

Рисунок 4. Схема подключения БК в узле нагрузки:
а – принципиальная схема; б – схема замещения

Достаточно эффективным средством повышения устойчивости нагрузки в данном случае может оказаться форсировка возбуждения на синхронных машинах переменного тока в данном узле (двигателях, генераторах, компенсаторах), форсировка выдачи мощности БК или автоматическая разгрузка узла нагрузки по напряжению [7].

Список литературы:

1. Минин Г.П. Реактивная мощность. Москва: Энергия. 1978. – 88 с.
2. Федоров А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий. Учебник для вузов. – Москва: Энергоатомиздат. 1984. – 472 с.
3. Тимофеев А.С. Компенсация реактивной мощности. Учебное пособие. – Новокузнецк: СибГИУ. 2010. – 67 с.
4. Карпов В.М. Электроснабжение промышленных предприятий. – Улан-Удэ: ВСГТУ. 2001. – 51 с.
5. Кабышев А.В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий. – Томск: Томский политехнический университет. 2012. – 234 с.
6. Коновалов Л.Л. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
7. Белявский Р.В. Вопросы компенсации реактивной мощности. – Кемерово: КГТУ. 2011. – 132 с.

ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТРУЙНОГО ГОМОГЕНИЗАТОРА МОЛОКА

Самойчук Кирилл Олегович

канд. техн. наук, доцент Таврического государственного агротехнологического университета, Украина, г. Мелитополь

Ковалёв Александр Александрович

аспирант Таврического государственного агротехнологического университета, Украина, г. Мелитополь

Палянычка Надежда Александровна

канд. техн. наук, старший преподаватель Таврического государственного агротехнологического университета, Украина, г. Мелитополь

GROUND OF BASIC PARAMETERS OF STREAM HOMOGENIZER OF MILK WITH SEPARATE CREAM DELIVERY

Samoichuk Kirill

candidate of Science, associate professor of the Tavria state agrotechnological university, Ukraine, Melitopol

Kovalyov Aleksandr

graduate student of the Tavria state agrotechnological university, Ukraine, Melitopol

Palyanichka Nadiya

candidate of Science, assistant professor of the Tavria state agrotechnological university, Ukraine, Melitopol

АННОТАЦИЯ

В работе показана конструкция и принцип действия гомогенизатора молока с отдельной подачей жировой фазы через щелевые каналы. Определены зависимости, связывающие основные конструктивные и технологические показатели работы струйного гомогенизатора: размеров жировых шариков после гомогенизации, давлений, скоростей и расходов потоков, наименьшего диаметра конфузора и ширины щели подачи сливок, производительности и энергозатрат, являющиеся основой для его проектирования.

ABSTRACT

The construction and principle of operation of homogenizer of milk with the separate delivery of fatty phase through parallel-plate ducts are shown in the work. Dependences are defined that relate the basic structural and technological indexes of operation of stream homogenizer: sizes of fat globules after homogenization, pressures, velocities and charges of streams, the minimal diameter of confusor and width of duct of cream delivery, productivity and power inputs, being the basis for its design.

Ключевые слова: гомогенизация; молоко; струйный гомогенизатор; раздельная гомогенизация; эффективность.

Keywords: homogenization; milk; stream homogenizer; separate homogenization; efficiency.

Диспергирование и гомогенизация широко применяются в производстве кисломолочных и цельномолочных продуктов, мороженого, майонеза, кремов, продуктов с биологически активными добавками и многих других, однако требует высоких энергозатрат (для клапанных гомогенизаторов более 7 кДж/т). Принимая во внимание очевидную актуальность проблемы снижения энергоёмкости этого процесса в молочной промышленности, разработан широкий ряд аппаратов для гомогенизации, такие как клапанные, пульсационные, вакуумные, струйные, ультразвуковые, роторные и др. Однако ни один из них не совмещает в себе высокую степень измельчения жировых шариков молока (как например в клапанных) с невысокой энергоёмкостью [1 С.8]. Одним из действенных способов снижения энергозатрат на гомогенизацию является использование раздельной гомогенизации, то есть предварительное разделение цельного молока на сливки и обезжиренное молоко и проведение диспергирования только для жировой фазы. Снижение энергозатрат при этом достигается за счёт значительного уменьшения объёма продукта, который подвергается обработке. Однако основным способом повысить эффективность гомогенизации остаётся организация оптимальных гидродинамических параметров в зоне диспергирования. Задача нахождения таких условий осложнена неопределённостью в теориях гомогенизации, которых на сегодняшний день более 5 [1 с.69, 2 с. 20]. Среди них выделяется теории диспергирования, базирующиеся на критерии Вебера [1 с. 85, 3 с. 208, 4 с. 10]. Для различных чисел критерия подробно описаны формы деформации и виды разрушения частиц в потоке воздуха [5 с. 68]. Перенос этих зависимостей на диспергирование жировых частиц в потоке молочной плазмы осложняется несколькими факторами. Во-первых, плотности молочного жира и плазмы отличаются лишь на 20%, тогда как плотности воды и воздуха – более чем в 800 раз, в связи с чем создать

достаточно большую разницу скоростей между жировым шариком и плазмой проблематично. Во-вторых, наблюдение за деформацией и разрушением жировой частицы сложно осуществить из-за высоких скоростей её движения (более 100 м/с) и микроскопических размеров (1-3 мкм). В-третьих, физические зависимости микромира моделировать намного сложнее: большую роль играют физические свойства оболочки жирового шарика, которая имеет сложную структуру и препятствует его разрушению.

Создание условий повышения эффективности гомогенизации за счёт раздельной обработки жировой фазы и создания максимальной разницы скоростей фаз (которая является определяющей для разрушения частицы согласно критерия Вебера) сочетается в струйном гомогенизаторе с раздельной подачей жировой фазы [6 С. 243]. Принцип его работы заключается в создании высокоскоростного потока обезжиренного молока и ввода в него по тонким каналам сливок, предварительно выделенных из молока. Качество гомогенизации зависит от диаметра каналов подачи сливок, которые нужно делать как можно меньше, что вызывает ухудшение его производственных характеристик вследствие облитерации и снижения производительности. Повысить эффективность работы такой конструкции можно, используя вместо каналов подачи жировой фазы – тонкие щели по окружности узкой части конфузора. Щелевые каналы легко выполнить малой толщины и сделать её регулируемой по аналогии с седлом и клапаном клапанного гомогенизатора. При этом повысится качество диспергирования и появится возможность к увеличению производительности, т.к. площадь щели гораздо больше площади каналов подачи жировой фазы.

Гомогенизатор состоит из рабочей камеры в виде расширяющегося сопла 2 с патрубком подачи обезжиренного молока 1 (конфузорная часть), щелевого канала шириной h , расположенного за узкой частью сопла, диаметром d и выходной камеры 5 в виде диффузора (рисунок 1).

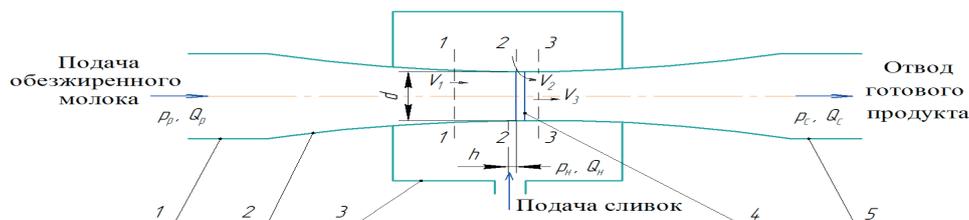


Рисунок 1. Схема струйного гомогенизатора с раздельной подачей жировой фазы и щелевыми каналами: 1 – патрубок подачи обезжиренного молока (конфузор); 2 – рабочая камера (расширяющееся сопло); 3 – камера сливок; 4 – щелевой канал подачи сливок; 5 – выходная камера (диффузор). 1-1, 2-2, 3-3 – характерные сечения.

В камере 3 под атмосферным давлением находятся сливки (жировая фаза молока). Часть расширяющегося сопла от щелевого канала до выходной камеры представляет собой камеру смешения сливок с обезжиренным молоком. Принцип действия схож с гидроструйным насосом. В центральной части камеры поток обезжиренного молока вследствие сужения приобретает высокую скорость. Давление при этом падает ниже атмосферного и через щелевой канал происходит подсасывание сливок (рисунок 2). В момент их вхождения в скоростной поток обезжиренного молока v_1 возникает разница скоростей между жировой фазой и этим потоком, достаточная для деформации и разрушения жировых шариков – происходит диспергирование. В камере смешения достигается перемешивание диспергированной жировой фазы до однородной высокодисперсной гомогенной эмульсии.

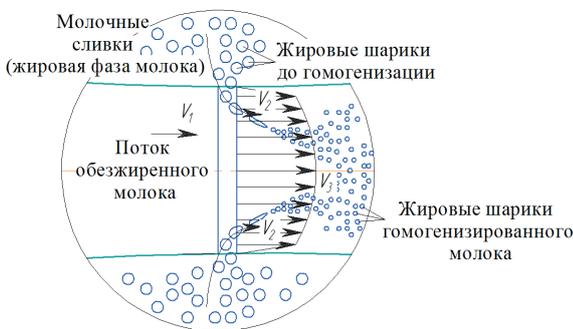


Рисунок 2. Схема гомогенизации молока в струйном гомогенизаторе

Определяющим фактором для гомогенизации является достижение значения критерия Вебера We большего, чем критическое We_c

$$We = \frac{\rho_o \cdot \Delta v^2 \cdot D_k}{\sigma_{ж-н}} \geq We_c, \tag{1}$$

ρ_o – плотность обезжиренного молока, кг/м³;
 Δv – разность скоростей между жировым шариком и плазмой (скорость скольжения жирового шарика), м/с;

D_e – максимальный размер жировой частицы, устойчивой в данном потоке, м;

$\sigma_{ж-н}$ – поверхностное натяжение жирового шарика на границе с плазмой молока, Н/м.

При вводе жировой фазы перпендикулярно потоку обезжиренного молока разница скоростей фаз приблизительно будет равна скорости потока обезжиренного молока в центральной части камеры v_1 , м/с

$$v_1 \approx v_{1cp} = \frac{4Q_p}{\pi d^2}, \tag{2}$$

v_{1cp} – средняя скорость обезжиренного молока в центральной части камеры, м/с;

Q_o – подача обезжиренного молока, м³/с;

d – диаметр камеры в узкой её части, м.

Таким образом, необходимая скорость в центре камеры для диспергирования молочной эмульсии

$$v_1 \geq \sqrt{\frac{\sigma_{ж-н} \cdot We_c}{\rho_o \cdot D_k}}. \tag{3}$$

Для молока качественно проведённая гомогенизация считается при размерах жировых шариков меньше 1 мкм, т.е. $D_k = 1$ мкм. Определение We_c для молочной эмульсии является сложной задачей, вследствие недостоверности точных экспериментальных значений Δv . Часто авторы заменяют скорость скольжения жирового шарика на скорость потока [3, С. 208], или градиент скорости [7 С. 102], что в корне меняет физический смысл критерия Вебера. Наиболее достоверно критическое значение критерия Вебера определено для противоточно-струйной гомогенизации $We_c = 500 \dots 600$ [8 С. 10]. Таким образом, требуемая минимальная скорость обезжиренного молока составляет 150...160 м/с.

Связь между основными гидродинамическими параметрами струйного аппарата показывает уравнение импульсов, которое для центральной части струйного гомогенизатора (сечения 1-1, 2-2 и 3-3) будет иметь вид [9 С. 171]

$$\varphi_2 (\rho_i \rho v_i + \rho_2 \rho v) - (\rho_i \rho_i + \rho_2 \rho_2) v = (p_2 - p) \pi dh + (p_1 - p) \frac{\pi d^2}{4} = \tag{4}$$

$$= p_3 \left(\pi dh + \frac{\pi d^2}{4} \right) - p_2 \pi dh - p_1 \frac{\pi d^2}{4}$$

φ_2 – коэффициент скорости для максимального сужения камеры;

Q_i – подача сливок через щелевой канал, м³/с;

ρ_n – плотность сливок, кг/м³;

v_2, v_3 – скорости вхождения сливок в поток обезжиренного молока и скорость смеси (нормализованного молока и сливок) соответственно, м/с;

p_1, p_2, p_3 – давления перед сужением рабочей камеры, в области входа сливок в поток обезжиренного молока и в начале камеры смешения, Па;

h – ширине щелевого канала, м.

Для создания необходимого потока обезжиренного молока для струйного гомогенизатора рационально применять насосы объёмного действия, например шестерённые с внутренним зацеплением, развивающие высокое давление, необходимое для создания требуемой скорости v_1 . Необходимую подачу такого насоса можно определить по формуле

$$Q_p \geq \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{\sigma_{ж-н} \cdot We_c}{\rho_o \cdot D_k}}. \tag{5}$$

Инжекция сливок в область камеры за максимальным сужением необходимо осуществлять в пропорции, требуемой технологией производства молочного продукта, т.е. осуществить нормализацию молочной смеси по жирности. Отношение расходов обезжиренного молока к расходу сливок для обеспечения требуемой жирности определяется по формуле

$$\frac{Q_n \rho_c}{Q_p \rho_o} = \frac{Ж_n - Ж_o}{Ж_{cl} - Ж_n}, \tag{6}$$

J_{cl}, J_n, J_o – жирности соответственно сливок, нормализованного молока и обезжиренного молока, %.

Отношение массового расхода инжектируемого потока (сливок) к массовому расходу рабочего потока (обезжиренного молока) называется коэффициентом инъекции u

$$u = \frac{Q_n \rho_c}{Q_p \rho_o}, \tag{7}$$

Достижимый коэффициент инъекции струйного аппарата находится по уравнению [9, С. 180]

$$u = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \tag{8}$$

a, b, c – коэффициенты.

$$a = (2 - \varphi_3^2) \frac{\rho_o}{\rho_i} - \left(2\varphi_2 - \frac{1}{\varphi_4^2} \right) \frac{\rho_o}{\rho_n} n, \tag{9}$$

$$b = 2(2 - \varphi_3^2) \frac{\rho_o}{\rho_i}, \tag{10}$$

$$c = - \left[\varphi_1^2 \varphi_2^2 \frac{\Delta p_\delta}{\Delta p_n} - (2 - \varphi_3^2) \frac{\rho_o}{\rho_i} \right], \tag{11}$$

n – соотношение площади сечения 3 к площади щелевого канала подачи сливок S_3/S_2 ;

ρ_i – плотность цельного молока, кг/м³;

$\varphi_1, \varphi_3, \varphi_4$ – коэффициенты скоростей для соответственно конфузора, диффузора и щелевого канала подачи сливок;

$\Delta p_\delta / \Delta p_n$ – относительный перепад давления инжектора.

$$n = \frac{\frac{\pi d^2}{4} + \pi dh}{\pi dh} = \frac{\pi d \left(\frac{d}{4} + h \right)}{\pi dh} = \frac{\frac{d}{4} + h}{h} = \frac{d}{4h} + 1. \tag{12}$$

$$\Delta p_p = p_p - p_n, \tag{13}$$

$$\Delta p_c = p_c - p_n, \tag{14}$$

p_p – давление в патрубке подачи обезжиренного молока, Па;

p_n – давление в камере подачи сливок, Па;

p_c – давление в выходной камере, Па.

Мощность, затрачиваемая процессом гомогенизации в струйном аппарате P , Вт определим по формуле

$$P = Q_n p_n + Q_p p_p. \tag{15}$$

При p_p равном атмосферному, последняя формула упрощается до вида

$$P = Q_n p_n. \tag{16}$$

Для нахождения затрачиваемой мощности необходимо учесть КПД насоса и потери в трубопроводах.

Таким образом, в результате проведенных аналитических исследований показан принцип действия и механизм гомогенизации молока в струйном аппарате с отдельной подачей сливок. Расчет размеров дисперсной фазы молочной эмульсии основан на определении критерия Вебера. Для получения степени гомогенизации молока сравнимой с клапанными, необходима скорость потока 150-160 м/с. На основе уравнения импульсов для струйных аппаратов получены формулы, связывающие давление, скорости и расходы обезжиренного молока, сливок и смешанного потока с размерами рабочей камеры и щели для подачи сливок. При работе гомогенизатора в режиме нормализации, рассчитаны соотношения расходов и коэффициента инъекции, позволяющие достичь требуемого состава молочной смеси по жирности. Получена математическая зависимость для нахождения требуемой мощности насоса подачи обезжиренного молока. Полученные данные являются исходными для разработки математической модели струйного диспергирования, создания лабораторных, промышленных установок и экспериментальных исследований струйного гомогенизатора.

Список литературы:

1. Нужин, Е.В., Гладушняк А.К. Гомогенизация и гомогенизаторы / Монография – Одесса: Печатный дом, 2007. – 264 с.
2. Фиалкова Е.А. Гомогенизация. Новый взгляд: Монография-справочник / Е.А.Фиалкова – Спб.: ГИОРД, 2006. – 392с.
3. Лонцин М., Мерсон Р. Основные процессы пищевых производств / Под ред. И. А. Рогова; пер. с англ. Ф. Н. Евтеевой. – М.: Лёгкая и пищевая промышленность, 1983. – 279 с.
4. Орешина М. Н. Импульсное диспергирование многокомпонентных пищевых систем и его аппаратная реализация: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.18.12 / Н. М. Орешина. – М., 2010. – 50 с.
5. Волынский М.С. Необыкновенная жизнь обыкновенной капли.– М.: Знание, 1986. – 144 с.
6. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Султанова В.О. Якість та енергетична ефективність процесу струйної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків // Праці ТДАТУ: Мелітополь – 2015. – Вип.15, Т.1. – С. 240-248.
7. Паляничка Н.О., Гвоздев О.В. Визначення ступеня гомогенізації при імпульсній гомогенізації молока // Праці ТДАТУ: Мелітополь – 2013. – Вип.13, Т.7. – С. 102-107.
8. Самойчук К.О. Обґрунтування параметрів та режимів роботи протитечійно-струменевого гомогенізатора молока: автореферат канд. техн. наук, спец.: 05.18.12 - процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв/К.О.Самойчук.–Донецьк: МОН Укр. Донецький нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського, 2008. — 20 с.
9. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. – 3-е изд. перераб. – М: Энергоатомиздат, 1989. – 352с.