. Cunha // *Food Hydrocolloids*. – 2017. – Vol. 68. – P. 69–80. – DOI: 10.1016/j.foodhyd.2016.10.012.
10. Скиба В.Ю., Иванцовский В.В. Гибридное металлообрабатывающее оборудование: повышение эффективности технологического процесса обработки деталей при интеграции поверхностной закалки и абразивного шлифования. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 312 с. – ISBN 978-5-7782-3690-5. – EDN PKBFNF.
11. Моделирование несущих систем технологических машин / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, А.В. Кириллов, В.Н. Пушнин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2014. – № 2 (63). – С. 91–99. – EDN SMYRYJ.
12. Исследование и выбор параметров при проектировании технологических машин / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, Т.Г. Мартынова, О.В. Максимчук. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. – 260 с. – (Монографии НГТУ). – ISBN 978-5-7782-4177-0. – EDN VZW-WWY.
13. Подгорный Ю.И., Мартынова Т.Г., Скиба В.Ю. Синтез технологических машин. Расчет и конструирование. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023. – 240 с. – (Монографии НГТУ). – ISBN 978-5-7782-4912-7. – DOI: 10.17212/978-5-7782-4912-7. – EDN TVPPKR.
14. Flores P., Souto A.P., Marques F. The first fifty years of the mechanism and machine theory: standing back and looking forward // *Mechanism and Machine Theory*. – 2018. – Vol. 125. – P. 8–20. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.11.017.
15. Topology and dimension synchronous optimization design of 5-DoF parallel robots for in-situ machining of large-scale steel components / K. Chen, M. Wang, X. Huo, P. Wang, T. Sun // *Mechanism and Machine Theory*. – 2023. – Vol. 179. – P. 105105. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.105105.
16. Eckhardt H.D. Kinematic design of machines and mechanisms. – 1st ed. – New York: McGraw-Hill, 1998. – 620 p. – ISBN 0070189536. – ISBN 978-0070189539.
17. Erdman A.G., Sandor G.N. Mechanism design: analysis and synthesis. – 4th ed. – Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2001. – 688 p. – ISBN 0130408727. – ISBN 978-0130408723.
18. Hsieh J.-F. Design and analysis of indexing cam mechanism with parallel axes // *Mechanism and Machine Theory*. – 2014. – Vol. 81. – P. 155–165. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2014.07.004.
19. Design of compliant mechanisms using continuum topology optimization: a review / B. Zhu, X. Zhang, H. Zhang, J. Liang, H. Zang, H. Li, R. Wang // *Mechanism and Machine Theory*. – 2012. – Vol. 143. – P. 103622. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.103622.
20. Dresig H., Vul'fson I.I. Dynamik der mechanismen. – Wien; New York: Springer, 1989. – 328 p. – ISBN 978-3-7091-9036-4. – DOI: 10.1007/978-3-7091-9035-7.
21. Фролов К.В. Теория механизмов и машин. – М.: Высшая школа, 1987. – 496 с.
22. Vul'fson I. Dynamics of cyclic machines. – Cham: Springer International, 2015. – 390 p. – ISBN 978-3-319-12633-3. – DOI: 10.1007/978-3-319-12634-0.
23. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1988. – 640 с. – ISBN 5-02-013810-X.
24. Rothbart H.A. Cam design handbook. – New York: McGraw-Hill Professional, 2003. – 606 p. – ISBN 0071377573. – ISBN 978-0875841830.
25. Faxin L., Xianzhang F. The design of parallel combination for cam mechanism // *Procedia Environmental Sciences*. – 2011. – Vol. 10, pt. B. – P. 1343–1349. – DOI: 10.1016/j.proenv.2011.09.215.
26. Sateesh N., Rao C.S.P., Janardhan Reddy T.A. Optimisation of cam-follower motion using B-splines // *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. – 2009. – Vol. 22 (6). – P. 515–523. – DOI: 10.1080/09511920802546814.
27. Myszk D.H. Machines & mechanisms: applied kinematic analysis. – 4th ed. – Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2012. – 376 p. – ISBN 0132157802. – ISBN 978-0132157803.
28. S&A – Expert system for planar mechanisms design / H. Varbanov, T. Yankova, K. Kulev, S. Lilov // *Ex-*



pert Systems with Applications. – 2006. – Vol. 31 (3). – P. 558–569. – DOI: 10.1016/j.eswa.2005.09.081.

29. Ondrášek J. The synthesis of a hook drive cam mechanism // *Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 92. – P. 320–329. – DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.129.

30. Mott R.L. Machine elements in mechanical design. – 5th ed. – Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2013. – 816 p. – ISBN 0135077931. – ISBN 978-0135077931.

31. Design and analysis of high-speed cam mechanism using Fourier series / C. Zhoua, B. Hua, S. Chen, L. Mac // *Mechanism and Machine Theory*. – 2016. – Vol. 104. – P. 118–129. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.05.009.

32. Туп К.В. Комплексный расчет кулачковых механизмов. – М.: Машгив, 1958. – 380 с.

33. Kinematic analysis of crank-cam mechanism of process equipment / Yu.I. Podgornyy, V.Yu. Skeebe, T.G. Martynova, N.S. Pechorkina, P.Yu. Skeebe // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 327. – P. 042080. – DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042080.

34. Проектирование кулачкового механизма с учетом технологической нагрузки и энергетических затрат / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, А.В. Кириллов, О.В. Максимчук, П.Ю. Скиба // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2017. – № 2 (75). – С. 17–27. – DOI: 10.17212/1994-6309-2017-2-17-27.

35. Motion laws synthesis for cam mechanisms with multiple follower displacement / Yu.I. Podgornyy, V.Yu. Skeebe, A.V. Kirillov, T.G. Martynova, P.Yu. Skeebe // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 327. – P. 042079. – DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042079.

36. Филалова Е.А. Гомогенизация. Новый взгляд. – СПб.: ГИОРД, 2006. – 386 с. – ISBN 5-98879-032-1.

37. Машины и аппараты пищевых производств. В 2 кн. Кн. 1: учебник для вузов / под ред. В.А. Панфилова. – М.: Высшая школа, 2001. – 703 с. – ISBN 5-06-004168-9.

38. Fomin A., Paramonov M. Synthesis of the four-bar double-constraint mechanisms by the application of the Grubler's method // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 150. – P. 871–877. – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.034.

39. To the theory of mechanisms subfamilies / A. Fomin, L. Dvornikov, M. Paramonov, A. Jahr // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 124. – P. 012055. – DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012055.

40. Неклютин Д.А. Оптимальное проектирование кулачковых механизмов на ЭВМ. – М.: Алмата, 1977. – 215 с.

41. Тартаковский И.И. Некоторые задачи синтеза оптимальных законов движения // *Машиностроение*. – 1971. – № 2. – С. 39–43.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Designing the homogenization mechanism

Yuriy Podgornyy^{1, 2, a, *}, **Vadim Skeebe**^{1, b}, **Tatyana Martynova**^{1, c}, **Artur Sadykin**^{1, d},
Nikita Martyshev^{3, e}, **Dmitry Lobanov**^{4, f}, **Arina Pelemeshko**^{1, g}, **Andrey Popkov**^{1, h}

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

² Novosibirsk Technological Institute (branch) A.N. Kosygin Russian State University (Technologies. Design. Art), 35 Krasny prospekt (5 Potaninskayast.), Novosibirsk, 630099, Russian Federation

³ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

⁴ I. N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-1664-5351>, pjui@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>, skeebe_vadim@mail.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0002-5811-5519>, martynova@corp.nstu.ru; ^d <https://orcid.org/0009-0002-2061-650X>, artur060779@gmail.com;

^e <https://orcid.org/0000-0003-0620-9561>, martyshev@tpu.ru; ^f <https://orcid.org/0000-0002-4273-5107>, lobanovdv@list.ru;

^g <https://orcid.org/0009-0004-5916-6782>, pyatkova.arina@gmail.com; ^h <https://orcid.org/0009-0006-5587-9990>, andrey.popkov.2013@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 December 2024

Revised: 09 January 2025

Accepted: 31 January 2025

Available online: 15 March 2025

Keywords:

Homogenization
 Cycle diagram of operation
 Kinematic scheme
 Cam mechanism
 Pusher
 Roller
 Speed
 Accelerations
 Motions
 Cam profile

Funding

This study was supported by a NSTU grant (project No. TP-PTM-1_25).

Acknowledgements

The research was carried out at the equipment of the Engineering Center "Design and Production of High-Tech Equipment".

ABSTRACT

Introduction. The primary goal of food processing equipment manufacturing is to create highly efficient process equipment that can increase labor productivity while reducing energy costs. Improving existing and creating new high-performance equipment for food production is one of the main trends in the development of modern mechanical engineering. The term "homogenization" literally means "increasing uniformity". In the context of emulsions, homogenization refers to the process of treating emulsions, which leads to the fragmentation of the dispersed phase. Homogenization is the process of grinding liquid or mashed foods by passing it at high speed and pressure through narrow annular slots. The authors propose to use cam-type mechanisms for homogenization. Cam-type mechanisms allow for a more efficient allocation of the time for the product suction and injection. The homogenization process benefits from the potential to reduce the speed during product injection. **The purpose of the work** is to reduce power consumption during homogenization. **The research methods** are based on the theory of machines and mechanisms. These methods enabled developing a methodology for synthesizing the homogenizer drive mechanism and designing a machine that ensures its operation in accordance with the proposed cycle diagram. **Results and discussion.** The synthesis of mechanisms is executed with consideration for the workload, which was calculated for existing domestic machines in the production of processed cheese. Thus, with a given production capacity of 550 l/h and a plunger diameter of 28 mm, the technological force is $F = 12315$ N. In accordance with the authors' proposals, the design of the homogenizer is modified by introducing cam mechanisms. In the design of this drive, a novel cycle diagram is proposed, enabling an increase in product injection time and a reduction in suction time. According to the novel cycle diagram, 280° is proposed for product injection and 80° for suction. In this case, the power on the drive shaft is equal to $P = 2.5$ kW instead of 3.5 kW for the existing design, driven by a crank mechanism. The power consumption is decreased by 26 %.

For citation: Podgornyy Y.I., Skeebe V.Y., Martynova T.G., Sadykin A.V., Martyshev N.V., Lobanov D.V., Pelemeshko A.K., Popkov A.S. Designing the homogenization mechanism. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 129–142. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-129-142. (In Russian).

References

1. Inguva P., Grasselli S., Heng P.W.S. High pressure homogenization – An update on its usage and understanding. *Chemical Engineering Research and Design*, 2024, vol. 202, pp. 284–302. DOI: 10.1016/j.cherd.2023.12.026.

* Corresponding author

Podgornyy Yuriy I., D.Sc. (Engineering), Professor
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa,
 630073, Novosibirsk, Russian Federation
 Tel: +7 383 346-17-79, e-mail: pjui@mail.ru



2. Chen X., Liang L., Xu X. Advances in converting of meat protein into functional ingredient via engineering modification of high pressure homogenization. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, vol. 106, pp. 12–29. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.09.032.
3. Chevalier-Lucia D., Picart-Palmade L. High-pressure homogenization in food processing. *Green food processing techniques*. Ed. by F. Chemat, E. Vorobiev. Elsevier, Academic Press, 2019, pp. 139–157. DOI: 10.1016/B978-0-12-815353-6.00005-7.
4. Luo D., Fan J., Jin M., Zhang X., Wang J., Rao H., Xue W. The influence mechanism of pH and polyphenol structures on the formation, structure, and digestibility of pea starch-polyphenol complexes via high-pressure homogenization. *Food Research International*, 2024, vol. 194, p. 114913. DOI: 10.1016/j.foodres.2024.114913.
5. Mehmood T., Ahmad A., Ahmed A., Ahmed Z. Optimization of olive oil based O/W nanoemulsions prepared through ultrasonic homogenization: a response surface methodology approach. *Food Chemistry*, 2017, vol. 229, pp. 790–796. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.03.023.
6. Ma Z., Zhao Y., Khalid N., Shu G., Neves M.A., Kobayashi I., Nakajima M. Comparative study of oil-in-water emulsions encapsulating fucoxanthin formulated by microchannel emulsification and high-pressure homogenization. *Food Hydrocolloids*, 2020, vol. 108, p. 105977. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2020.105977.
7. Podgornyj Yu.I., Skeebe V.Y., Martynova T.G. *Tekhnologicheskoe oborudovanie: raschet i proektirovanie* [Technological equipment: calculation and design]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2024. 107 p. ISBN 978-5-7782-5308-7.
8. Tenorio-Garcia E., Araiza-Calahorra A., Simone E., Sarkar A. Recent advances in design and stability of double emulsions: trends in Pickering stabilization. *Food Hydrocolloids*, 2022, vol. 128, p. 107601. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2022.107601.
9. Costa A.L.R., Gomes A., Andrade C.C.P., Cunha R.L. Emulsifier functionality and process engineering: progress and challenges. *Food Hydrocolloids*, 2017, vol. 68, pp. 69–80. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2016.10.012.
10. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V. *Gibridnoe metalloobratyvyayushchee oborudovanie: povyschenie effektivnosti tekhnologicheskogo protsessa obrabotki detalei pri integratsii poverkhnostnoi zakalki i abrazivnogo shlifovaniya* [Hybrid metal working equipment: improving the effectiveness of the details processing under the integration of surface quenching and abrasive grinding]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2018. 312 p. ISBN 978-5-7782-3690-5.
11. Podgornyj Yu.I., Skeebe V.Yu., Kirillov A.V., Pushnin V.N., Erokhin I.A., Kornev D.Yu. *Modelirovanie nesushchikh sistem tekhnologicheskikh mashin* [Modeling of the technological machines support systems]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2014, no. 2 (63), pp. 91–99.
12. Podgornyj Yu.I., Skeebe V.Yu., Martynova T.G., Maksimchuk O.V. *Issledovanie i vybor parametrov pri proektirovanii tekhnologicheskikh mashin* [Analysis and choice of parameters in designing technological machines]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2020. 260 p. ISBN 978-5-7782-4177-0.
13. Podgornyj Yu.I., Martynova T.G., Skeebe V.Yu. *Sintez tekhnologicheskikh mashin. Raschet i konstruirovaniye* [Synthesis of technological machines. calculation and design]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2023. 240 p. ISBN 978-5-7782-4912-7. DOI: 10.17212/978-5-7782-4912-7.
14. Flores P., Souto A.P., Marques F. The first fifty years of the mechanism and machine theory: standing back and looking forward. *Mechanism and Machine Theory*, 2018, vol. 125, pp. 8–20. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.11.017.
15. Chen K., Wang M., Huo X., Wang P., Sun T. Topology and dimension synchronous optimization design of 5-DoF parallel robots for in-situ machining of large-scale steel components. *Mechanism and Machine Theory*, 2023, vol. 179, p. 105105. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.105105.
16. Eckhardt H.D. *Kinematic design of machines and mechanisms*. 1st ed. New York, McGraw-Hill, 1998. 620 p. ISBN 0070189536. ISBN 978-0070189539.
17. Erdman A.G., Sandor G.N. *Mechanism design: analysis and synthesis*. 4th ed. Upper Saddle River, NJ, Pearson, 2001. 688 p. ISBN 0130408727. ISBN 978-0130408723.
18. Hsieh J.-F. Design and analysis of indexing cam mechanism with parallel axes. *Mechanism and Machine Theory*, 2014, vol. 81, pp. 155–165. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2014.07.004.
19. Zhu B., Zhang X., Zhang H., Liang J., Zang H., Li H., Wang R. Design of compliant mechanisms using continuum topology optimization: a review. *Mechanism and Machine Theory*, 2012, vol. 143, p. 103622. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.103622.
20. Dresig H., Vul'fson I.I. *Dynamik der mechanismen*. Wien, New York, Springer, 1989. 328 p. ISBN 978-3-7091-9036-4. DOI: 10.1007/978-3-7091-9035-7.

21. Frolov K.V. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987. 496 p.
22. Vulfson I. *Dynamics of cyclic machines*. Cham, Springer International, 2015. 390 p. ISBN 978-3-319-12633-3. DOI: 10.1007/978-3-319-12634-0.
23. Artobolevskii I.I. *Teoriya mekhanizmov i mashin: uchebnik dlya vtuzov* [Theory of mechanisms and machines]. 4th ed. Moscow, Nauka Publ., 1988. 640 p. ISBN 5-02-013810-X.
24. Rothbart H.A. *Cam design handbook*. New York, McGraw-Hill Professional, 2003. 606 p. ISBN 0071377573. ISBN 978-0875841830.
25. Faxin L., Xianzhang F. The design of parallel combination for cam mechanism. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, vol. 10, pt. B, pp. 1343–1349. DOI: 10.1016/j.proenv.2011.09.215.
26. Sateesh N., Rao C.S.P., Janardhan Reddy T.A. Optimisation of cam-follower motion using B-splines. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2009, vol. 22 (6), pp. 515–523. DOI: 10.1080/09511920802546814.
27. Myszka D.H. *Machines & mechanisms: applied kinematic analysis*. 4th ed. Upper Saddle River, NJ, Pearson, 2012. 376 p. ISBN 0132157802. ISBN 978-0132157803.
28. Varbanov H., Yankova T., Kulev K., Lilov S. S&A – Expert system for planar mechanisms design. *Expert Systems with Applications*, 2006, vol. 31 (3), pp. 558–569. DOI: 10.1016/j.eswa.2005.09.081.
29. Ondrášek J. The synthesis of a hook drive cam mechanism. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 92, pp. 320–329. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.129.
30. Mott R.L. *Machine elements in mechanical design*. 5th ed. Upper Saddle River, NJ, Pearson, 2013. 816 p. ISBN 0135077931. ISBN 978-0135077931.
31. Zhoua C., Hua B., Chen S., Mac L. Design and analysis of high-speed cam mechanism using Fourier series. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, vol. 104, pp. 118–129. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.05.009.
32. Tir K.V. *Kompleksnyi raschet kulachkovykh mekhanizmov* [Complex calculation of cam mechanisms]. Moscow, Mashgiv Publ., 1958. 380 p.
33. Podgorniy Yu.I., Skeebe V.Yu., Martynova T.G., Pechorkina N.S., Skeebe P.Yu. Kinematic analysis of crank-cam mechanism of process equipment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327, p. 042080. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042080.
34. Podgorniy Yu.I., Skeebe V.Yu., Kirillov A.V., Maksimchuk O.V., Skeebe P.Yu. Proektirovanie kulachkovogo mekhanizma s uchetom tekhnologicheskoi nagruzki i energeticheskikh zatrat [Cam mechanism designing with account of the technological load and energy costs]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2017, no. 2 (75), pp. 17–27. DOI: 10.17212/1994-6309-2017-2-17-27.
35. Podgorniy Yu.I., Skeebe V.Yu., Kirillov A.V., Martynova T.G., Skeebe P.Yu. Motion laws synthesis for cam mechanisms with multiple follower displacement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327, p. 042079. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042079.
36. Fialkova E.A. *Gomogenizatsiya. Novyi vzglyad* [Homogenization. A new look]. St. Petersburg, GIORP Publ., 2006. 386 p. ISBN 5-98879-032-1.
37. Panfilov V.A., ed. *Mashiny i apparaty pishchevykh proizvodstv. V 2 kn. Kn. 1* [Machines and apparatus for food production. In 2 bk. Bk. 1]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001. 703 p. ISBN 5-06-004168-9.
38. Fomin A., Paramonov M. Synthesis of the four-bar double-constraint mechanisms by the application of the Grubler's method. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 871–877. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.034.
39. Fomin A., Dvornikov L., Paramonov M., Jahr A. To the theory of mechanisms subfamilies. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 124, p. 012055. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012055.
40. Neklyutin D.A. *Optimal'noe proektirovanie kulachkovykh mekhanizmov na EVM* [Optimal design of cam mechanisms on a computer]. Moscow, Almata Publ., 1977. 215 p.
41. Tartakovskii I.I. Nekotorye zadachi sinteza optimal'nykh zakonov dvizheniya [Some problems of synthesis of optimal laws of motion]. *Mashinostroyeniye = Mechanical Engineering*, 1971, no. 2, pp. 39–43.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.