

Научная статья

УДК 631.242.34+637.23

DOI: 10.17586/2310-1164-2026-19-3-17-30

Структура потока и кинетика сбивания в маслоизготовителе периодического действия с рабочим органом в форме двойной ленты Мёбиуса

З.В. Кулиев*, К.Г. Якубов, Э.М. Алиев

НИИ «Агромеханика», Азербайджан, Гянджа, *vaqifizz@gmail.com

Аннотация. Представлены теоретические основы гидродинамики и кинетики процесса сбивания сливок в маслоизготовителе периодического действия с рабочим органом в форме двойной ленты Мёбиуса. Целью исследования являлась количественная оценка структуры потока сливок и определение рациональных технологических параметров процесса сбивания с учетом гидродинамических и энергетических факторов. Объектом исследования служил маслоизготовитель периодического действия, оснащенный двумя лентами Мёбиуса, расположенными одна внутри другой и закрученными в противоположных направлениях. Использовали методы гидродинамического анализа в цилиндрической системе координат, математического моделирования и аналитической оценки кинетики процесса. Рассмотрены радиальная, тангенциальная и осевая составляющие скорости потока, а также их влияние на формирование устойчивого вихревого режима и коалесценцию жировых шариков. Установлено, что тангенциальная составляющая скорости формирует основную часть кинетической энергии потока и составляет в среднем 46,1% от полной скорости, тогда как доля осевой и радиальной составляющих достигает 32,3 и 21,6% соответственно. В исследуемом диапазоне частот вращения наблюдалось приблизительно 12-кратное увеличение полной скорости потока. Определено, что рациональный диапазон частоты вращения рабочего механизма составляет 700–900 об/мин, обеспечивая устойчивую трехмерную структуру потока и эффективную коалесценцию жировых шариков. Аналитическая оценка продолжительности процесса показала, что применение двойной ленты Мёбиуса позволяет сократить время сбивания в 1,2–3,3 раза в сравнении с традиционными лопастными механизмами. Полученные результаты подтверждают перспективность использования предложенной конструкции для повышения производительности и энергоэффективности маслоизготовителей периодического действия.

Ключевые слова: гидродинамика потока; сбивание сливок; маслоизготовитель периодического действия; лента Мёбиуса; кинетика коалесценции; вихревое движение; структура потока; сливочное масло; гидродинамический режим; механическое перемешивание

Original article

Flow structure and churning kinetics in a batch butter churn with a double Möbius strip working element

Zakir V. Guliyev*, Kamal H. Yakubov, Elman M. Aliyev

Research Institute Agromechanics, Ganja, Azerbaijan, *vaqifizz@gmail.com

Abstract. The article presents the theoretical foundations of hydrodynamics and kinetics of cream churning in a batch butter churn with a working element in the form of a double Möbius strip. The aim of the study was to quantitatively evaluate the flow structure of cream and to determine rational technological parameters of the churning process taking into account hydrodynamic and energy-related factors. The object of the study was a batch butter-making unit equipped with two Möbius strips positioned one inside another and twisted in opposite directions. The research methodology included hydrodynamic analysis in a cylindrical coordinate system, mathematical modeling, and analytical evaluation of process kinetics. Radial, tangential, and axial velocity components were investigated, as well as their influence on the formation of a stable vortex regime and fat globule coalescence. The results demonstrated that the tangential velocity component contributed the largest share of the flow kinetic energy, accounting for approximately 46.1% of the total flow velocity, whereas the axial and radial components represented 32.3% and 21.6%, respectively. Within the investigated rotational speed range, an approximately 12-fold increase in the total flow velocity was observed. The rational rotational speed range of the working mechanism was determined to be 700–900 rpm, ensuring the formation of a stable three-dimensional flow structure and effective fat globule coalescence. Analytical evaluation of the process duration showed that the application of the double Möbius strip reduced churning time by 1.2–3.3 times compared with conventional blade-type mechanisms. The obtained results confirm the potential of the proposed design for improving the productivity and energy efficiency of batch butter churns.

Keywords: flow hydrodynamics; cream churning; batch butter churn; Möbius strip; coalescence kinetics; vortex flow; flow structure; butter production; hydrodynamic regime; mechanical mixing

Введение

Современный подход к проектированию оборудования для производства сливочного масла основывается на понимании гидродинамических и структурных процессов, происходящих внутри рабочей емкости установки. Это обусловлено не только потребностью в энергоэффективности, но и необходимостью гарантировать воспроизводимость микроструктуры готового продукта. Таким образом, вопрос о том, как организован поток сливок в рабочей емкости и как эта организация влияет на столкновение и слияние жировых шариков, становится все более важным.

Сложность заключается в том, что образование масляного зерна является результатом взаимодействия нескольких групп факторов. Гидродинамика определяет частоту столкновений глобул, физико-химические свойства мембран – их готовность к коалесценции, а кристаллизация жира – конечную структуру. Многие пытались распутать этот клубок факторов. Например, используя лабораторную модель процесса взбивания, было продемонстрировано [1], насколько сильно микроструктура масла (размер капель влаги) зависит от характера механического воздействия. При другом уровне анализа были показаны свойства самих глобул: воздействие термической обработки на изменения белкового состава мембран [2], и что модификация этих белков напрямую влияет на реологию взбитых систем [3]. Все эти данные сходятся в одном: гидродинамический режим действует как триггер, превращающий потенциальную нестабильность эмульсии в реальный процесс коалесценции.

Анализ современной научной литературы выявляет значительный дисбаланс в распределении исследовательского внимания. Физико-химические механизмы стабилизации и дестабилизации молочных эмульсий изучены очень подробно. Однако в области проектирования и конструирования мешалок доминирует энергетический подход, примером чего служит исследование [4], в котором оптимизация роторно-лопастного механизма привела к снижению энергопотребления на 24%. Эти количественные достижения часто заслоняют понимание структуры потока в рабочей емкости. Вопросы пространственного распределения скоростей, вклада различных компонентов потока и их влияния на коалесценцию остаются по существу нерешенными. Предложенные эмпирические соотношения [5], несмотря на свою практическую ценность, не предоставляют универсального инструмента, связывающего геометрию рабочего элемента с гидродинамической картиной и кинетикой процесса.

Исследования конечной структуры сливочного масла дополняют картину, демонстрируя зависимость распределения влаги и полиморфных характеристик жировых кристаллов от условий механической обработки и параметров кристаллизации [6, 7]. Гидродинамика предшествующей стадии сбивания вносит косвенный, но существенный вклад в этот процесс, создавая начальную неоднородность среды, которая впоследствии определяет формирование текстуры. Аналогичным образом, продолжительность процесса сбивания напрямую влияет на вязкостные характеристики и температуру плавления масла [8]. Однако в существующих методах выбор временных режимов остается в значительной степени эмпирическим и не основан на количественных данных о распределении скоростей в рабочей емкости.

Таким образом, сегодня у нас есть подробная карта физических и химических процессов, а также набор энергетических характеристик для различных смесителей, но пробел остается. Пространственная гидродинамика по-прежнему плохо изучена: вклад различных компонентов скорости (радиальной, тангенциальной, осевой) в общую картину потока и их прямое влияние на продолжительность перемешивания.

В последние годы внимание исследователей все больше привлекают рабочие органы, основанные на нетривиальных топологических решениях. Одним из наиболее перспективных направлений является применение ленты Мёбиуса – поверхности с однократным закручиванием, которая при вращении генерирует сложное трехмерное течение с непрерывно изменяющейся ориентацией вектора скорости. Наиболее систематизированное исследование в этой области [9] показало применение двух встречновращающихся лент Мёбиуса для агрегации микрометрических тел в жидких средах. При этом основное внимание уделялось именно встречно вращающемуся исполнению конструкции и зависимости степени агрегации, а также энергоемкости процесса от конструктивно-кинематических параметров, а детально гидродинамические структуры потока были мало изучены.

Цель данного исследования – частично восполнить этот пробел: получить количественную оценку структуры потока и ее влияние на кинетику сбивания сливок, а также определить рациональные рабочие параметры установки с учетом технологических и энергетических ограничений. Для этого были поставлены следующие задачи:

- ✓ провести гидродинамический анализ потока в цилиндрических координатах, количественно оценив вклад каждой компоненты скорости;
- ✓ разработать аналитическую модель, связывающую время перемешивания со скоростью вращения, содержанием жира в сливках и параметрами конструкции;
- ✓ ввести коэффициент, позволяющий корректно сравнить эффективность предлагаемой конструкции с традиционной лопастной конструкцией;
- ✓ на основе полученных данных определить рациональный диапазон скоростей вращения, обеспечивающий баланс между интенсивностью перемешивания и сохранением формовочной структуры.

Предложенный подход направлен на установление взаимосвязи между гидродинамическими характеристиками потока и эффективностью процесса сбивания, что позволяет перейти от эмпирических методов к вычислительному проектированию рабочих органов установки.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования выбрана установка для сбивания сливок с нетривиальной геометрией рабочего элемента — двумя лентами Мёбиуса, расположенными одна в другой, скрученными в противоположных направлениях, но вращающимися в одном направлении. Предполагается, что такая конструкция может создавать более однородное вихревое поле по сравнению с обычными лопастями. Ранее нами детально рассматривались [10, 11] такие аспекты данной конструкции, как влияние ширины лент и частот вращения рабочего органа на значения центробежной скорости и силы, характер движения горизонтальной (U) и вертикальной (V) составляющих вектора скорости потока, изменение количественных показателей, составляющих вектора скорости и траекторий движения, а также общая картина вихревого движения и турбулентности потока.

Физическая модель процесса. Рабочий орган маслоизготовителя периодического действия, механизм сбивания (рисунок 1), выполнен в виде двух лент, внешней 8 и внутренней 9, концы которых развернуты на 180° (ленты Мёбиуса). При этом завивка внутренней 9 ленты направлена против завивки внешней 8 ленты. Обе ленты вращаются в одном и том же направлении. Они жестко закреплены со стержнем 7, прочно соединенным с валом 5, верхняя часть которого закреплена самоцентрирующимся подшипником с вращающейся опорой 3, обеспечивающим вращение вокруг центральной оси, установленной на кронштейне 4, расположенном в верхней части рабочей емкости 2, а нижняя часть соединена посредством втулок 15 и 16 с промежуточным валом 14, расположенным на дне рабочей емкости уплотнительным узлом 10. На промежуточном вале 14 установлен шкив 12 с клиновидным ремнем 11, соединенный с электродвигателем (на схеме не указана). Рабочая емкость 2 имеет крышку 1, сливной патрубок 13 и отбойники 6.

Данная конструкция обеспечивает стабильное вращение и эффективную работу механизма сбивания. Основные параметры системы:

- диаметры лент: внешняя лента $D_1 = 0,220$ м, внутренняя лента $D_2 = 0,210$ м;
- ширина лент: I вариант – $b_1 = 0,003$ м, II вариант – $b_2 = 0,004$ м, III вариант – $b_3 = 0,005$ м;
- частота вращения механизма сбивания: I вариант – $n_1 = 700$ об/мин, II вариант – $n_2 = 800$ об/мин, III вариант – $n_3 = 900$ об/мин;
- диаметр рабочей емкости $D_e = 0,36$ м;
- высота рабочей емкости $H = 0,5$ м;
- объем сливок $V = 0,022$ м³;
- массовая доля жира в сливках: 25; 30; 35; 40; 45; 50%.

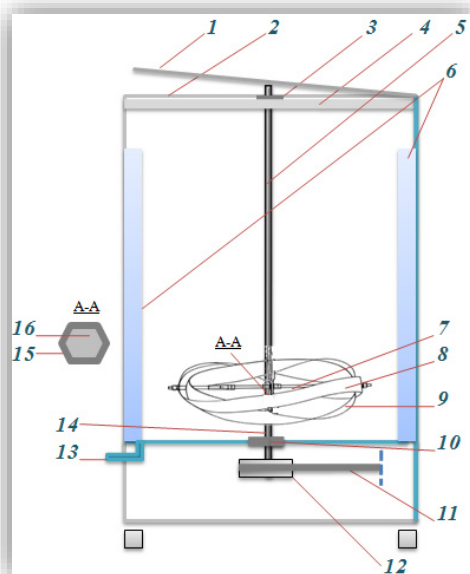


Рисунок 1 – Маслоизготовитель периодического действия с рабочим органом в форме двойной ленты Мёбиуса
 Figure 1. Batch butter churn with a working element in the form of a double Möbius strip

Расчет скоростных компонентов потока сливок. Гидродинамическая картина движения сливок в установке с предлагаемым рабочим органом формируется в условиях трехмерного потока, которая лучше всего описывается в цилиндрической системе координат (r, θ, z) [12]. В этом случае поле скоростей представляется как суперпозиция трех компонент: радиальной v_r , тангенциальной v_t и осевой v_z (рисунок 2). Такое разложение позволяет перейти от качественного описания движения среды к количественной оценке пространственной структуры потока. (Описание рисунка 2:

- v_r – радиальная составляющая суммарной скорости потока, м/с;
- v_t – тангенциальная составляющая суммарной скорости, м/с;
- v_z – осевая составляющая суммарной скорости, направленная вдоль оси вращения, м/с;
- v – суммарная (полная) скорость движения жидкости в произвольной точке обрабатываемого объема, м/с;
- α – угол отклонения вектора суммарной скорости от вертикальной плоскости, проходящей через центральную ось обрабатываемого объема, °;
- φ – угол отклонения вектора скорости от горизонтальной плоскости, перпендикулярной центральной оси рабочего органа (плоскости его вращения), °).

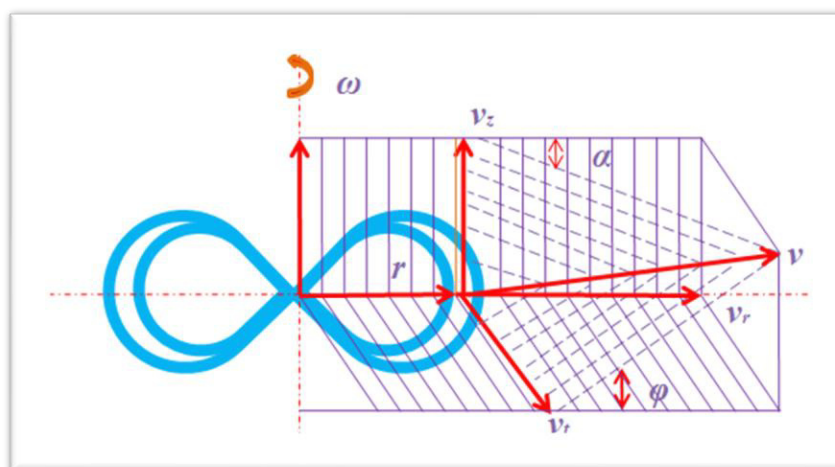


Рисунок 2 – Схема разложения суммарной скорости потока сливок в рабочем объеме на составляющие компоненты
 Figure 2. Decomposition of the resultant cream flow velocity within the working volume into its component velocity vectors

Для анализа кинематики течения сливок используется представление течения с помощью линий тока, отражающих траектории элементарных объемов жидкости. В зависимости от преобладающей компоненты скорости в рабочей емкости формируются характерные картины течения, определяющие перераспределение энергии и интенсивность взаимодействия между жировыми глобулами [13–15].

Для обеспечения воспроизводимости расчетов и исключения неопределенности при аналитической оценке гидродинамических характеристик в дальнейших вычислениях использовались фиксированные значения эмпирических коэффициентов:

$C_r = 0,40$ – учитывающий влияние конструкции на формирование радиального потока ($C_r = 0,35–0,45$);

$C_t = 0,90$ – коэффициент, характеризующий эффективность передачи крутящего момента и структурные потери ($C_t = 0,85–0,95$);

$C_z = 0,30$ – коэффициент интенсивности осевого потока.

Значения C_r и C_t выбирались как средние значения соответствующих диапазонов, приведенных в литературе для мешалок, формирующих трехмерные циркуляционные потоки в цилиндрических аппаратах. Такой подход широко применяется при инженерном моделировании гидродинамических процессов в случаях, когда отсутствуют экспериментальные данные, позволяющие выполнить идентификацию коэффициентов для конкретной конструкции рабочего органа. Использование средних значений диапазонов обеспечивает получение репрезентативной оценки структуры потока без искусственного смещения результатов в сторону минимальных или максимальных значений расчетных параметров.

➤ Радиальный поток характеризуется движением сливок от центра к периферии емкости или в обратном направлении. Его интенсивность определяется радиальной составляющей скорости v_r и в значительной степени зависит от диаметра наружной ленты рабочего механизма ($D_1 = 0,220$ м). Этот конструктивный элемент формирует радиальный градиент давления и играет решающую роль в движении сливок из центральной зоны к периферии. Величина радиальной скорости выражается следующим образом

$$v_r = C_r \cdot \omega \cdot r_r,$$

где ω – угловая скорость, рад/с;

r_r – радиус внешней ленты, м ($r_r = D_{1/2}$).

Радиальный перенос играет важную роль в обновлении объема жидкости вблизи поверхности рабочих элементов и способствует вовлечению периферийных слоев в зону интенсивного перемешивания.

➤ Тангенциальный поток характеризуется вращательным движением сливок тангенциально по окружности. Тангенциальная скорость v_t (м/с) в основном определяется диаметром внутренней ленты рабочего механизма ($D_2 = 0,210$ м). Расположение внутренней ленты внутри внешней, а также их противоположные направления закручивания формируют интенсивную внутреннюю циркуляцию потока, в которой основной крутящий момент передается в радиальном направлении. Тангенциальная скорость описывается выражением

$$v_t = C_t \cdot \omega \cdot r_t,$$

где r_t – радиус внутренней ленты, м ($r_t = D_{2/2}$).

Именно тангенциальное движение определяет формирование устойчивых вихревых структур, обеспечивающих многократное взаимодействие частиц дисперсной фазы.

➤ Поток, направленный вдоль оси вращения, характеризуется продольным движением сливок вдоль оси рабочего механизма, при котором сливки входят и выходят из межленточного пространства. Формирование этой составляющей обусловлено развитием вихревых структур и турбулентных возмущений в рабочей емкости. Осевая скорость оценивается по выражению

$$v_z = C_z \cdot \omega \cdot h,$$

где h – высота слоя сливок, м ($h = 0,22$ м).

Осевая циркуляция обеспечивает массообмен между верхним и нижним слоями, что способствует выравниванию структуры и температуры среды.

➤ Векторная сумма радиальной, тангенциальной и осевой компонент скорости образует полную скорость жидкости v (м/с) в любой точке рабочей емкости, определяемая следующим соотношением

$$v = \sqrt{v_r^2 + v_t^2 + v_z^2}$$

Для характеристики пространственной ориентации потока используются углы отклонения результирующего вектора скорости.

Основное направление и траектория движения сливок характеризуются углом α (°), который определяет отклонение результирующего вектора скорости от вертикальной плоскости, проходящей через центральную ось рабочей емкости:

$$\tan \alpha = \frac{\sqrt{v_r^2 + v_t^2}}{v_z},$$

$$\alpha = \arctan(\tan \alpha).$$

Поведение потока относительно плоскости вращения рабочего элемента определяется углом φ (°), который характеризует отклонение вектора скорости от горизонтальной плоскости:

$$\tan \varphi = \frac{v_z}{v_t},$$

$$\varphi = \arctan(\tan \varphi).$$

Введение этих параметров позволяет перейти от скалярного описания скоростей к анализу направления движения, имеющего фундаментальное значение при оценке устойчивости гидродинамического режима.

Таким образом, представленная система уравнений позволяет провести количественный анализ трехмерной структуры потока сливок и установить связь между геометрическими параметрами рабочего органа, режимами его работы и формированием гидродинамических условий, определяющих эффективность процесса взбивания.

Расчет продолжительности сбивания сливок с использованием рабочего механизма на основе лент Мёбиуса. Прямое аналитическое определение времени сбивания t (мин) в установках периодического действия сопряжено со значительными трудностями из-за характера взаимодействия гидродинамических, физико-химических и структурных факторов. В настоящее время отсутствуют универсальные зависимости, пригодные для точного прогнозирования продолжительности процесса сбивания. В инженерной практике для этих целей используются эмпирические зависимости, обобщающие результаты экспериментальных исследований [16–18].

Существующие соотношения связывают продолжительность сбивания с тремя основными группами параметров: массовой долей жира в сливках J (%), скоростью вращения рабочего механизма n (об/мин) и конструктивными особенностями смесительного устройства. В общем виде это соотношение можно выразить следующим образом

$$t_m = \frac{K}{n^m \cdot f(J) \cdot F},$$

где K – эмпирический коэффициент, учитывающий совокупное влияние конструкции аппарата, реологических свойств сливок и условий процесса, для рассматриваемой конструкции принимается $K = 2800$;

n – скорость вращения рабочего механизма, об/мин, ($n = 700–900$ об/мин);

m – эмпирический показатель степени, отражающий влияние турбулентных эффектов ($m = 0,6–0,8$, в расчетах принимается $m = 0,75$);

$f(J)$ – коэффициент, учитывающий изменения вязкости сливок в зависимости от содержания жира (таблица 1);

F – расчетный коэффициент, характеризующий интенсивность механического воздействия.

При аналитической оценке продолжительности процесса сбивания необходимо учитывать влияние массовой доли жира на реологические свойства сливок. Увеличение содержания жира

сопровождается ростом эффективной вязкости дисперсной системы, изменением условий движения жировых глобул и вероятности их взаимных столкновений. Для учета данного эффекта введен безразмерный коэффициент $f(\mathcal{K})$, характеризующий относительное изменение условий коалесценции по сравнению с базовой жирностью сливок.

В качестве базового состояния принято значение массовой доли жира $\mathcal{K}_0 = 30\%$, для которого коэффициент принят равным единице

$$f(\mathcal{K}_0) = 1$$

Для остальных значений жирности коэффициент рассчитывался по линейной зависимости

$$f(\mathcal{K}) = 1 + k \cdot (\mathcal{K} - 30),$$

где $k = 0,015$ — коэффициент чувствительности, отражающий изменение условий перемешивания при изменении содержания жира.

Выбранная зависимость обеспечивает плавное изменение коэффициента в исследуемом диапазоне жирности (25–50%) и учитывает изменение гидродинамического сопротивления среды без введения дополнительных эмпирических параметров. Полученные расчетные значения представлены в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициент $f(\mathcal{K})$ в зависимости от жирности сливок
Table 1. Coefficient $f(\mathcal{K})$ as a function of cream fat content

Жирность сливок, (%)	$f(\mathcal{K})$
25	0,925
30	1,00
35	1,075
40	1,150
45	1,225
50	1,300

Для количественного учета геометрических факторов, определяющих площадь контакта между перемешивающим устройством и обрабатываемой средой, введен коэффициент эффективности конструкции F для рабочего органа в виде двух лент Мёбиуса. Он рассчитывается как отношение эффективной площади перемешивания S_m предлагаемой конструкции к соответствующему значению для классического лопастного механизма S_k

$$F = \frac{S_m}{S_k}.$$

Для двух лент Мёбиуса общая площадь перемешивания определяется геометрией обеих лент

$$S_m = 2 \cdot b \cdot (D_1 + D_2) \cdot \pi,$$

где b — ширина ленты, м (рассматриваемые значения: $b_1 = 0,003$ м, $b_2 = 0,004$ м, $b_3 = 0,005$ м);

D_1 — диаметр внешней ленты, м;

D_2 — диаметр внутренней ленты, м.

Для классического лопастного механизма с N лопастями

$$S_k = N \cdot b \cdot L,$$

где N — число лопастей;

L — длина лопасти, принимаемая как $L = 0,5$ м ($D_e = 0,360$ м — диаметр рабочей емкости).

В расчетах используется значение $S_k \approx 0,09$ м².

Время сбивания для классического лопастного механизма рассчитывается по аналогичной формуле

$$t_k = \frac{K}{n^m \cdot f(\mathcal{K})},$$

где K — эмпирический коэффициент для традиционной конструкции (в расчетах используется значение $K = 3250$).

Для количественной сравнительной оценки эффективности предлагаемой конструкции введен коэффициент эффективности процесса K_3 , характеризующий относительное сокращение продолжительности сбивания по сравнению с традиционным лопастным механизмом. Поскольку интенсивность механического воздействия определяется не только временем обработки, но и площадью активной зоны взаимодействия рабочего органа со сливками, в расчет дополнительно введен коэффициент, учитывающий отношение эффективных площадей перемешивания обеих конструкций.

Таким образом, коэффициент эффективности определяется как отношение времени сбивания классическим механизмом к времени сбивания предлагаемым рабочим органом с последующей корректировкой на относительную площадь активной зоны перемешивания

$$K_3 = \frac{S_M}{S_K} \cdot \frac{t_K}{t_M}.$$

Здесь множитель $\frac{S_M}{S_K}$ учитывает увеличение площади непосредственного взаимодействия рабочего органа со сливками, обусловленное применением двух лент Мёбиуса. Включение данного множителя позволяет учитывать конструктивные особенности рабочего органа при сравнении аппаратов различных типов.

Интерпретация этого коэффициента однозначна: когда $K_3 > 1$, предлагаемый рабочий орган обеспечивает более высокую эффективность процесса сбивания по сравнению с традиционным; когда $K_3 < 1$, его эффективность ниже.

Таким образом, предложенная модель учитывает влияние на продолжительность процесса сбивания не только рабочих параметров (скорость вращения, содержание жира), но и геометрии рабочего органа. Включение коэффициента F облегчает переход от обобщенных эмпирических соотношений к более детальному описанию процесса, учитывающему специфические особенности формирования гидродинамического поля внутри рабочей емкости.

Результаты и их обсуждение

Количественная оценка гидродинамической структуры потока и составляющих скоростного поля. На основе полученных данных установлены зависимости между суммарной скоростью потока сливок v и его составляющими – тангенциальной v_t , радиальной v_r , осевой v_z – и скоростью вращения рабочего механизма n (рисунок 3). Полученные зависимости позволяют количественно охарактеризовать изменения гидродинамического режима в рабочей емкости при изменении рабочих параметров.

Суммарная конечная скорость потока, отражающая интегральную интенсивность движения среды, увеличивается с повышением скорости вращения рабочего элемента. В исследованном диапазоне $n = 100 \rightarrow 1200$ об/мин ее значение варьируется в пределах $v = 1,291 \rightarrow 15,49$ м/с. Таким образом, 12-кратное увеличение скорости вращения сопровождается сопоставимым усилением скорости потока, что указывает на значительное повышение гидродинамического эффекта на дисперсную систему.

Характер изменения скорости носит нелинейный характер. В низкочастотном диапазоне ($n = 100 \rightarrow 600$ об/мин) скорость повышается относительно равномерно, тогда как при переходе к более высоким значениям ($n = 600 \rightarrow 1200$ об/мин) наблюдается увеличение градиента зависимости. В частности, в диапазоне $n = 100 \rightarrow 300$ об/мин скорость почти удваивается ($v = 1,291 \rightarrow 3,873$ м/с), после чего повышение относительной скорости постепенно снижается. Такой эффект можно объяснить увеличением гидродинамических потерь и изменением структуры потока по мере перехода системы к более интенсивным режимам.

Максимальное значение полной предельной скорости $v = 15,49$ м/с достигается при скорости вращения $n = 1200$ об/мин, что указывает на возможность интенсивного механического воздействия на структуру сливок и морфологию жировых шариков в процессе сбивания.

Анализ структуры поля скоростей показывает, что тангенциальная составляющая вносит наибольший вклад в общую скорость, составляя большую часть кинетической энергии потока и определяя характер циркуляции сливок. В диапазоне $n = 100 \rightarrow 1200$ об/мин ее значение изменяется

в пределах $v_t = 0,98 \rightarrow 11,86$ м/с. Во всем диапазоне исследованных режимов v_t превышает другие составляющие скорости и достигает в среднем около 46,1% от общей скорости. Тот факт, что тангенциальная составляющая превышает радиальную в 2–3 раза указывает на формирование устойчивого вращательного движения, которое обеспечивает многократное перемещение частиц внутри объема и увеличивает вероятность их взаимодействия.

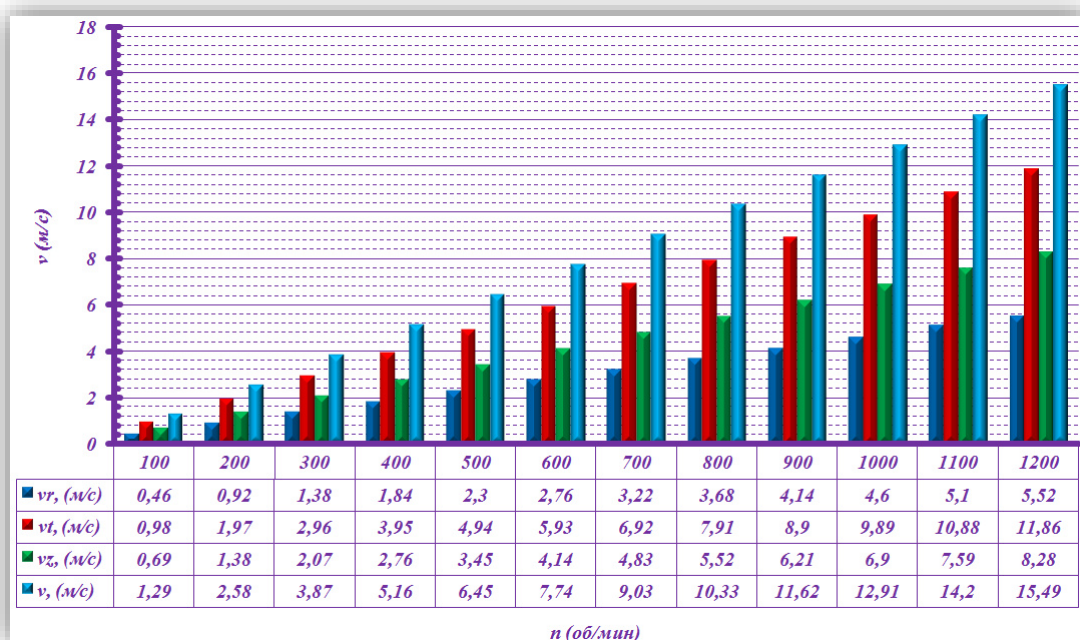


Рисунок 3 – Зависимость суммарной скорости и ее тангенциальной, радиальной и осевой составляющих от частоты вращения рабочего механизма

Figure 3. Dependence of the resultant velocity and its tangential, radial, and axial components on the rotational speed of the working mechanism

Радиальная составляющая вносит меньший вклад в структуру потока и достигает в среднем около 21,6% от общей скорости. По мере увеличения скорости вращения в диапазоне $n = 100 \rightarrow 1200$ об/мин это значение возрастает в диапазоне $v_r = 0,46 \rightarrow 5,52$ м/с. В отличие от тангенциальной составляющей изменение v_r практически линейно, что указывает на более стабильную связь с геометрическими параметрами рабочего тела. Радиальный перенос обеспечивает циркуляцию сливок между центральной и периферийной зонами, создавая условия для интенсивных столкновений жировых шариков и их последующего слияния.

Осевая составляющая занимает промежуточное положение, достигая в среднем около 32,3% от общей скорости. В исследуемом диапазоне частот ее значение варьирует в пределах $v_z = 0,69 \rightarrow 8,28$ м/с. Осевая циркуляция способствует перераспределению массы по высоте емкости, обеспечивая участие различных слоев сливок в процессе перемешивания и стабилизацию температуры и структурного состояния системы.

Пространственная ориентация потока характеризуется углами отклонения результирующего вектора скорости. Угол $\alpha = 57^\circ$, определяющий отклонение от вертикальной плоскости, остается практически постоянным во всем диапазоне частот вращения. Это указывает на пропорциональное изменение радиальной и осевой компонент скорости и сохранение структуры потока при изменении режима работы.

Аналогично угол $\varphi = 34^\circ$, характеризующий отклонение от плоскости вращения, так же не показывает существенных изменений, что подтверждает стабильное преобладание тангенциальной компоненты и указывает на сохранение пространственной организации потока при увеличении частоты вращения.

Общие результаты свидетельствуют, что использование рабочего элемента в виде двойной ленты Мёбиуса создает стабильную трехмерную структуру потока с выраженной циркуляцией в тангенциальном

и осевом направлениях. С увеличением скорости вращения интенсивность гидродинамического эффекта возрастает, однако чрезмерное увеличение скорости может сопровождаться увеличением механических нагрузок на дисперсную фазу.

С технологической точки зрения это требует ограничения верхнего диапазона частот. При $n < 400$ об/мин интенсивность перемешивания недостаточна, что снижает эффективность коалесценции. В то же время, при $n > 1000$ об/мин чрезмерная турбулентность может привести к разрушению образующихся жировых агрегатов. В диапазоне $n = 600 \rightarrow 900$ об/мин достигается сбалансированное сочетание параметров скорости: тангенциальная скорость $v_t = 4,94 \rightarrow 7,91$ м/с, радиальная скорость $v_r = 2,3 \rightarrow 4,14$ м/с, осевая скорость $v_z = 4,83 \rightarrow 6,216$ м/с, а полная скорость $v = 6,45 \rightarrow 11,62$ м/с. Эти значения обеспечивают достаточную интенсивность перемешивания при сохранении структурной стабильности системы.

С учетом сочетания гидродинамических и технологических факторов целесообразно установить оптимальный диапазон скоростей вращения рабочего механизма в пределах $n = 700 \rightarrow 900$ об/мин. В этом диапазоне достигается эффективный баланс между интенсивностью потока, энергопотреблением и условиями формирования стабильной структуры масла.

Аналитическая оценка продолжительности сбивания и сравнительная оценка эффективности. Продолжительность процесса сбивания является ключевым технологическим параметром, определяющим производительность процесса и существенно влияющим на формирование структуры масла. Она зависит не только от скорости вращения рабочего органа, но и от сочетания факторов, включая геометрию и конструкцию механизма, содержание жира в сливках и условия коалесценции жировых шариков.

Увеличение скорости вращения, как правило, приводит к сокращению времени сбивания за счет интенсификации гидродинамических процессов. Однако при превышении определенного порогового уровня наблюдается противоположный эффект, связанный с нарушением механизма коалесценции и частичным разрушением образующихся жировых агрегатов. Это указывает на необходимость выбора рационального диапазона рабочих параметров, обеспечивающего баланс между интенсивностью воздействия и сохранением структуры продукта.

Расчетные данные показывают, что использование рабочего органа в виде двойной ленты Мёбиуса способствует равномерному распределению сливок в рабочей емкости и формированию стабильной трехмерной структуры потока. Это приводит к увеличению числа эффективных столкновений между жировыми шариками и ускоряет их агрегацию.

Сравнительный анализ эффективной зоны перемешивания показал, что сила механического воздействия существенно зависит от ширины ленты рабочего органа. По мере увеличения ширины ленты $b = 0,03 \rightarrow 0,05$ м коэффициент $F = \frac{S_m}{S_k}$ увеличивается от 0,9 до 1,5 (таблица 2), отражая

расширение активной зоны взаимодействия между сливками и рабочими элементами.

Таблица 2. Конструктивный коэффициент эффективности
Table 2. Structural efficiency coefficient

Ширина ленты Мёбиуса, м	$S_m, \text{м}^2$	$\frac{S_m}{S_k}$
0,03	0,081	0,9
0,04	0,108	1,2
0,05	0,135	1,5

Увеличение ширины ленты сопровождается усилением интенсивности перемешивания, однако этот эффект нелинейный и имеет тенденцию к насыщению в определенной точке.

Анализ зависимостей (рисунки 4 и 5) показывает, что продолжительность сбивания снижается с увеличением скорости вращения, ширины ленты и массовой доли жира, что объясняется ускорением процессов коалесценции, расширением площади контакта жировых шариков и изменением реологических свойств системы.

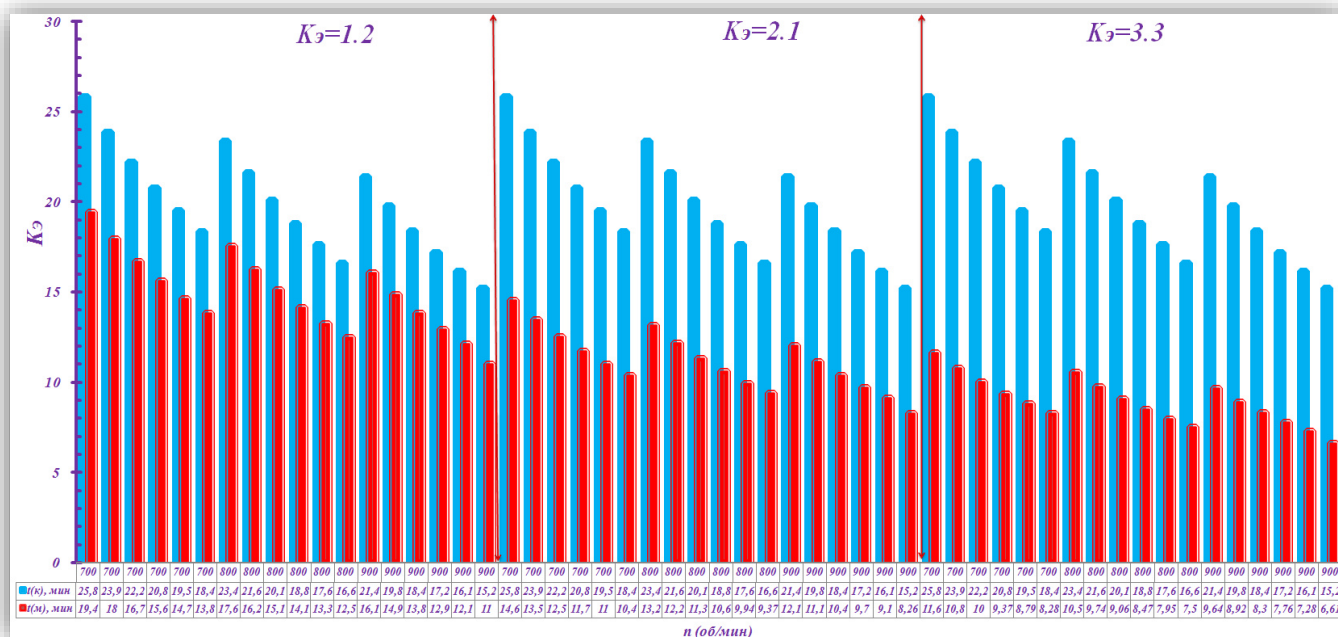


Рисунок 4 – Продолжительность сбивания сливок при использовании рабочего органа типа ленты Мёбиуса и классической конструкции, а также соответствующего K_9
 Figure 4. The duration of whipping cream when using a working element of the Mobius strip type and a classical design, as well as the corresponding K_9

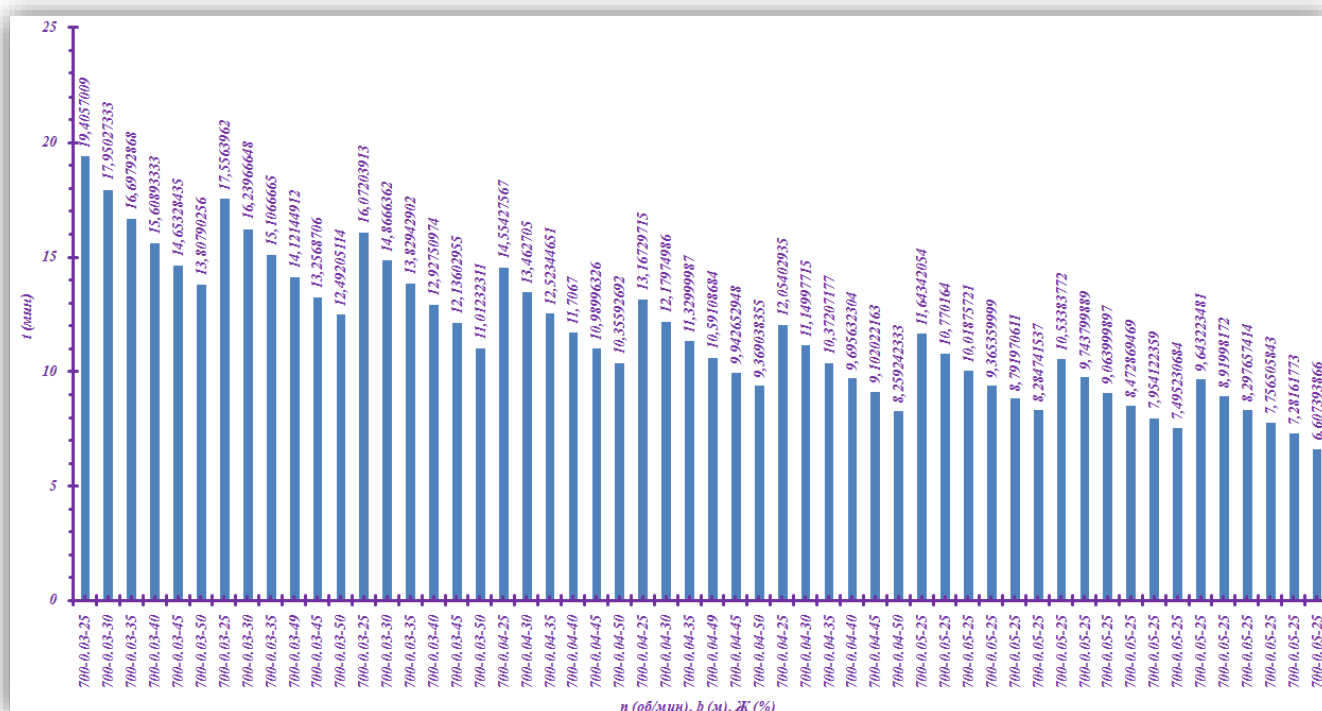


Рисунок 5 – Зависимость продолжительности процесса сбивания сливок от массовой доли жира, частоты вращения рабочего механизма и ширины ленты
 Figure 5. Dependence of cream churning time on fat mass fraction, rotational speed of the working mechanism, and belt width

Сравнение с классическим лопастным механизмом показало, что во всех рассмотренных случаях коэффициент эффективности K_9 превышает единицу. Так для $b_1 = 0,03$ м – $K_9 = 1,2$; $b_2 = 0,04$ м – $K_9 = 2,1$ и при $b_3 = 0,05$ м – $K_9 = 3,3$ (рисунок 4). Это указывает на 1,2–3,3-кратное сокращение продолжительности процесса при использовании рабочего органа с лентами Мёбиуса.

Количественный анализ показывает, что для сливок с содержанием жира 25% увеличение ширины ленты ($b = 0,03 \rightarrow 0,05$ м) и скорости вращения рабочего органа ($n = 700 \rightarrow 900$ об/мин) приводит к сокращению времени сбивания в диапазоне $t_m = 16 \rightarrow 10$ мин в зависимости от комбинации параметров, что соответствует уменьшению на 16–20%. При увеличении содержания жира до 50% время сбивания дополнительно сокращается в диапазоне $t_m = 11 \rightarrow 7$ мин в зависимости от комбинации параметров, что соответствует уменьшению на 12,5–43% (рисунок 5). Это связано с ускорением агрегации жировой фазы.

Полученные результаты подтверждают, что предложенная конструкция обеспечивает более интенсивный гидродинамический эффект при сохранении стабильности формовочной структуры.

При выборе благоприятных рабочих параметров необходимо учитывать ограничения, связанные с качеством продукции. При скоростях вращения $n \leq 700$ об/мин интенсивность перемешивания недостаточна, что снижает эффективность коалесценции. В то же время, при $n \leq 1000$ об/мин чрезмерная турбулентность приводит к увеличению механического напряжения и потенциальному разрушению жировых агрегатов.

Анализ данных показал, что наиболее благоприятные условия достигаются в диапазоне $n = 800 \rightarrow 900$ об/мин, обеспечивая равномерное распределение потока при умеренных энергозатратах. С практической точки зрения оптимальным можно считать значение $n = 800 \rightarrow 900$ об/мин.

Увеличение ширины ленты ($b = 0,03 \rightarrow 0,04 \rightarrow 0,05$ м) приводит к повышению эффективности за счет расширения зоны перемешивания; однако после $b = 0,04$ м темпы роста снижаются. Это позволяет рекомендовать диапазон $b = 0,04 \rightarrow 0,05$ м как оптимальный с точки зрения проектирования.

Увеличение содержания жира в сливках ($Ж = 25\text{--}50\%$) сопровождается сокращением времени сбивания, однако повышение вязкости системы приводит к росту гидродинамического сопротивления. Следовательно, оптимальным диапазоном с технологической и энергоэффективной точки зрения является содержание жира 30–40%, при котором достигается наилучшее сочетание интенсивности процесса и стабильности.

Таким образом, предлагаемый рабочий орган на основе двойной ленты Мёбиуса обеспечивает значительное сокращение времени сбивания при сохранении качества продукта. Этот эффект достигается за счет создания более равномерного и интенсивного гидродинамического поля, что подтверждает потенциал его применения в установках периодического действия.

Заключение

В ходе исследования теоретически обоснована и математически подтверждена целесообразность применения рабочего органа в виде двойной ленты Мёбиуса для интенсификации процесса отделения сливок в маслобойках периодического действия.

Установлено, что предложенная конструкция генерирует стабильный и выраженный трехмерный поток с преобладанием тангенциальной составляющей скорости. Формирующийся пространственный гидродинамический режим обеспечивает более равномерное распределение продукта в рабочей емкости и значительно повышает общую кинетическую активность по сравнению с традиционными решениями.

Выявлен рациональный скоростной диапазон работы аппарата, при котором достигается оптимальный баланс между интенсивным механическим воздействием и сохранением целостности формирующихся жировых агрегатов, что создает наиболее благоприятные условия для коалесценции масляных капель и предотвращает их разрушение.

Аналитическая оценка показала, что за счет оптимизации геометрических параметров ленты достигается кратное сокращение продолжительности процесса сбивания по сравнению со стандартными лопастными механизмами.

Предложенная конструкция рабочего органа повышает эффективность процесса сбивания, ее применение в инженерном проектировании маслобоек периодического действия значительно повысит их производительность и энергоэффективность.

Декларация об использовании искусственного интеллекта

При подготовке рукописи был использован инструмент искусственного интеллекта ChatGPT (разработчик — OpenAI, модель GPT-5.5, доступ через <https://chatgpt.com>) исключительно для языкового редактирования, улучшения стиля изложения и проверки грамматики, не применялся для генерации научного содержания, получения результатов или формирования выводов. Все представленные в статье теоретические выкладки, аналитические зависимости и выводы являются оригинальными и получены лично авторами. Авторами было самостоятельно проверено и утверждено окончательное содержание рукописи, и они несут полную ответственность за представленные результаты.

Литература

1. Gregersen S.B., Boesgaard L.M., Neofytos D.D., Andersen M.E., Andersen U., Corredig M. A simple and robust method for laboratory-scale preparation of butter. *JDS Commun.* 2024, V. 5, no. 6, pp. 528–530. DOI: 10.3168/jdsc.2024-0571
2. Hansen S.F., Petrat-Melin B., Rasmussen J.T., Larsen L.B., Wiking L. Impact of industrial cream heat treatments on the protein composition of the milk fat globule membrane. *J Dairy Res.* 2020, V. 87, no. 1, pp. 89–93. DOI: 10.1017/S0022029919000955
3. Wang Z., Liang G., Chen W., Qie X., Fu L., Li X., He Z., Zeng M., Goff H. D., Chen J. Effects of soy proteins and hydrolysates on fat globule coalescence and whipping properties of recombined low-fat whipped cream. *Food Biophysics.* 2022, V. 17, no. 3, pp. 324–334. DOI: 10.1007/s11483-021-09714-7
4. Yashin A., Polyvynnyi Y. Results of research on justification the device for producing ecologically pure butter. *Scientific Papers, Series A: Agronomy.* 2020, V. 63, np 1, pp. 632–636
5. Datir R.P., Ravindra M.R., Manjunatha M., Sharma M. Optimization studies on mixing of curd and ingredients during lassi (stirred curd) manufacturing. *Indian Journal of Dairy Science.* 2022, V. 75, no. 2, pp. 107–116
6. Shao Y., Cui L., Yu M., Jin J., Jin Q., Wang X. Characteristics of dry-fractionated fractions of anhydrous butter. *China Oils and Fats.* 2025, V. 50, no. 10, pp. 122–128. DOI: 10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.240377
7. Kazama R., Izawa I., Fujiharu K., Misono T., Hoyamatsu Y., Oi N., Tsuno M., Murakami Y., Shono A. Characterization of plant-based milk-derived "Fujiharu Butter": Comparison with butter and butter-like substitutes. *Journal of Food Science.* 2026, V. 91, no. 1, article e70857. DOI: 10.1111/1750-3841.70857
8. Weeragul K., Pandolsook S. Effects of manufacturing conditions on physical characteristics of recombined butter and quality of butter and sponge cakes. *Journal of Culinary Science and Technology.* 2022, V. 20, no. 3, pp. 197–212. DOI: 10.1080/15428052.2020.1824831
9. Яшин А.В., Парфенов В.С., Стригин В.Н., Сёмов И.Н. Оптимизация устройства агрегации микрометрических тел с встречновращающимися лентами Мёбиуса. Пенза: Изд-во ПГУАС, 2014. 163 с.
10. Кулиев З.В., Якубов К.Г., Алиев Э.М. Теоретический анализ гидродинамики процесса сбивания сливок в маслоизготовителе периодического действия с рабочим органом типа ленты Мёбиуса // Пищевые системы. 2026. Т. 9. № 1. С. 86–99. DOI: 10.21323/2618-9771-2026-9-1-86-97
11. Guliev Z.V., Yakubov K.G., Aliyev E.M. Performance improvement of cream churning using a topologically modified dual Möbius strip working body. *ICCPEAS 2025. Atlantis Press.* 2026. pp. 492–501. DOI: 10.2991/978-94-6239-668-5_51
12. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками / пер. с польск. И. А. Щупляка. Л.: Химия, 1975. С. 91–96
13. Мельников В.И. О некоторых гидродинамических особенностях работы мешалок // Труды НИИХиммаш. 1954. № 16. С. 88–104
14. Мельников В.И. Об учете некоторых конструктивных и гидродинамических факторов при расчете мешалок // Труды НИИХиммаш. 1959. № 29. С. 126–150.
15. Мельников С.В. О движении жидкости в мешалке // Труды НИИХиммаш. 1954. № 16. С. 105–120.
16. Арсеньева Т.П. Технология молока и молочных продуктов. Ч. 2. Технология сливочного масла. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 87 с.
17. Вышемирский Ф.А. Маслоделие в России (история, состояние, перспективы). Углич: Рыб. Дом печати, 1998. 589 с.
18. Каменская Н.В., Матюшев В.В. Технология производства масла. Красноярск: Изд-во Красноярского гос. аграрн. ун-та, 2005. 40 с.

References

1. Gregersen S.B., Boesgaard L.M., Neofytos D.D., Andersen M.E., Andersen U., Corredig M. A simple and robust method for laboratory-scale preparation of butter. *JDS Commun.* 2024, V. 5, no. 6, pp. 528–530. DOI: 10.3168/jdsc.2024-0571

2. Hansen S.F., Petrat-Melin B., Rasmussen J.T., Larsen L.B., Wiking L. Impact of industrial cream heat treatments on the protein composition of the milk fat globule membrane. *J Dairy Res.* 2020, V. 87, no. 1, pp. 89–93. DOI: 10.1017/S0022029919000955
3. Wang Z., Liang G., Chen W., Qie X., Fu L., Li X., He Z., Zeng M., Goff H. D., Chen J. Effects of soy proteins and hydrolysates on fat globule coalescence and whipping properties of recombined low-fat whipped cream. *Food Biophysics.* 2022, V. 17, no. 3, pp. 324–334. DOI: 10.1007/s11483-021-09714-7
4. Yashin A., Polyvynnyi Y. Results of research on justification the device for producing ecologically pure butter. *Scientific Papers, Series A: Agronomy.* 2020, V. 63, np 1, pp. 632–636
5. Datir R.P., Ravindra M.R., Manjunatha M., Sharma M. Optimization studies on mixing of curd and ingredients during lassi (stirred curd) manufacturing. *Indian Journal of Dairy Science.* 2022, V. 75, no. 2, pp. 107–116
6. Shao Y., Cui L., Yu M., Jin J., Jin Q., Wang X. Characteristics of dry-fractionated fractions of anhydrous butter. *China Oils and Fats.* 2025, V. 50, no. 10, pp. 122–128. DOI: 10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.240377
7. Kazama R., Izawa I., Fujiharu K., Misono T., Hoyamatsu Y., Oi N., Tsuno M., Murakami Y., Shono A. Characterization of plant-based milk-derived "Fujiharu Butter": Comparison with butter and butter-like substitutes. *Journal of Food Science.* 2026, V. 91, no. 1, article e70857. DOI: 10.1111/1750-3841.70857
8. Weeragul K., Pandolsook S. Effects of manufacturing conditions on physical characteristics of recombined butter and quality of butter and sponge cakes. *Journal of Culinary Science and Technology.* 2022, V. 20, no. 3, pp. 197–212. DOI: 10.1080/15428052.2020.1824831
9. Yashin A.V., Parfenov V.S., Strigin V.N., Semov I.N. Optimization of an aggregation device for micrometric bodies with counter-rotating Möbius strips. *Penza, PGUAS Publ.* 2014. 163 p. (In Russian)
10. Guliev Z. V., Yakubov K. G., Aliyev E. M. Theoretical analysis of hydrodynamics of the cream churning process in a batch butter churn equipped with a Möbius strip working body. *Food Systems.* 2026, V. 9, no. 1, pp. 86–99. DOI: 10.21323/2618-9771-2026-9-1-86-97 (In Russian)
11. Guliev Z.V., Yakubov K.G., Aliyev E.M. Performance improvement of cream churning using a topologically modified dual Möbius strip working body. *ICCPEAS 2025. Atlantis Press.* 2026. pp. 492–501. DOI: 10.2991/978-94-6239-668-5_51
12. Stręk F. *Mieszanie i miezalkini.* Warszawa, 1971. (Russ. ed. Stręk F. *Peremeshivanie i apparaty s meshalkami.* Leningrad: Khimiya Publ. 1975. pp. 91–96)
13. Melnikov V.I. On certain hydrodynamic features of agitator operation. *Trudy NIIKhim mash.* 1954, V. 16, pp. 88–104. (In Russian)
14. Melnikov V.I. Consideration of certain конструктивных and hydrodynamic factors in agitator design calculations. *Trudy NIIKhim mash.* 1959, V. 29, pp. 126–150. (In Russian)
15. Melnikov S.V. On liquid flow motion in an agitator, *Trudy NIIKhim mash.* 1954. V. 16, pp. 105–120. (In Russian)
16. Arsenyeva T.P. *Milk and dairy products technology.* Part 2: Butter Technology. St. Petersburg, ITMO University Publ. 2016, 87 p. (In Russian)
17. Vyshemirsky F.A. *Butter making in Russia: History, current state, and prospects.* Uglich, Rybinskii dom pechati Publ. 1998, 589 p. (In Russian)
18. Kamenskaya N.V., Matyushev V.V. *Butter production technology.* Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State Agrarian University Publ. 2005, 40 p. (In Russian)

Информация об авторах

Закир Вагиф Оглы Кулиев – зав. лабораторией Механизации и автоматизации технологических процессов в животноводстве
Камал Гаджи Оглы Якубов – канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории Механизации и автоматизации технологических процессов в животноводстве
Эльман Мухтар Оглы Алиев – старший научный сотрудник лаборатории Механизации и автоматизации технологических процессов в животноводстве

Information about the authors

Zakir V. Guliyev, Head of Laboratory of Mechanization and Automation of Technological Processes in Animal Husbandry
Kamal H. Yakubov, Ph.D., Associate Professor, Principal Researcher at the Laboratory of Mechanization and Automation of Technological Processes in Animal Husbandry
Elman M. Aliyev, Senior Researcher at the Laboratory of Mechanization and Automation of Technological Processes in Animal Husbandry

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 18.05.2026
Одобрена после рецензирования 08.07.2026
Принята к публикации 17.08.2026

The article was submitted 18.05.2026
Approved after reviewing 08.07.2026
Accepted for publication 17.08.2026