

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-86-97>



Поступила 07.08.2025

Поступила после рецензирования 13.03.2026

Принята в печать 17.03.2026

© Кулиев З. В., Якубов К. Г., Алиев Э. М., 2026

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГИДРОДИНАМИКИ ПРОЦЕССА СБИВАНИЯ СЛИВОК В МАСЛОИЗГОТОВИТЕЛЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ С РАБОЧИМ ОРГАНОМ ТИПА ЛЕНТЫ МЁБИУСА

Кулиев З. В.*, Якубов К. Г., Алиев Э. М.

Научно-исследовательский Институт «Агромеханика», Гянджа, Азербайджан

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

центробежная сила, центробежная скорость, вихревые потоки, частота вращения, лента Мёбиуса, сбивание сливок, жировые шарики

Исследование посвящено изучению гидродинамических процессов, возникающих при сбивании сливок в аппарате с рабочим органом в форме двойной ленты Мёбиуса. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эффективности производства сливочного масла, особенно для малых фермерских хозяйств, где традиционные методы сбивания часто оказываются энергоёмкими и недостаточно продуктивными. Целью исследования является анализ характеристик потоков, формируемых рабочим органом, и их влияния на процесс сбивания сливок. Объектом исследования выступал маслоизготовитель с рабочим органом в виде двойной ленты Мёбиуса, расположенный в Научно-исследовательском институте «Агромеханика» (Гянджа, Азербайджан). Методы включали математическое моделирование для анализа центробежных и вихревых потоков, а также определение ключевых параметров, таких как частота вращения ($n=700 \rightarrow 900$ об/мин) и ширина лент ($b=0,03 \rightarrow 0,05$ м). Использовались формулы для расчёта центробежной скорости, силы и турбулентных потоков. Результаты показали, что увеличение частоты вращения до $n=900$ об/мин и ширины ленты до $b=0,05$ м приводит к максимальным значениям центробежной скорости ($v=12,5$ м/с) и силы ($F=1408,5$ Н), что значительно интенсифицирует процесс сбивания. Турбулентные потоки, создаваемые лентой Мёбиуса, способствуют равномерному перемешиванию и разрушению оболочек жировых шариков. Теоретические исследования показали, что наибольшая гидродинамическая активность формируется в периферийной зоне рабочей ёмкости, где, согласно расчётным данным, создаются наиболее благоприятные условия для коалесценции жировых шариков и формирования масляных зёрен. Полученные результаты позволяют прогнозировать, что реализация указанных гидродинамических режимов может способствовать сокращению продолжительности процесса сбивания и снижению удельных энергозатрат. Экспериментальная оценка данных эффектов требует проведения дополнительных исследований и является предметом дальнейшей работы.

Received 07.08.2025

Accepted in revised 13.03.2026

Accepted for publication 17.03.2026

© Guliev Z. V., Yakubov K. H., Aliev E. M., 2026

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

THEORETICAL ANALYSIS OF HYDRODYNAMICS OF THE CREAM CHURNING PROCESS IN A BATCH BUTTER CHURN EQUIPPED WITH A MÖBIUS STRIP WORKING BODY

Zakir V. Guliev*, Kamal H. Yakubov, Elman M. Aliev

«Agromechanics» Research Institute, Ganja, Azerbaijan

KEYWORDS:

centrifugal force, centrifugal velocity, vortex flows, rotational frequency, Möbius strip, whipping cream, fat globules

ABSTRACT

The study investigates the hydrodynamic processes occurring during the whipping of cream in a device with a working element shaped like a double Möbius strip. The relevance of the work stems from the need to improve the efficiency of butter production, particularly for small-scale farms, where traditional churning methods are often energy-intensive and insufficiently productive. The aim of the research is to analyze the flow characteristics generated by the working element and their impact on the cream-whipping process. The object of the study was a butter churn with a double Möbius strip working element, located at the «Agromechanics» Research Institute (Ganja, Azerbaijan). Methods included mathematical modeling to analyze centrifugal and vortex flows, as well as the determination of key parameters such as rotational speed ($n=700 \rightarrow 900$ rpm) and strip width ($b=0.03 \rightarrow 0.05$ m). Formulas for calculating centrifugal velocity, force, and turbulent flows were applied. The results showed that increasing the rotational speed to $n=900$ rpm and the strip width to $b=0.05$ m leads to maximum values of centrifugal velocity ($v=12.5$ m/s) and force ($F=1408.5$ N), significantly intensifying the churning process. The turbulent flows generated by the Möbius strip promote uniform mixing and the disruption of fat globule membranes. The theoretical investigations show that the highest hydrodynamic activity is formed in the peripheral zone of the working chamber, where according to the calculated data, the most favorable conditions are created for coalescence of fat globules and formation of butter grains. The results obtained make it possible to predict that realization of the indicated hydrodynamic regimes can facilitate reduction of the duration of the churning process and specific energy consumption. The experimental assessment of these effects requires additional studies and is the subject of the further work.

1. Введение

Одним из важнейших продуктов животноводства, предназначенных для непосредственного потребления, является сливочное масло с массовой долей жира 50–85%. Существующие технологии получения сливочного масла различаются по сущности применяемых методов и их аппаратурному исполнению.

В зависимости от масштабов производства для получения сливочного масла применяются различные технологические подходы: при переработке значительных объёмов сливок используется технология преобразования высокожирных сливок на маслообразователях, тогда как для малых объёмов характерен метод периодического сбивания сливок в маслоизготовителях.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кулиев, З. В., Якубов, К. Г., Алиев, Э. М. (2026). Теоретический анализ гидродинамики процесса сбивания сливок в маслоизготовителе периодического действия с рабочим органом типа ленты Мёбиуса. *Пищевые системы*, 9(1), 86–97. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-86-97>

FOR CITATION: Guliev, Z. V., Yakubov, K. H., Aliev, E. M. (2026). Theoretical analysis of hydrodynamics of the cream churning process in a batch butter churn equipped with a Möbius strip working body. *Food Systems*, 9(1), 86–97. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-86-97>

В условиях развития малых форм хозяйствования и локальных перерабатывающих производств актуальной является задача совершенствования маслоизготовителей периодического действия, ориентированных на переработку ограниченных объемов сливок, характерных для крестьянско-фермерских хозяйств. В этом контексте разработка и теоретическое обоснование конструкций маслоизготовителей малой производительности, обеспечивающих интенсификацию процесса сбивания, представляет научный и практический интерес.

Основным сырьём для производства сливочного масла являются не сквашенные и сквашенные сливки. Последние в ряде зарубежных источников называют «йогуртом», что относится к национальным особенностям классификации молочных продуктов и не соответствует регуляторным требованиям стран ЕАЭС, в связи с чем в настоящей работе данный объект не рассматривается как самостоятельный вид сырья для маслоделия [1].

Вне зависимости от используемой технологии основным этапом производства сливочного масла является процесс сбивания, направленный на трансформацию жировой фазы и формирование структуры продукта. Сбивание сливок представляет собой сложный физико-химический и гидромеханический процесс, основанный на механическом разрушении оболочек жировых шариков, их агрегации и последующей коалесценции с формированием пространственно-структурированной системы сливочного масла. Эффективность процесса в значительной степени определяется конструкцией рабочего органа, механизма сбивания и создаваемыми им гидродинамическими условиями [2,3].

В маслоизготовителях периодического действия агрегация жировых шариков в процессе сбивания сливок протекает как на межфазной границе «молочная плазма — воздух», так и в объёме жидкой фазы. Эффективность данного процесса в значительной степени определяется предварительной подготовкой сливок к сбиванию, а также их массовой долей жира, что влияет на интенсивность агрегации жировых шариков, величину потерь жира с пахтой и продолжительность процесса сбивания.

Внутри объёмной фазы агрегация не является следствием лишь случайных столкновений между жировыми шариками, она преимущественно обусловлена действием пенообразования и механизмом флотации, при котором жировые шарики адсорбируются на поверхности пузырьков воздуха.

Для того чтобы столкновения жировых шариков приводили к их агрегации, они должны обладать достаточной кинетической энергией для преодоления энергетических и структурно — механических барьеров. Однако в маслоизготовителях периодического действия, где скорость движения сливок сравнительно низка, необходимую энергию получают лишь отдельные частицы жира. Это обуславливает увеличение продолжительности процесса сбивания и снижение его технологической эффективности, выражающееся в увеличении потерь жира с пахтой при неблагоприятных гидродинамических условиях и недостаточном развитии воздушной фазы.

Анализ теоретических основ процесса сбивания сливок и формирования масляного зерна [4,5], позволяет выделить три ключевых фактора, определяющих эффективность работы маслоизготовителей периодического действия. Наиболее существенное влияние оказывают:

- активное пенообразование, способствующее флотации жировых шариков;
- наличие выраженной турбулентности потока, усиливающей перемешивание;
- кавитационные явления, способные временно разрушать структурные барьеры и повышать степень агрегации жира.

Таким образом, воздействие рабочих органов маслоизготовителя на сливки должно сопровождаться генерацией указанных эффектов, что в совокупности повышает интенсивность сбивания и способствует формированию устойчивой структуры масляного зерна.

Следовательно, при проектировании маслоизготовителей периодического действия целесообразно ориентироваться на конструктивные решения, обеспечивающие повышение эффективности их работы за счёт совершенствования рабочих органов и выбора рациональных режимов функционирования. Такие режимы должны сопровождаться развитым пенообразованием, интенсивной турбулентностью потока и проявлением кавитационных эффектов. В последние годы особое внимание уделяется разработке нестандартных геометрий рабочих органов маслоизготовителей, способствующих повышению интенсивности сбивания сливок и, как следствие, увеличению производительности установок.

В работах А. В. Яшина и Ю. В. Польшанова [6,7] предложена конструкция маслоизготовителя периодического действия с гибким виброприводом, в которой рабочий орган выполнен в виде эластич-

ной мембраны, одновременно являющейся дном ёмкости и совершающей периодические колебательные движения, реализуемые посредством кривошипно-шатунного механизма. По данным экспериментальных исследований авторов, применение указанного рабочего органа позволяет снизить потери жира, обусловленные его налипанием на элементы механизма сбивания, а также уменьшить энергоёмкость процесса. Так, при сбивании сливок степень использования молочного жира достигала $S=99,6\%$, что соответствовало содержанию жира в пахте на уровне $0,4\%$ и требованиям действующего стандарта на сливочное масло¹. Энергоёмкость процесса сбивания составляла $\mathcal{E}_s = 3,84$ Вт·ч/кг при производительности установки $Q_m = 11,25$ кг/ч и мощности привода $N_{пр} = 43,2$ Вт [6].

К числу существенных недостатков данной разработки относится рабочий орган в виде мембраны, являющейся одновременно донной частью рабочей камеры. Мембрана постоянно подвергается циклическим нагрузкам при контакте с продуктом, а также воздействию агрессивных моющих и дезинфицирующих средств в процессе санитарной обработки оборудования.

Совокупность указанных факторов приводит к возникновению микротрещин вследствие циклических деформаций, ускоренному старению материала (особенно в случае применения эластомерных композиций) и к необходимости регулярной замены или ремонта мембраны, что повышает эксплуатационные затраты. Кроме того, в процессе работы наблюдается неравномерное распределение энергии и механических воздействий на перерабатываемый продукт, что приводит к недостаточному развитию турбулентных потоков и увеличению общей продолжительности процесса переработки сливок в сливочное масло.

Указанные недостатки свидетельствуют о целесообразности модернизации конструкции, предусматривающей применение более износостойких материалов, изменение компоновки рабочего органа, а также переход к более устойчивым способам передачи движения, например с использованием вращательных или планетарных механизмов.

Для интенсификации процесса сбивания сливочного масла А. Яшин и Ю. Польшанов [7] предложили конструкцию маслоизготовителя периодического действия, обеспечивающую снижение энергоёмкости процесса за счёт формирования бегущей волны, создаваемой роторно-лопастным рабочим органом. Закрепление рабочего органа в горизонтальной плоскости с эксцентриситетом относительно центра рабочей ёмкости способствует устранению застойных зон по всему объёму перерабатываемых сливок. Поперечное сечение рабочего органа представляет собой замкнутый синусоидальный контур. По данным экспериментальных исследований авторов, при оптимальных конструктивных и кинематических параметрах энергоёмкость процесса сбивания составила $7,25$ Вт ч/кг при производительности $13,4$ кг и потребляемой мощности $97,2$ Вт.

Несмотря на нестандартные технические решения (эксцентриситет, бегущая волна, синусоидальный профиль), конструкция маслоизготовителя обладает рядом недостатков, снижающих её универсальность, технологическую гибкость и эксплуатационную надёжность. Так в процессе сбивания сливок энергоёмкость может вырасти по причине ее затрат на трение из — за сложной формы рабочего органа (синусоидальный контур), неоптимального распределения нагрузки из — за эксцентриситета, неполного охватывания сырья. Кроме того, к недостаткам можно отнести так же и сложность конструкции и ее обслуживания. Так закрепление рабочего органа с эксцентриситетом требует точной балансировки, что усложняет изготовление и повышает риск вибраций при износе подшипников. Стоит отметить, что производство и очистка синусоидального контура лопастей — трудоёмкие процессы, особенно при работе с вязкими, налипающими продуктами. Для устранения этих недостатков следовало бы оптимизировать форму лопастей с целью снижения энергопотребления и упрощения обслуживания установки.

А. Альджаафрах и др. [8] была разработана установка для производства сливочного масла из йогурта, полученного из овечьего и козьего молока. Процесс переработки на данном устройстве включает следующие стадии: молоко перемешивается и пастеризуется при температуре 90°C в течение 5 минут, затем охлаждается до 43°C и подвергается заквашиванию с целью получения йогурта. После завершения ферментации продукт охлаждают до 14°C , сливки подвергаются сбиванию, в результате чего происходит отделение сливочного масла от пахты. Рабочим органом для перемешивания и сбивания служит диск. По его периферии на верхней и нижней поверхностях

¹ ГОСТ 32261-2013 «Масло сливочное. Технические условия». Москва: Стандартинформ, 2019. — 23 с.

расположены радиальные зубчатые выступы в форме лопастей, установленные под углом 90° . Диск установлено на валу, которому двигатель передаёт возвратно — поступательное движение. Процесс сбивания на данном устройстве в зависимости от скорости рабочего органа ($1000 \rightarrow 2000$ об/мин) длилось $35 \rightarrow 110$ минут, а выход жира в пахту составило $0,47\%$ [8].

Одним из существенных недостатков данного устройства является практически полное отсутствие вдоль стенок в рабочей емкости отбойников и минимальная площадь поверхности соприкосновения с продуктом на механизме перемешивания и сбивания. Отсутствие отбойников приводит к недостаточному развитию турбулентного течения сырья и, как следствие, к снижению эффективности перемешивания и нерациональному распределению механических воздействий в объёме рабочей камеры. В результате не реализуется ключевой этап технологии — эффективное сбивание сливок, поскольку при пониженной частоте контактов между жировыми шариками замедляется их коалесценция, приводящая к формированию масляных зёрен. Минимальная площадь контакта рабочих поверхностей с продуктом ограничивает количество зацепляющих, срезающих и ударных элементов. Это приводит к снижению интенсивности гидродинамического воздействия на структуру продукта. Указанный конструктивный недостаток механизма перемешивания приводит к увеличению энергоёмкости технологического процесса и снижению выхода готового продукта, в следствии удлинения процесса сбивания и увеличения отхода жира в пахту. Для устранения этих недостатков требуется пересмотр гидродинамических условий в рабочей камере и модернизация механизма взбивания.

Kalla A. M. с соавторами [9] разработали маслоизготовитель для малых хозяйств, рабочая емкость которого выполнена в форме усечённого конуса и оснащена двойными стенками для терморегуляции с циркулирующей охлаждённой водой. Механизм сбивания представляет собой лопасть с двойными стенками прикрепленной к стенкам емкости под углом к оси вращения. Установка способна производить из $3,33$ кг сливок ($J=40\%$) $1,56$ кг масла в течении 40 мин при скорости вращения $n=60$ об/мин. При этом жирность масла составляет $82,7\%$, массовая доля влаги 16% , при этом минимальный отход жира в пахту $0,5\%$. Данная установка имеет низкое энергопотребление ($367,75$ Вт, $n=1400$ об/мин), привод состоит из редуктора ($1:20$) и системы шкивов для регулировки скорости ($35, 60, 85$ об/мин). Установка менее компактна и подходит для малых фермерских хозяйств [9].

Рабочий орган данной установки, одиночная наклонная лопасть с двойными стенками, расположенная под углом к оси вращения, может привести к дисбалансу при максимальной скорости сбивания ($n=85$ об/мин), в следствии чего произойдет ускоренный износ подшипников и редуктора. Потери жира с пахтой достигают $0,5\%$. При высоких частотах вращения коническая форма емкости и специфика рабочего органа могут вызывать избыточную турбулентность. Это повышает риск потерь жира с пахтой, а интенсивная аэрация смеси ведет к нежелательному росту массовой доли влаги в сливочном масле.

Упрощенный маслоизготовитель периодического действия для малых хозяйств, предложен С. А. Лазуткиной и М. Р. Миннибаевым [10]. Он представляет собой вертикальную цилиндрическую емкость с внутренними ребрами прямоугольной формы. Механизмом сбивания, расположенный в нижней части емкости, представляет собой плоский диск с прямоугольными лопастями, которые установлены под прямым углом к диску. Энергоёмкость данной установки составляет до 2 кВт/кг. В процессе сбивания предполагалось формирование турбулентного перемешивающего потока исключительно за счёт работы механизма сбивания, без дополнительных ударных воздействий на сливки, что должно способствовать получению продукта с высокой массовой долей жира, сохранению шаровидной формы масляных зёрен и, как следствие, снижению потерь жира с пахтой [10].

Неоптимальная геометрия лопастей, отсутствие изгибов и их жесткое крепление под прямым углом, увеличивает вероятность создания неравномерного турбулентного потока. Последствиями этого могут быть менее интенсивное перемешивание в верхней части емкости и избыток вихревых зон в нижней, что может привести к разрушению структуры масляных зёрен. Кроме того, противоположное от центра направление лопастей приведет к дисбалансу потока, образуя в зоне между лопастями «мертвые зоны» с низкой турбулентностью. При этом могут возрастать риск локального перегрева продукта, неравномерность сбивания и увеличение продолжительности технологического процесса.

М. Эбрахими и соавторы [11] разработали установку периодического действия для производства сливочного масла из сливок или йогурта с возвратно — поступательным механизмом. Установка

состоит из рамы, барабана ($13,5-21,3$ л), кривошипно — шатунного механизма и электропривода ($2,9$ кВт, $n=1400$ об/мин + редуктор ($1:40$)). Конструкция установки отличается простотой, а за счёт имитации традиционного метода отличается формированием характеристик продукта, сопоставимых с показателями, достигаемыми при классических способах производства. В процессе сбивания, для оптимизации выхода масла, возможно плавно регулировать амплитуду ($40 \rightarrow 80$) и частоту ($50 \rightarrow 72$ цикл/мин). Основной принцип работы состоит в том, что в результате механического воздействия происходит разрушение жировых глобул, формирование масляных зёрен и отделение пахты. Данная установка является оптимальным решением для малых ферм [11].

Отсутствие внутри рабочей емкости перфорированных перегородок или рёбер, а также линейное движение самой емкости приводит к неравномерному перемешиванию и ограничению, основного фактора при сбивании, формированию турбулентного потока. В результате в объеме не возникают вихревые и сдвиговые потоки, необходимые для эффективной коалесценции жировых глобул. Отсутствие закрученных потоков приводит к образованию «мертвых зон», особенно в центральной части емкости.

Во всех рассматриваемых разработках исследуется в основном влияние геометрии и типа рабочего органа на физико — химические процессы сбивания и турбулентности потока, которые и являются определяющими факторами при производстве сливочного масла. Особое внимание уделено роли конструкции рабочего органа в создании требуемых гидродинамических условий, обеспечивающих равномерное перемешивание продукта и минимизацию мёртвых зон. Во всех рассмотренных конструкциях выявлены типичные проблемы как недостаточная площадь контакта рабочих органов с продуктом, неравномерность распределения усилий, мёртвые зоны в объеме продукта и как следствие отсутствие развитой турбулентности. Указанные недостатки в конструкциях современных маслоизготовителей периодического действия обуславливают необходимость разработки более совершенных рабочих органов, способных обеспечить развитие турбулентных, сдвиговых и кавитационных эффектов, интенсифицировать процесс сбивания, сократить время обработки и потери жира.

Наиболее перспективными являются механизмы с улучшенной геометрией, обеспечивающей активное перемешивание без избыточной нагрузки на конструкцию. В связи с этим, для маслоизготовителя периодического действия, предложена принципиально новая конструкция, где механизмом сбивания является рабочий орган в форме двойной ленты Мёбиуса, создающий сложные вихревые потоки за счет геометрических особенностей.

Цель данной работы — это анализ характеристик потоков, возникающих при взбивании сливок, и их влияние на эффективность процесса, а также теоретическое обоснование гидродинамических процессов в аппарате с рабочим органом в форме двойной ленты Мёбиуса.

2. Объекты и методы

2.1. Физическая модель процесса

Рабочий орган, механизм сбивания (Рисунок 1), выполнен в виде двух лент, внешней 8 и внутренней 9, концы которых развёрнуты на 180° , образуя Мёбиусовы ленты. При этом завивка внутренней ленты 9 направлена против завивки внешней ленты 8. Обе ленты вращаются в одном и том же направлении. Они жестко закреплены на стержне 7, который соединен с валом 5. Верхняя часть вала зафиксирована в самоцентрирующемся подшипнике 3, установленном на кронштейне 4 в верхней части емкости 2. Нижняя часть через втулки 16 и 17 соединена с промежуточным валом 14, который опирается на уплотнительный узел 10, расположенный на дне емкости. На промежуточном вале 14 установлен шкив 12 с клиновидным ремнем 11, который соединяется с электродвигателем (на схеме не указана). Рабочая емкость 2 имеет крышку 1, сливной патрубков 13 и отбойники 6.

Данная конструкция обеспечивает стабильное вращение и эффективную работу механизма сбивания.

2.2. Основные параметры системы:

- диаметры лент: внешняя лента — $D_1=0,220$ м, внутренняя лента — $D_2=0,210$ м;
- ширина лент: I вариант — $b_1=0,03$ м, II вариант — $b_2=0,04$ м, III вариант — $b_3=0,05$ м;
- диаметр рабочей емкости: $DE=0,36$ м;
- высота рабочей емкости: $H=0,5$ м;
- объем сливок: $V=0,022$ м³;

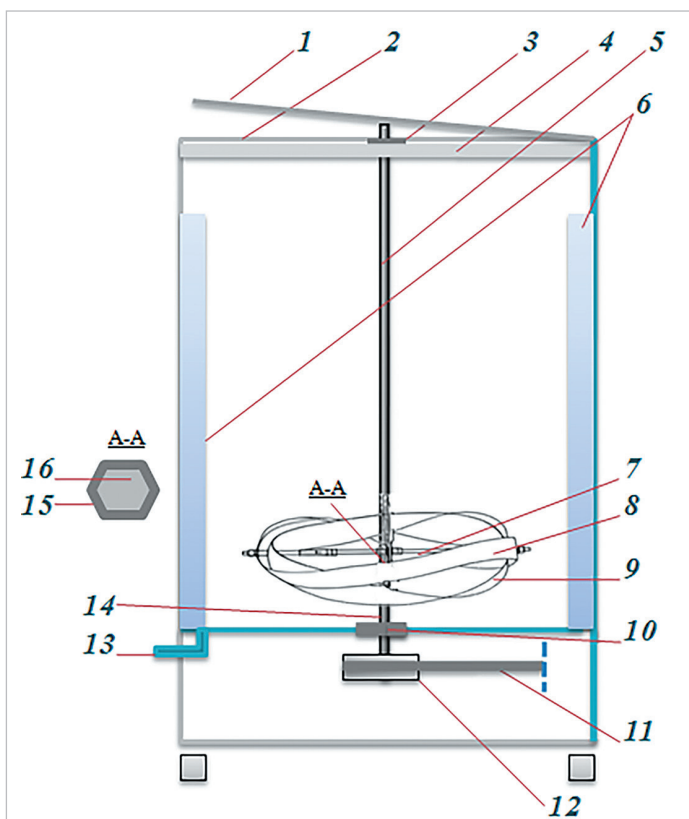


Рисунок 1. Маслоизготовитель периодического действия с рабочим органом в форме двойной ленты Мёбиуса:

1 – крышка; 2 – рабочая емкость; 3 – самоцентрирующийся подшипник с вращающейся опорой; 4 – кронштейн; 5 – вал; 6 – отбойники; 7 – стержень; 8 – внешняя лента; 9 – внутренняя лента; 10 – уплотнительный узел; 11 – клиновидный ремень; 12 – ведомый шкив; 13 – сливной патрубок; 14 – промежуточный вал; 15 и 16 – втулки

Figure 1. Batch – operated butter churn with a working body in the form of a double Möbius strip: 1 – cover; 2 – working chamber; 3 – self-centering bearing with rotating support; 4 – bracket; 5 – working member shaft; 6 – deflectors; 7 – rod; 8 – outer belt; 9 – inner belt; 10 – sealing assembly; 11 – V – belt; 12 – driven pulley; 13 – drain pipe; 14 – intermediate shaft; 15 and 16 – bushings

- плотность сливок: $\rho = 997 \text{ кг/м}^3$;
- массовая доля жира в сливках – 35 %;
- вязкость сливок $\mu = 0,02\text{--}0,04 \text{ Па}\cdot\text{с}$;
- частота вращения механизма сбивания: I вариант – $n_1 = 700 \text{ об/мин}$, II вариант – $n_2 = 800 \text{ об/мин}$, III вариант – $n_3 = 900 \text{ об/мин}$.

2.3. Гидродинамические особенности потока:

При вращении:

- центробежные силы перемещают сливки от центра к периферии;
- противоположное скручивание лент создает зоны сдвига, способствующие турбулентности.

2.4. Методология

Исследование основано на теоретическом анализе движения вязкой дисперсной среды в рабочей ёмкости маслоизготовителя с учётом гидродинамических характеристик потока. При этом вязкость сливок рассматривается как эффективный параметр, зависящий от их массовой доли жира и температуры сбивания, что потенциально оказывает влияние на характер турбулентного движения и величину возникающих центробежных сил. В рамках настоящего исследования анализ проводится при фиксированных диапазонах указанных параметров, соответствующих условиям технологического процесса. Основные параметры:

- Центробежная скорость:

$$v = \omega \times (r + k \times b), \text{ (м/с)} \quad (1)$$

$$\omega = 2\pi n / 60, \text{ (рад/с)} \quad (2)$$

где: ω – угловая скорость, рад/с; n – частота вращения рабочего органа, об/мин; r – радиус ленты, м; b – ширина лент, м; k – поправочный коэффициент, характеризующий изменение скорости по ширине ленты, $k = 0,5$.

Обобщенная средняя центробежная скорость $v_{o.ср}$, рассчитанная с учетом параметров обеих рабочих лент:

$$v_{o.ср} = \frac{v_1 + v_2}{2}, \text{ (м/с)} \quad (3)$$

- Центробежная сила F :

$$F = \rho V \frac{\omega^2}{b} \frac{(r + kb)^3 - r^3}{3}, \text{ (Н)} \quad (4)$$

где: ρ – плотность сливок, кг/м^3 ; V – объем сливок, м^3 .

Данная формула учитывает распределение массы по ширине ленты. Масса жидкости распределяется по ширине ленты от радиуса r до радиуса $r + b$. Поскольку каждая элементарная масса частицы расположена на разном расстоянии от оси вращения, расчет выполняется путем интегрирования по ширине ленты b .

При решении этого интеграла стандартным методом появляется коэффициент $\frac{(r + kb)^3 - r^3}{3}$. Здесь число 3 – это результат интегрирования выражения вида r^2 по ширине b и является результатом усреднения момента инерции массы жидкости по ширине колеса. Оно учитывает, что:

- распределение массы жидкости не на одном радиусе r , а в интервале от r до $r + b$;
- зависимость центробежной силы от куба радиуса (r^3), что при усредненном влиянии ширины даёт деление на 3.

Обобщенная средняя центробежная сила $F_{o.ср}$, рассчитанная с учетом параметров обеих рабочих лент:

$$F_{o.ср} = \frac{F_1 + F_2}{2}, \text{ (Н)} \quad (5)$$

- Анализ турбулентных потоков проводился по двум компонентам скорости: горизонтальной (U , м/с), определяющей движение вдоль радиуса вращения, и вертикальной (V , м/с), фиксирующей восходящие и нисходящие потоки:

$$U = -v_{o.ср} \cdot \cos\left(\theta \cdot \frac{\pi}{180}\right), \text{ (м/с)} \quad (6)$$

$$V = -v_{o.ср} \cdot \sin\left(\theta \cdot \frac{\pi}{180}\right), \quad (7)$$

где: θ – угол поворота, $^\circ$.

Для анализа использовались численные методы интегрирования и графические иллюстрации зависимостей.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Центробежные скорости и силы

Механизм сбивания (Рисунок 1) выполнен в форме двойной ленты Мёбиуса с противоположно направленной завивкой полос (внешней 8 и внутренней 9). Благодаря такой геометрии в сливках создаются сложные вихревые потоки, которые ускоряют разрушение оболочек жировых шариков и их последующую агрегацию (слипание).

Движение сливок по ленте Мёбиуса определяется следующими факторами:

- неравномерное распределение потоков – поскольку лента Мёбиуса не имеет разделения на внутреннюю и внешнюю стороны (односторонняя поверхность), потоки непрерывно меняют направление по всей её длине;
- динамика центробежных сил – вращение вызывает движение сливок к периферии, но уникальная структура ленты приводит к перераспределению скоростей и формированию интенсивных циркуляционных потоков;
- турбулентность и напряжения сдвига – вихревые зоны и сдвиговые усилия ускоряют разрушение белковой оболочки жировых шариков, способствуя их агрегации.

Под действием центробежных сил сливки перемещаются от центральной зоны обеих лент к периферии, формируя интенсивный поток. Возникающее при этом центробежное ускорение направляет поток от центральной зоны к стенкам рабочего объема. Благодаря различным радиусам внешней и внутренней лент, а также градиенту скоростей по их ширине, дисперсные частицы жировой фазы сливок движутся с разными скоростями, создавая локальные турбулентные зоны. Кроме того, во взаимодействии встречных потоков, возникающих благодаря противоположно направленным завивкам лент, вызывает деформации сдвига и трения, что усиливает столкновения жировых

шариков, приводя к разрушению их оболочек и ускорению процесса агрегации жировых частиц.

Поток сливок, направляемый центробежным действием от центра к стенкам рабочей ёмкости, формируется под воздействием частоты вращения механизма сбивания. При этом скорость потока прямо пропорционально возрастает с увеличением окружной скорости и радиуса вращения механизма сбивания. Усиление центробежной силы значительно повышает интенсивность перемешивания и сдвиговых деформаций.

При увеличении частоты вращения механизма сбивания в диапазоне $n = 700 \rightarrow 900$ об/мин, наблюдаются следующие закономерности — центробежная скорость возрастает пропорционально частоте вращения в диапазоне $v_{o,cr.} = 8,98 \rightarrow 12,5$ м/с, а центробежная сила увеличивается пропорционально квадрату частоты вращения в диапазоне $F_{o,cr.} = 780,83 \rightarrow 1408,47$ Н, (Рисунок 2). Данные зависимости демонстрируют линейную корреляцию между скоростью и частотой вращения ($v \propto n$), а также квадратичную зависимость силы от частоты ($F \propto n^2$), (\propto — символ пропорциональности).

Таким образом, увеличение частоты вращения усиливает центробежные эффекты, что способствует ускорению сбивания сливок. Это обеспечивает интенсивное перемешивание и сдвиговую деформацию среды, что ускоряет разделение фаз и агрегацию жировых шариков. Однако повышение частоты вращения до $n = 900$ об/мин способно вызвать неравномерное распределение сливок в рабочей ёмкости и чрезмерное пенообразование, уменьшение производительности вследствие реэмульгирования молочного жира.

При варьировании ширины лент происходит изменение гидродинамической картины процесса. С ее изменением меняется объём сливок, включённых в движение, что приводит к модификации структуры потока и уровня турбулентности. Так при $b_3 = 0,05$ м, интенсивность воздействия на сливки увеличивается, создаются повышенные напряжения сдвига, существенно меняются реологические характеристики потока. При увеличении ширины ленты $b = 0,03 \rightarrow 0,05$ м, при росте частоты вращения $n = 700 \rightarrow 900$ об/мин, средний прирост центробежной скорости $v_{o,cr.}$ и силы $F_{o,cr.}$ составил $\approx 8\%$ (Рисунок 2).

Использование узких лент ($b_1 = 0,03$ м) позволяет генерировать интенсивные локальные вихри, которые усиливают турбулентное перемешивание и диспергирование фаз. Однако это может привести к пространственной неоднородности распределения сливок и формированию застойных зон.

Более широкие ленты ($b_3 = 0,05$ м) в состоянии обеспечить более однородное течение со стабильными скоростными характеристиками и предсказуемым распределением напряжений сдвига. Но при этом происходит снижение градиента скорости (dv/dr), что уменьшает эффективность деформации жировых шариков и требует увеличения частоты вращения для компенсации.

Как известно, процесс превращения сливок в сливочное масло обусловлен механическим воздействием, в результате которого

происходит разрушение белково-липопротеиновых оболочек жировых глобул и их последующая коалесценция с формированием непрерывной жировой структуры, характерной для масляного зерна. Ключевую роль здесь играют центробежные скорости и силы, формируемые периодически движущимся рабочим механизмом, а также связанные с ними механические колебания, сдвиговые и ударные воздействия. Интенсивность указанных эффектов определяется конструктивными и кинематическими параметрами оборудования (частота вращения, амплитуда движения, температурный режим и продолжительность обработки), что влияет на дисперсный состав жировых глобул сливок, скорость их агрегации и коалесценции, а также на формирование текстуры конечного продукта.

На Рисунке 3 в полярной системе координат визуализировано распределение центробежной скорости и силы вдоль радиуса ёмкости. Графики наглядно показывают зависимость этих параметров от частоты вращения и ширины лент Мёбиуса. В такой графической интерпретации, угол определяет положение точки на графике, тогда как расстояние от центра (радиус) отражает величину соответствующего параметра. Аналогичный подход к анализу и визуализации распределения центробежных скоростей и радиальных сил в полярной системе координат широко применяется при исследовании вращательных гидродинамических процессов в различных типах роторных аппаратов, включая насосные системы, что показано в работах Wang M. с соавторами [12], Cao W. с соавторами [13], а также Kang Y. с соавторами [14]. Несмотря на различие функционального назначения исследуемых объектов, методологическая общность данного подхода обусловлена идентичностью физической природы вихревого движения вязкой среды в ограниченном вращающемся объёме. Это подтверждает универсальность использования полярной системы координат как эффективного инструмента для анализа структуры потока, распределения динамических нагрузок и характера нестационарных гидродинамических явлений во вращающихся аппаратах независимо от их конструктивного исполнения и области применения.

Для точного описания центробежной скорости $v_{o,cr.}$ м/с и силы $F_{o,cr.}$ (Н), рабочая ёмкость представляется как полная окружность (360°). При этом центробежные параметры равномерно распределяются по углам в диапазоне $0^\circ \rightarrow 360^\circ$, с шагом 45° . Эти углы соответствуют положениям точек на окружности вращения механизма сбивания. Для расчётов радиус объёма переработки (при $DE = 0,36$ м) рассматривается в пределах $0 \rightarrow 0,180$ м, при этом выбираются 8 дискретных точек, равномерно распределённых с шагом $0,0225$ м: $0,0225$ м; $0,045$ м; $0,0675$ м; $0,09$ м; $0,1125$ м; $0,135$ м; $0,1575$ м; $0,18$ м.

В полярной системе координат каждая точка определяется двумя значениями: расстоянием от центра графика до анализируемой точки r , (м) (внутренний радиус обрабатываемого объёма $r = 0 \rightarrow 0,18$ м); углом поворота между положительным направлением оси X и линией, соединяющей центр с анализируемой точкой (угол, определяющий положение анализируемой точки на графике), θ , $^\circ$.

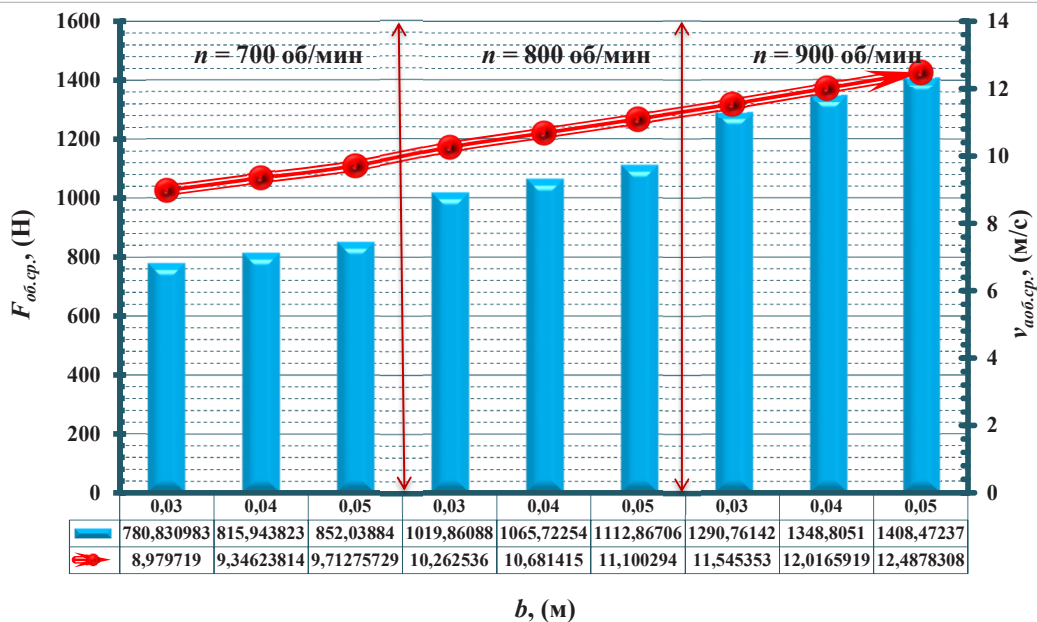


Рисунок 2. Зависимость центробежной скорости $v_{o,cr.}$ м/с и силы $F_{o,cr.}$ (Н) от n , (об/мин) и b , (м) механизма сбивания
 Figure 2. Dependence of the centrifugal velocity $v_{o,cr.}$ (m/s) and force $F_{o,cr.}$ (N) on n , (rpm) and b , (m) of the churning mechanism

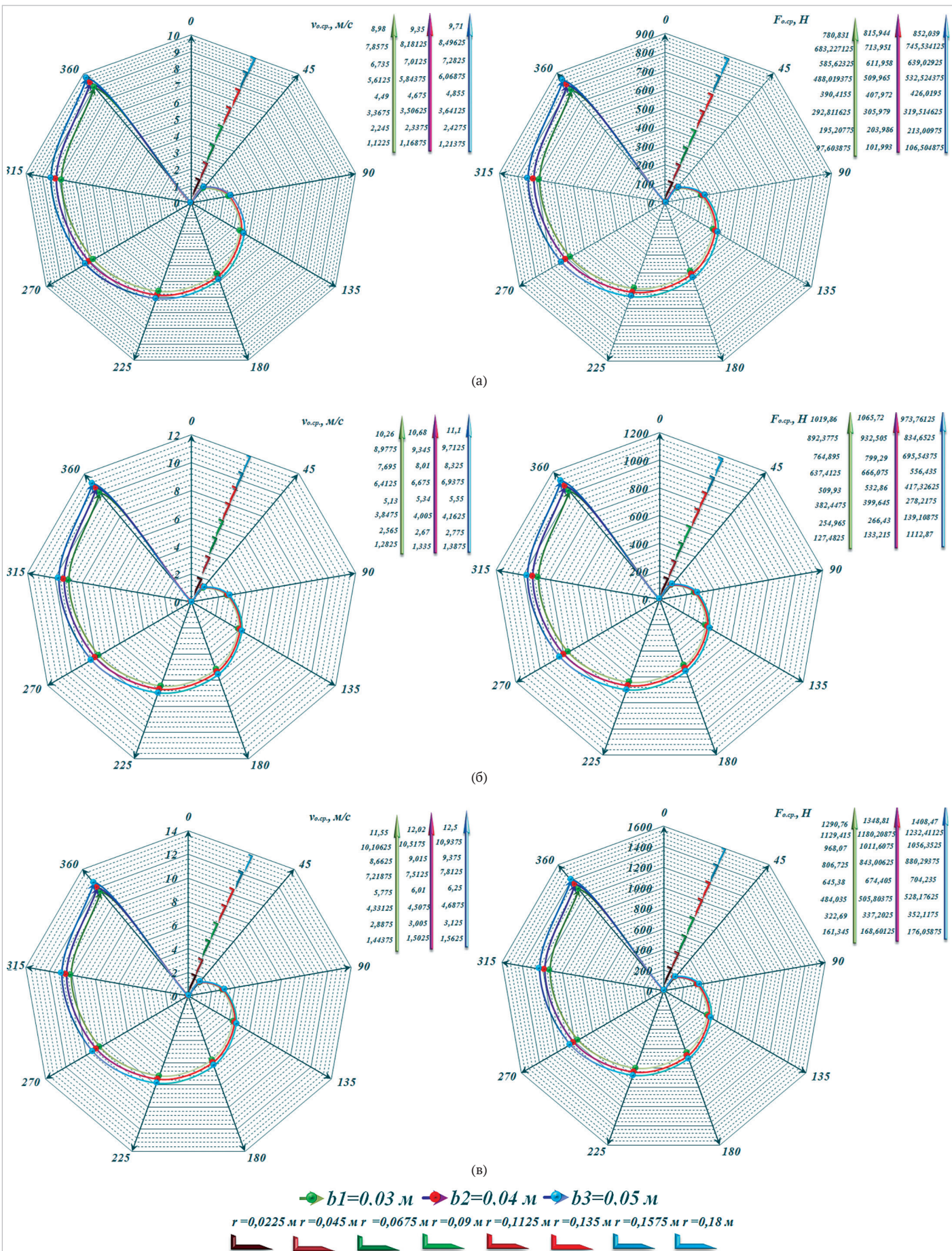


Рисунок 3. График распределения центробежной скорости $v_{o.ср.}$, (м/с) и силы $F_{o.ср.}$, (Н) по радиусу в рабочей емкости:

(а) – $n = 700$ об/мин; (б) – $n = 800$ об/мин; (в) – $n = 900$ об/мин)

Figure 3. Graph of distribution of centrifugal velocity $v_{o.a.}$, (m/s) and force $F_{o.a.}$, (N) along the radius in the working tank:

(a) – $n = 700$ rpm; (б) – $n = 800$ rpm; (в) – $n = 900$ rpm)

Значения центробежной силы и скорости были распределены искусственно равномерно по углам, так как вращение механизма сбивания идёт с постоянной угловой скоростью. Это стандартный метод построения полярных графиков для равномерно вращающихся систем.

Угол поворота θ изменяется в пределах $\theta=0^\circ \rightarrow 360^\circ$ в зависимости от радиуса обрабатываемого объема и определяется следующим образом:

$$\theta = \frac{r}{R} 360^\circ, \quad (8)$$

где: r — текущий радиус обрабатываемого объема, $r=0 \rightarrow 0,18$ м; R — максимальный радиус обрабатываемого объема, $R=0,18$ м.

Пропорциональное распределение центробежной силы и скорости по радиусу обрабатываемого объема определяется следующим образом:

$$v(r) = v_{o.cp.} \frac{r}{R}. \quad (9)$$

$$F(r) = F_{o.cp.} \frac{r}{R}. \quad (10)$$

Центробежная скорость $v_{o.cp.}$ (м/с) и сила $F_{o.cp.}$ (Н) действующие на сливки, меняются линейно с радиусом емкости, поскольку они прямо пропорциональны ее радиусу:

$$v_{o.cp.} = \omega r. \quad (11)$$

$$F_{o.cp.} = m r \omega^2. \quad (12)$$

При вращении механизма сбивания сливки внутри емкости движутся по сложным траекториям, подвергаясь воздействию центробежных и гравитационных сил. При этом в углах поворота происходят следующие процессы:

- на углах 0° и 360° (верхняя точка — начальное и конечное положение) влияние гравитационной силы минимально, тогда как центробежная сила направлена радиально от центра к периферии ёмкости;
- на углах 90° и 270° (боковые точки соответственно на правом и левом радиусах окружности) центробежная сила действует горизонтально и сливки двигаются вдоль стенок рабочей емкости;
- на угле 180° (нижняя точка) центробежная и гравитационная силы взаимодействуют и происходит максимальное накопление массы сливок перед их выбросом вверх;
- на промежуточных углах ($45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$) происходит плавный переход влияния центробежной силы в разных секторах.

Такой подход позволяет сформировать целостную картину процесса, не перегружая описание излишними подробностями [15–17]. Это распределение вращательного движения механизма сбивания рассматривается как аналог анализа динамики потока вращательного движения жидкости в центрифуге [18].

Поскольку ленты механизма сбивания вращаются равномерно, центробежные параметры скорость $v_{o.cp.}$ (м/с) и сила $F_{o.cp.}$ (Н) равномерно распределяются в угловом диапазоне $\theta=270^\circ \rightarrow 360^\circ$, наибольшие значения которых наблюдаются в угловом диапазоне $\theta=180^\circ \rightarrow 270^\circ$ (нижний сектор вращения). Это обусловлено воздействием силы тяжести и динамической симметрией вращательного движения. В этом секторе совмещаются направлений действия двух векторов — ускорения свободного падения и центробежного ускорения, вследствие чего результирующая скорость и сила достигают максимума. Кроме того, в этом секторе возникает динамическая симметрия между вращением механизма сбивания и распределением массы обрабатываемой среды, что усиливает центростремительные и периферийные движения, стабилизируя траекторию и увеличивая эффективность сбивания. Здесь поток сливок вследствие турбулентности и взаимодействия с поверхностями лент механизма сбивания частично замедляется и затем вновь ускоряется, в результате чего движется по сложным траекториям. Это способствует увеличению площади контакта между фазами, усилению перемешивания и ускоренному разрушению жировых оболочек при сбивании, что имеет решающее значение для эффективности технологического процесса.

На основе графика распределения скорости $v_{o.cp.}$ (м/с) и силы $F_{o.cp.}$ (Н), (Рисунок 3), можно выделить три зоны внутри рабочей емкости:

- центральная зона ($r=0 \rightarrow 0,045$ м, малый радиус, $\theta=0^\circ \rightarrow 90^\circ$) — из-за слабого воздействия центробежной силы скорость вращения здесь минимальна, наблюдается формирование участков с практически нулевыми скоростями, способствующими образованию вихревых источников;
- средняя — промежуточная зона ($r=0,045 \rightarrow 0,135$ м, средний — промежуточный радиус, $\theta=90^\circ \rightarrow 270^\circ$) — здесь происходит ос-

новной круговой поток сливок, сопровождаемый локальными изменениями скорости в связи с особенностями геометрической формы ленты Мёбиуса;

- периферийная зона ($r=0,135 \rightarrow 0,180$ м, внешний радиус, $\theta=270^\circ \rightarrow 360^\circ$) при достижении пиковых значений центробежной силы и скорости вращения формируется неравномерный профиль скоростей по ширине ленты Мёбиуса. Под воздействием двух встречных потоков в этой зоне происходит активное образование масляных зерен.

По мере удаления от центра наблюдается увеличение центробежной скорости $v_{o.cp.}$ (м/с). Хотя в центральной зоне скорость остаётся на минимальном уровне, с ростом радиуса она постепенно увеличивается и достигает максимальных значений на периферии. Наивысшее значение центробежной скорости составляет $v_{o.cp.} = 12,5$ м/с при частоте вращения $n_3 = 900$ об/мин и ширине ленты $b_3 = 0,05$ м. Центробежная сила, возрастает с увеличением скорости, но снижается при уменьшении радиуса. Её максимальное значение $F_{o.cp.} = 1408,47$ Н наблюдается в периферийной зоне, где скорость достигает своего пикового значения (Рисунок 3в). Данный факт подтверждает квадратичную зависимость центробежной силы от радиуса, характерную для вращательных систем.

Путь, проходимый частицей сливок за один оборот, по мере удаления от центра к периферии увеличивается, так же увеличивается и её скорость. Соответственно, растёт и центробежная сила. Так, при $n_1 = 700$ об/мин и $b_2 = 0,04$ м в центральной зоне, ($r=0,0225$ м), первоначальный рост центробежной силы и скорости начинают увеличиваться до $v_{o.cp.} = 1,17$ м/с, $F_{o.cp.} = 102$ Н; в центре средней — промежуточной — зоны, ($r=0,09$ м), показатели доходят до $v_{o.cp.} = 4,675$ м/с, $F_{o.cp.} = 407,972$ Н, а в периферийной зоне, ($r=0,180$ м), они достигают своих максимальных значений $v_{o.cp.} = 9,35$ м/с, $F_{o.cp.} = 815,944$ Н. Таким образом, центробежные параметры увеличиваются с ростом радиуса, при этом наблюдается восьмикратный рост по сравнению с начальными значениями.

С увеличением центробежных параметров возрастает кинетическая энергия частиц сливок, а также давление, оказываемое на жировые шарики. В результате усиливается разрушение оболочек жировых шариков и наблюдается более интенсивное высвобождение жира, что и составляет основу процесса сбивания. Это обеспечивает равномерное перемешивание всего объема сливок и ускоряет слияние жировых шариков в крупные частицы. Таким образом, быстрее формируются масляные зерна с однородной структурой, сокращается время сбивания и увеличивается выход готового продукта.

На величины центробежных параметров существенное влияние оказывают как частота вращения механизма сбивания n (об/мин), так и ширина ленты b (м), (Рисунок 3). Увеличение данных параметров приводит к росту угловой скорости ω (рад/с), а также к расширению площади воздействия на сливки, что в свою очередь, вызывает рост скорости и силы. Эти изменения способствуют ускорению процесса сбивания и более эффективному высвобождению жира.

Так, например, при фиксированной ширине ленты $b_2 = 0,04$ м, увеличение частоты вращения механизма сбивания, приводит к возрастанию центробежной скорости в 1,1 → 1,3 раза, а центробежная сила увеличивается в 1,3 → 1,65 раза (квадратичная зависимость) на каждые 100 об/мин (Таблица 1, Рисунок 3).

При фиксированной частоте вращения $n_3 = 900$ об/мин и изменении ширины ленты, наблюдается рост центробежной скорости и силы в одинаковых пределах в 1,04 → 1,1 раза на каждые 0,01 м. Это указывает на сравнительно меньшую, но стабильную чувствительность параметров к ширине ленты при высоких оборотах (Таблица 2, Рисунок 3).

Таблица 1. Изменение центробежной скорости $v_{o.cp.}$ (м/с) и силы $F_{o.cp.}$ (Н), при $b_2 = 0,04$ м

Table 1. Change in centrifugal velocity $v_{o.a.}$ (m/s) and force $F_{o.a.}$ (N) at $b_2 = 0,04$ m

| Параметр | $n_1 = 700$ об/мин | $n_2 = 800$ об/мин | $n_3 = 900$ об/мин |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $v_{o.cp.}$ (м/с) | 1,17 → 9,35 | 1,335 → 10,68 | 1,5 → 12,02 |
| $F_{o.cp.}$ (Н) | 101,993 → 815,944 | 133,215 → 1065,72 | 168,6 → 1348,81 |

Таблица 2. Изменение центробежной скорости $v_{o.cp.}$ (м/с) и силы $F_{o.cp.}$ (Н) при $n_3 = 900$ об/мин

Table 2. Change in centrifugal velocity $v_{o.a.}$ (m/s) and force $F_{o.a.}$ (N) at $n_3 = 900$ rpm

| Параметр | $b_1 = 0,03$ м | $b_2 = 0,04$ м | $b_3 = 0,05$ м |
|------------------|-------------------|-----------------|------------------|
| $v_{o.a.}$ (м/с) | 1,44 → 11,55 | 1,5 → 12,02 | 1,56 → 12,5 |
| $F_{o.a.}$ (Н) | 161,345 → 1290,76 | 168,6 → 1348,81 | 176,06 → 1408,47 |

Как частота вращения механизма сбивания n (об/мин), так и ширина ленты b (м) оказывают заметное влияние на характеристики вихревого движения сливок в емкости, выражающиеся через центробежную скорость $v_{o,cr}$, (м/с) и силы $F_{o,cr}$, (Н). Это указывает на высокую чувствительность динамических параметров к частоте вращения, что позволяет эффективно управлять интенсивностью турбулентного перемешивания и воздействием на жировые шарики при сбивании. Хотя влияние ширины не столь выражено, как частоты вращения, увеличение b (м) способствует более широкому охвату контактной зоны и потенциальному расширению активных гидродинамических областей.

Таким образом увеличение частоты вращения обеспечивает более интенсивное вихревое движение и турбулентность, в то время как увеличение ширины ленты стабилизирует и расширяет зону контакта, улучшая условия коалесценции жировых шариков и образования масляного зерна.

3.2. Турбулентные потоки

Процесс превращения сливок в сливочное масло при механическом сбивании подразумевает образование интенсивных гидродинамических потоков, стимулирующих столкновения и коалесценцию жировых шариков, что приводит к формированию устойчивых масляных зерен. Механическое воздействие на эмульсию сопровождается фазовой инверсией и перераспределением скоростей и деформаций в потоке — это непосредственно влияет на агрегацию жировых глобул [19]. Теоретические модели фазовой инверсии и динамики структуры эмульсии позволяют понять, как механическое взбивание определяет интенсивность локальных потоков и эффективность объединения глобул [20]. Дальнейшие исследования мульти-масштабного моделирования показали взаимосвязь макро-структуры масла с микро-структурой глобул и динамикой потоков при сбивании [21]. Экспериментальные работы Lars W. с соавторами [22] и Buldo P. с соавторами [23] по микро-структуре и кристаллизации жиров подтверждают, что изменение условий сбивания, времени и вязкости системы существенно влияет на частоту контактов между глобулами и эффективность их коалесценции.

При перемешивании массы в емкости формируются интенсивные вихревые потоки, обусловленные действием центробежной скорости $v_{o,cr}$, (м/с) и центробежной силы $F_{o,cr}$, (Н). Эти потоки содержат зоны ускорения, турбулентности и стагнации, и в целом характеризуются высокой неустойчивостью [24,25]. Характер и направление потока в таких условиях определяется вектором скорости, состоящим из двух взаимно перпендикулярных составляющих: горизонтальной U (м/с), отражающей скорость и направление движения вдоль радиуса вращения, и вертикальной V (м/с), отражающей скорость и направление движения вверх или вниз [26–28]. Эти составляющие играют ключевую роль в гидродинамике процесса сбивания: колебания и вариации горизонтальной и вертикальной скоростей создают локальные зоны турбулентности и сдвиговых деформаций, усиливая интенсивность столкновений жировых глобул. В результате ускоряются коалесценция и формирование устойчивых масляных зерен, так как турбулентные вихри способствуют перемешиванию, увеличению контакта между жировыми частицами и их агрегированию.

Если горизонтальная составляющая $U > 0$, то масса движется от центра вправо и, обозначается как «+ U ». Если же $U < 0$, движение массы направлено влево — к центру, то есть против радиального направления и обозначается как «- U ».

Если вертикальная составляющая $V > 0$, то масса движется вверх и ее значение обозначается как «+ V ». Если же $V < 0$, то движение массы направлено вниз — к дну емкости, и обозначается как «- V ». Наличие знаков «+» и «-» перед значениями компонентов скорости позволяет определить структуру вихревого потока.

Если одновременно $U < 0$ и $V > 0$, то масса перемещается по восходящей диагонали к центру — это указывает на восходящий закрученный и свернутый поток.

Если одновременно $U > 0$ и $V < 0$, то движение массы направлено от центра по нисходящей дуге — это свидетельствует о спиралевидной структуре потока.

С целью изучения направления и свойств вихревого потока, создаваемого механизмом сбивания, в форме двойной ленты Мёбиуса (Рисунок 1), определяются значения составляющих вектора скорости потока при различных режимах работы. На этих значениях построены графики, отражающие движения составляющих вектора скорости вихревого потока (Рисунок 4). Зная, при каких частотах вращения n (об/мин) и ширине лент b (м), составляющие вектора скорости достигают наибольших значений, возможно определить оптималь-

ные конструктивные параметры, обеспечивающие более интенсивное перемешивание, а также выявить области ускорения вихревого движения и застойные зоны.

Формирование вихревого потока обусловлено следующими факторами:

- центробежная динамика — стремление сливок под действием инерционных сил к перемещению в области окружностей, в которых происходит круговое течение;
 - турбулентность и сдвиг — наличие пересекающихся слоёв, сопровождающееся появлением горизонтальной (U) и вертикальной (V) составляющих скорости;
 - периодические колебания — циклический характер изменения угла ($0 \rightarrow 360^\circ$), вызывающий чередование знаков («+» и «-») горизонтальной и вертикальной составляющих вектора скорости.
- При всех параметрах, ($n = 700 \rightarrow 900$ об/мин и $b = 0,03 \rightarrow 0,05$ м), механизма сбивания горизонтальная (U) и вертикальной (V) составляющие вектора скорости изменяются по синусоиду, что обусловлено геометрической формой ленты Мёбиуса. С увеличением частоты вращения механизма сбивания и ширины ленты Мёбиуса траектория потока удлинняется, а вихревое течение становится более обширным и интенсивным (Рисунок 4).

Верхние пределы значений обеих составляющих наблюдались в следующих точках:

- для горизонтальной составляющей U — в точке, расположенной на самом конце периферийной зоны при $r = 0,180$ м; $\theta = 360^\circ$, что соответствует завершению полного оборота;
- для вертикальной составляющей V — в точке, расположенной в начале периферийной зоны на левом радиусе вращения при $r = 0,135$ м; $\theta = 270^\circ$.

Нижние пределы ($0 \rightarrow 1$ м/с) обеих составляющих наблюдались в следующих точках:

- для горизонтальной составляющей U — в центральной зоне, начиная от точки с координатами $r = 0,0 \rightarrow 0,045$ м; $\theta = 0^\circ \rightarrow 90^\circ$, расположенной в начальной позиции по правому радиусу вращения, а также в точке с координатами $r = 0,135$ м; $\theta = 270^\circ$, находящейся в начале периферийной зоны по левому радиусу вращения;
- для вертикальной составляющей V — в центральной зоне при $r = 0,0 \rightarrow 0,0225$ м; $\theta = 0^\circ \rightarrow 45^\circ$ (начальная позиция оборота), в средней — переходной зоне при $r = 0,09$ м; $\theta = 180^\circ$ (нижняя точка окружности), а также в точке $r = 0,180$ м; $\theta = 360^\circ$ на завершении полного оборота, что соответствует концу периферийной зоны.

Таким образом горизонтальная составляющая вектора скорости достигает своих максимальных показателей на периферии, минимальных в центре, в то время как вертикальная составляющая V ($r < 0,045$ м) имеет сложное пространственное распределение с экстремумами в специфических точках. При таких обстоятельствах в центральной зоне доминирует ламинарный режим, а в периферийной зоне ($r > 0,135$ м) развивается турбулентность.

Направление горизонтальной составляющей изначально ориентировано от центра к стенке емкости (вправо) и на графическом изображении обозначается как «+ U » по положительному направлению оси. Это наблюдается по всей центральной зоне ($r = 0 \rightarrow 0,045$ м, малый радиус, $\theta = 0 \rightarrow 90^\circ$). В данной области, вследствие слабого влияния центробежной силы, центробежная скорость имеет низкие значения, и эта зона считается областью нулевых скоростей, где формируются источники вихреобразования.

При частотах вращения рабочего механизма $n = 700 \rightarrow 800$ об/мин значение горизонтальной составляющей U в центральной зоне составляет $0 \leq U < 1$, тогда как при $n_3 = 900$ об/мин в центральной точке этой зоны ($r = 0,0225$ м; $\theta = 45^\circ$) уже наблюдается значение $U \geq 1$. Увеличение горизонтальной составляющей U в центральной области происходит в направлении к её геометрическому центру ($r = 0,0225$ м) и в переходной угловой зоне $\theta = 45^\circ$, где влияние центробежной силы начинает мягко распространяться на соседние области. После этого наблюдается повторное снижение значения скорости. Эта зона характеризуется как область прироста скорости и представляет собой статический круговой поток, охватывающий центральную часть, внешнюю поверхность вихревого (турбулентного) потока, а также всю поверхность механизма сбивания (Рисунок 4).

Значение горизонтальной составляющей U в средней зоне ($r = 0,045 \rightarrow 0,135$ м, средний радиус, $\theta = 90 \rightarrow 270^\circ$) приобретает качества параболоида и направлено к центру (влево), что на графическом изображении обозначается как «- U » по отрицательному направлению оси. В этой области, на фоне увеличения окружной скорости, происходит основная циркуляция сливок, при этом вследствие геометрических особенностей формы ленты Мёбиуса наблюдаются локальные изменения скорости. Так, вплоть до центральной точки

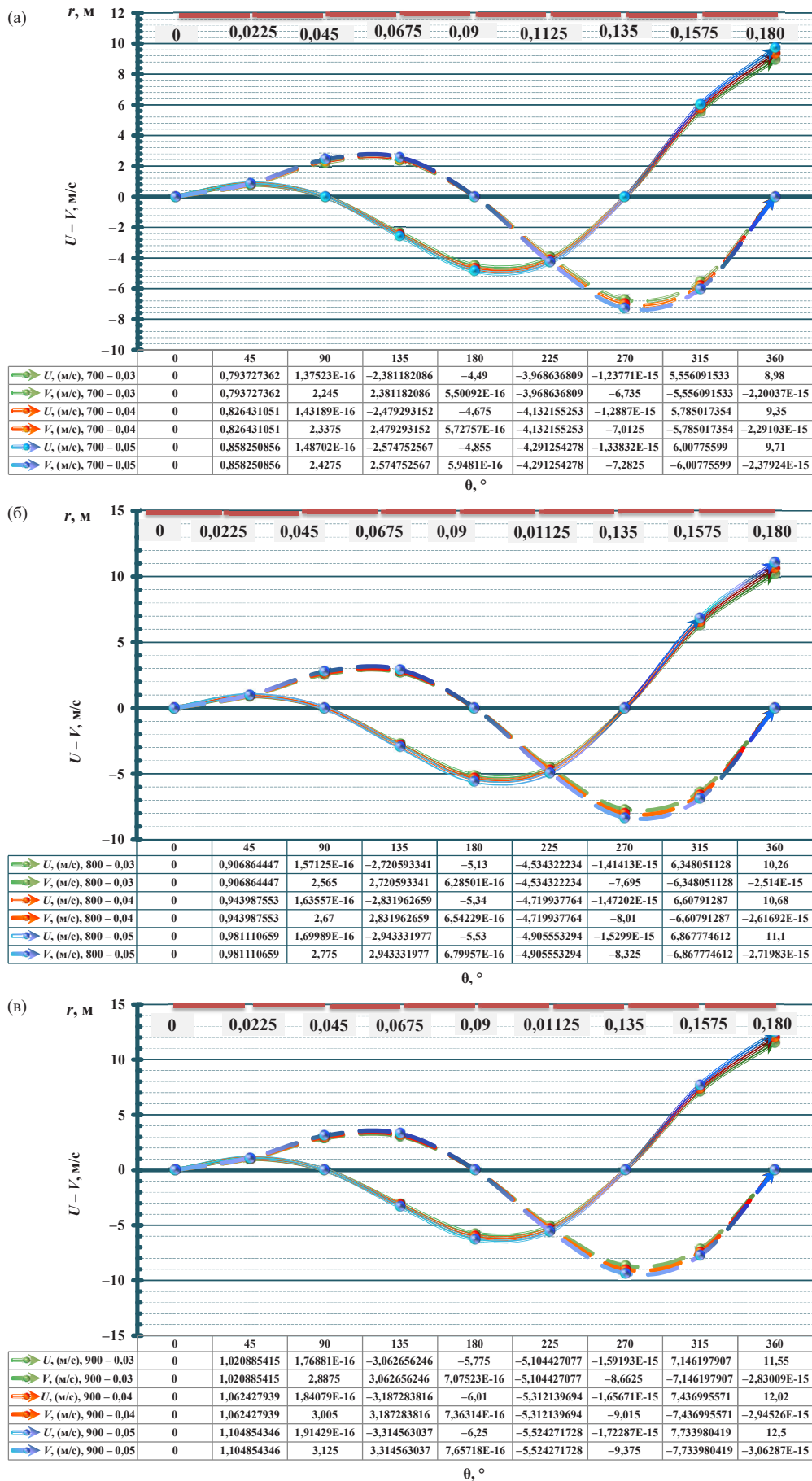


Рисунок 4. Характер движения горизонтальной (U) и вертикальной (V) составляющих вектора скорости вихревого потока сливок в емкости в зависимости от n (об/мин) и b (м): (а) $n_1 = 700$ об/мин; (б) $n_2 = 800$ об/мин; (в) $n_3 = 900$ об/мин)
 Figure 4. Flow characteristics of the horizontal (U) and vertical (V) components of the velocity vector of the cream's vortex motion in the container depending on n (rpm) and b (m): а) $n_1 = 700$ rpm; б) $n_2 = 800$ rpm; в) $n_3 = 900$ rpm)

зоны ($r=0,09$ м, $\theta=180^\circ$), поток направлен к центру емкости с нарастающей скоростью, после чего происходит снижение скорости до значений, приближающихся к нулю, на самом конце средней зоны. Эта область считается зоной перехода к типу динамического кругового потока с нарастающей окружной скоростью. Здесь также происходит изменение направления движения потока за счёт слияния встречных потоков, что вызывает резкие колебания скорости — как падение, так и последующий подъём. После смены направления (вправо — от центра к стенкам емкости и к ее дну), на графике оно вновь обозначается как «+U» по положительному направлению оси, поток входит в периферийную зону ($r=0,135 \rightarrow 0,180$ м, внешний радиус, $\theta=270 \rightarrow 360^\circ$), где достигается максимум центробежной силы и наблюдается интенсивное взаимодействие двух встречных потоков. В результате этого вдоль ширины ленты Мёбиуса формируется неравномерный профиль скоростей. Эта зона определяется как область динамического кругового потока, где горизонтальная составляющая U резко возрастает и достигает своего максимального значения в конце периферийной зоны ($r=0,180$ м, $\theta=360^\circ$). Здесь поток с ударом сталкивается со стенками емкости. Данная область характеризуется наибольшим градиентом скорости и является зоной формирования устойчивых вихревых полос и центров зарождения масляных зёрен, а также рассматривается как пограничный подслои (Рисунок 4).

Направление вертикальной составляющей вектора скорости V изначально ориентировано вверх, что на графическом изображении обозначается как «+V» по отрицательному направлению оси. В данном направлении увеличение скорости происходит сначала в центральной зоне ($r=0 \rightarrow 0,045$ м, малый радиус, $\theta=0 \rightarrow 90^\circ$), где влияние центробежной силы слабо выражено и формируются источники вихрей. Рост продолжается до центральной части средней зоны ($r=0,045 \rightarrow 0,135$ м, средний радиус, $\theta=90 \rightarrow 270^\circ$), где под влиянием увеличивающейся окружной скорости и геометрических особенностей формы ленты Мёбиуса наблюдаются локальные изменения скорости. В этой области поток плавно переходит от стационарного кругового потока к динамическому. Увеличение вертикальной составляющей V продолжается вплоть до точки с координатами $r=0,0675$ м, $\theta=135^\circ$, где достигается её максимальное значение в результате мягкого перехода воздействия центробежной силы на разные зоны емкости. После этого, в центральной точке переходной зоны — в нижней точке окружности ($r=0,09$ м, $\theta=180^\circ$), происходит снижение скорости до значений, приближающихся к нулю. В этой точке, из-за слияния потоков, происходит смена направления движения, что вызывает одновременно резкое падение и последующий подъём скорости (Рисунок 4).

Вертикальная составляющая вектора скорости V от центральной точки средней зоны ($r=0,09$ м, $\theta=180^\circ$) до конца периферийной зоны ($r=0,135 \rightarrow 0,180$ м, внешний радиус, $\theta=270 \rightarrow 360^\circ$) приобретает форму параболоида и направляется вниз, к дну емкости. На графическом изображении это обозначается как «-V» по отрицательному направлению оси. В данном направлении вертикальная составляющая V достигает своего наивысшего значения в начале периферийной зоны — в точке, расположенной на левом радиусе вращения ($r=0,135$ м, $\theta=270^\circ$). Затем она снижается до значений, приближающихся к нулю, в точке завершения полного оборота ($r=0,180$ м, $\theta=360^\circ$) в конце периферийной зоны (Рисунок 4).

Резкие колебания в значениях вертикальной составляющей V при направленном вверх и вниз потоке обусловлены следующим факторами:

- в первом случае — взаимодействием на границе между центральной зоной ($r=0 \rightarrow 0,045$ м, малый радиус, $\theta=0 \rightarrow 90^\circ$), где происходит формирование вихревых источников при нулевых скоростях, и средней зоной ($r=0,045 \rightarrow 0,135$ м, средний радиус, $\theta=90 \rightarrow 270^\circ$), где реализуется основная циркуляция с увеличивающейся окружной скоростью;
- во втором случае — взаимодействием на границе между средней зоной ($r=0,045 \rightarrow 0,135$ м, средний радиус, $\theta=90 \rightarrow 270^\circ$), где

также наблюдается основная циркуляция и периферийной зоной ($r=0,135 \rightarrow 0,180$ м, внешний радиус, $\theta=270 \rightarrow 360^\circ$), в которой центробежная скорость и сила достигают своего пикового значения. В обоих случаях причиной колебаний является взаимное влияние двух потоков, направленных навстречу друг другу.

При всех параметрах рабочего механизма ($n=700 \rightarrow 900$ об/мин, $b=0,03 \rightarrow 0,04$ м), выполнение условий $U>0$, $V>0$ и $V>U$ в центральной зоне ($r=0 \rightarrow 0,045$ м, малый радиус, $\theta=0 \rightarrow 90^\circ$) указывает на более быстрое прямолинейное движение потока снизу вверх и от центра к стенкам емкости. Изменение направления вектора скорости в сторону $U<0$ и $V>0$ в направлении к центру средней зоны ($r=0,045 \rightarrow 0,135$ м, средний радиус, $\theta=90 \rightarrow 270^\circ$) указывает на восходящее диагональное движение потока, закрученного по направлению к центру. В промежутке от центра до конца средней зоны ($r=0,045 \rightarrow 0,135$ м, $\theta=90 \rightarrow 270^\circ$) наблюдаются условия $U<0$, $V<0$ и $V>U$, что свидетельствует о более интенсивном движении потока сверху вниз и к центру. В конце периферийной зоны ($r=0,135 \rightarrow 0,180$ м, внешний радиус, $\theta=270 \rightarrow 360^\circ$) условия $U>0$ и $V<0$ отражают нисходящее дугообразное движение потока от центра к стенкам, что является элементом спиралевидного потока.

4. Выводы

Таким образом, теоретические исследования, направленные на изучение гидродинамики процесса взбивания сливок в аппарате с рабочим органом типа ленты Мёбиуса позволили сделать следующие выводы:

1. За счёт наивысшей частоты вращения рабочего механизма $n_3=900$ об/мин и ширины ленты $b_3=0,05$ м достигаются максимальные значения центробежной скорости $v_{o,cr.}=12,5$ м/с и центробежной силы $F_{o,cr.}=1408,5$ Н, что позволит обеспечить более быстрый и эффективный процесс сбивания;
2. При минимальной частоте вращения рабочего механизма $n_1=700$ об/мин и ширине ленты $b_1=0,03$ м достигаются наименьшие значения центробежной скорости $v_{o,cr.}=8,98$ м/с и силы $F_{o,cr.}=708,8$ Н, что соответствует режиму сбивания с пониженной интенсивностью гидродинамического воздействия;
3. При средней частоте вращения рабочего механизма $n_2=800$ об/мин и ширине ленты $b_2=0,04$ м достигаются средние значения центробежной скорости $v_{o,cr.}=12,5$ м/с и силы $F_{o,cr.}=1065,72$ Н, что обеспечивает равномерное распределение гидродинамического воздействия на перерабатываемый продукт и повышение интенсивности сбивания без формирования локальных зон чрезмерного воздействия;
4. Изучение движения горизонтальной (U) и вертикальной (V) составляющих вектора скорости показало, что при всех параметрах рабочего механизма ($n=700 \rightarrow 900$ об/мин, $b=0,03 \rightarrow 0,05$ м) они достигают своих максимальных значений в периферийной зоне, что указывает на наличие интенсивной циркуляции и рециркуляции вдоль внешнего контура рабочей емкости;
5. Изменения количественных показателей, составляющих вектора скорости их траекторий движения, чередование положительных и отрицательных значений указывают на наличие встречных (обратных) потоков, которые будут способствовать более эффективному перемешиванию жировых шариков и разрушению их оболочек. Это обеспечит интенсификацию перемешивания жировых шариков и усиление механического воздействия на их оболочки, обеспечивая вовлечение всего объёма обрабатываемой массы в процесс гидродинамического взаимодействия и тем самым ускоряя процесс сбивания;
6. Повышение частоты вращения обеспечивает более интенсивное вихревое движение и турбулентность, в то время как увеличение ширины ленты позволит стабилизировать и расширить зону контакта, улучшая условия коалесценции жировых шариков и образования масляного зерна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК/REFERENCES

1. Кулиев, З. В., Якубов, К. Г., Алиев, Э. М. (2024). Влияние параметров сбивания на некоторые свойства пахты и масла, получаемого из йогурта. *Молочнохозяйственный вестник*, 3(55), 156–171. [Kuliev, Z.V., Yakubov, K. G., Aliev, E. M. (2024). Effect of churning parameters on certain properties of buttermilk and butter developed from yogurt. *Molochnokhozaystvenny Vestnik*, 3(55), 156–171. (In Russian)] https://doi.org/10.52231/2225-4269_2024_3_156
2. Арсеньева, Т. П. (2013). Технология сливочного масла. СПб.: НИУИТМО; ИХиБТ, 2013. [Arsenieva, T. P. (2013). *Butter technology*. St. Petersburg: National Research University; Institute of Refrigeration and Biotechnology, 2013. (In Russian)]
3. Гораев, О. К., Караева, З. А., Кадиева, Т. А., Моргоева, Д. Г. (2024). Технология молока и молочных продуктов. СПб.: Лань, 2024. [Gogaev, O. K., Karaeva, Z. A., Kadieva, T. A., Morgoeva, D. G. (2024). *Technology of milk and dairy products*. St. Petersburg: Lan, 2024. (In Russian)]

4. Бирюкова, Е. А., Лазуткина, С. А. (7–8 февраля, 2017). Анализ существующих положений теорий сбивания сливок и образования масляного зерна. Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: материалы VIII Международной научно-практической конференции. Ульяновск: УГС-ХА им. П. А. Столыпина, 2017. [Biryukova, E. A., Lazutkina, S. A. (February 7–8, 2017). *Analysis of existing provisions of the theories of cream churning and butter grain formation*. Agrarian science and education at the modern stage of the development: Experience, problems and ways of their solution: Proceedings of the 8th International scientific-practical conference. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Agricultural Academy named after P. A. Stolypin, 2017. (In Russian)]
5. Твердохлеб, Г. В., Сажинов, Г. Ю., Раманаускас, Р. И. (2006). Технология молока и молочных продуктов. М.: ДеЛи принт, 2006. [Tverdokhle, G. V., Sazhinov, G. Yu., Ramanauskas, R. I. (2006). *Technology of milk and dairy products*. Moscow: DeLi print, 2006. (In Russian)]
6. Яшин, А. В., Полювянный, Ю. В. (2019). Результаты лабораторных исследований маслоизготовителя с гибким виброприводом. *Нива Поволжья*, (3(52)), 177–183. [Yashin, A. V., Polyvyany, Yu. V. (2019). The results of laboratory studies of the butter maker with a flexible vibration drive. *Niva Povolzhya*, (3(52)), 177–183. (In Russian)]
7. Yashin, A., Polyvyannii, Y. (2020). Results of research on justification of the device for producing ecologically pure butter. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, 63(1), 632–636.
8. Aljaafreh, A., Al-Tahiri, R., Abadleh, A., Mansour, A. M., Alaqtash, M. (2019). Design and development of an automated and quality controlled system for traditional butter and ghee production. *Wseas Transactions on Environment and Development*, 15, 478–484.
9. Kalla, A. M., Sahu, C., Agrawal, A. K., Bisen, P., Chavhan, B. B., Sinha, G. (2016). Development and performance evaluation of frustum cone shaped churn for small scale production of butter. *Journal of Food Science and Technology*, 53(5), 2219–2226. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2110-y>
10. Лазуткина, С. А., Миннибаев, М. Р. (20–21 июня, 2018). Маслоизготовитель периодического действия. Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы IX Международной научно-практической конференции, посвященной 75-летию Ульяновского государственного аграрного университета имени П. А. Столыпина. Ульяновск: УлГАУ, 2018. [Lazutkina, S. A., Minnibaev, M. R. (June 20–21, 2018). *Batchoil-manufacturer*. Agrarian science and education at the modern stage of the development: Experience, problems and ways of their solution: Proceedings of the 9th International scientific-practical conference dedicated to the 75th anniversary of the Ulyanovsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Agrarian University, 2018. (In Russian)]
11. Ebrahimi, M., Khoshnam, F., Kamandar, M. R., Namjoo, M. (2024). Development and performance evaluation of machine-type reciprocating churning. *Biomechanism and Bioenergy Research*, 3(2), 108–116. <https://doi.org/10.22103/BBR.2024.22972.1080>
12. Wang, M., Lu, J., Li, Z., Gu, F., Chen, Z. (2023). Study on the unsteady characteristics and radial force of a single-channel centrifugal pump. *ACS Omega*, 8(2), 2291–2305. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06614>
13. Cao, W., Mao, J., Li, W. (2020). Analysis of unsteady pressure fluctuation in a semi-open cutting pump. *Energies*, 13(14), Article 3657. <https://doi.org/10.3390/en13143657>
14. Kang, Y., Liu, S., Zou, W., Hu, X. (2019). Numerical investigation on pressure pulsation characteristics and radial force of a deep-sea electric lifting pump at off-design conditions. *Shock and Vibration*, 2019(1), Article 4707039. <https://doi.org/10.1155/2019/4707039>
15. Diehl, E. (2021). Non-rectangular coordinate systems: Polar coordinates. Chapter in a book: *The Engineering Dynamics Course Companion, Part 1: Particles*. Synthesis Lectures on Mechanical Engineering, Springer, Cham, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-031-79677-7_6
16. Lee, G., Kim, W. (2024). Image processing in L^1 -norm-based discrete Cartesian and polar coordinates. *Electronics*, 13, Article 1088. <http://doi.org/10.3390/electronics1301088>
17. Zhu, J., Wang, Y., Gao, F., Zhang, Z. (2023). Optical differentiation in a polar coordinate system. *Applied Physics Letters*, 122(9), Article 091107. <https://doi.org/10.1063/5.0140272>
18. Walstra, P., Wouters, J. T. M., Geurts, T. J. (2005). Centrifugation. Chapter in a book: *Dairy science and technology*. CRC Press, 2005.
19. Panchal, B., Truong, T., Prakash, S., Bansal, N., Bhandari, B. (2021). Influence of emulsifiers and dairy ingredients on manufacturing, microstructure, and physical properties of butter. *Foods*, 10(5), Article 1140. <https://doi.org/10.3390/foods10051140>
20. Nozawa, E., Deguchi, T. (2025). Simulating phase inversion processes by coupled map lattice: Towards the theoretical design of food texture and quality in dairy processing from fresh cream to butter via whipped cream. *Journal of Chemical Physics*, 162, Article 064902. <https://doi.org/10.1063/5.0251375>
21. Nozawa, E. (2026). Theoretical relationship between the macro texture and micro structure in dairy processing revealed by the multi scale simulation of coupled map lattice. *arXiv*, 1, Article 15051. <https://arxiv.org/abs/2601.15051>
22. Lars, W., De Graef, V., Rasmussen, M., Dewettinck, K. (2009). Relations between crystallisation mechanism and microstructure of milk fat. *International Dairy Journal*, 19(8), 424–430. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2009.03.003>
23. Buldo, P., Kirkensgaard, J. J. K., Wiking, L. (2013). Crystallization mechanisms in cream during ripening and initial butter churning. *Journal of Dairy Science*, 96(11), 6782–6791. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6066>
24. Бронштейн, И. Н., Семендяев, К. А. (1986). Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1986. [Bronstein, I. N., Semendyayev, K. A. (1986). *Handbook of mathematics for engineers and students of technical universities*. Moscow: Nauka, 1986. (In Russian)]
26. Serway, R. A., Jewett, J. W. (2018). *Physics for scientists and engineers with Modern Physics* (10th ed.). Cengage Learning, 2018.
27. Hibbeler, R. C. (2016). *Engineering mechanics: Dynamics* (14th ed.). Pearson, 2015.
28. Ландау, Л. Д., Лифшиц, Е. М. (1988). Теоретическая физика: Том 1. Механика. М.: Наука, 1988. [Landau, L. D., Lifshitz, E. M. (1988). *Theoretical physics: Volume 1. Mechanics*. Moscow: Nauka, 1988. (In Russian)]

| СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | AUTHOR INFORMATION |
|---|---|
| Принадлежность к организации | Affiliation |
| <p>Кулиев Закир Вагиф Оглы — заведующий лабораторией «Механизация и автоматизация технологических процессов в животноводстве», Научно-исследовательский институт «Агромеханика» Азербайджан, Гянджа, пр. Азиз Алиев, 93 E-mail: vaqifizz@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6090-1853 * автор для контактов</p> | <p>Zakir V. Guliev, Head of the Laboratory for «Mechanization and Automation of Technological Processes in Animal Husbandry», «Agromechanics» Research Institute 93, Aziz Aliyev Ave., Ganja, Azerbaijan E-mail: vaqifizz@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6090-1853 * corresponding author</p> |
| <p>Якубов Камал Гаджи Оглы, — кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, лаборатория «Механизация и автоматизация технологических процессов в животноводстве», Научно-исследовательский институт «Агромеханика» Азербайджан, Гянджа, пр. Азиз Алиев, 93 E-mail: yaqubov.k@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0009-0005-1426-5581</p> | <p>Kamal H. Yakubov, Candidate of Technical Sciences, Docent, Leading Researcher, Laboratory for «Mechanization and Automation of Technological Processes in Animal Husbandry», «Agromechanics» Research Institute 93, Aziz Aliyev Ave., Ganja, Azerbaijan E-mail: yaqubov.k@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0009-0005-1426-5581</p> |
| <p>Алиев Эльман Мухтар Оглы, старший научный сотрудник, лаборатория «Механизация и автоматизация технологических процессов в животноводстве», Научно-исследовательский институт «Агромеханика» Азербайджан, Гянджа, пр. Азиз Алиев, 93 E-mail: bozhan@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5371-2667</p> | <p>Elman M. Aliev, Senior Researcher, Laboratory for «Mechanization and Automation of Technological Processes in Animal Husbandry», «Agromechanics» Research Institute 93, Aziz Aliyev Ave., Ganja, Azerbaijan E-mail: bozhan@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5371-2667</p> |
| Критерии авторства | Contribution |
| <p>Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.</p> | <p>Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.</p> |
| Конфликт интересов | Conflict of interest |
| <p>Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.</p> | <p>The authors declare no conflict of interest.</p> |