

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТРУЙНОЙ ГОМОГЕНИЗАЦИИ МОЛОКА С РАЗДЕЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ СЛИВОК

К.О. Самойчук, канд. техн. наук, доцент, А.А. Ковалев, инженер, ассистент Таврический государственный агротехнологический университет (г. Мелитополь), А.А. Бездитный, канд. техн. наук, доцент Мелитопольский государственный педагогический университет им. Б. Хмельницкого, (г. Мелитополь).

Работа посвящена компьютерному моделированию процесса струйной гомогенизации молока с раздельной подачей сливок в компьютерной программе конечно-элементного анализа ANSYS. Исследовалось влияние давления обезжиренного молока в центральном канале, диаметра центрального канала в месте наибольшего сужения потока и диаметра канала подачи жировой фазы на поля скоростей молочной эмульсии. Определено влияние этих параметров на степень диспергирования. Получены формулы для определения координаты области локализации максимальной скорости эмульсии для получения наивысшей степени гомогенизации. Получены формулы для определения среднего диаметра жировых шариков и удельных энергозатрат исследуемого гомогенизатора. Полученные данные дают более ясное представление о процессе струйной гомогенизации молока с раздельной подачей сливок и позволяют сократить объём экспериментальных исследований.

Ключевые слова. Молоко, гомогенизация, струйный гомогенизатор, моделирование, эффективность.

Введение

Повышение качества молочных продуктов, которое обуславливает применение гомогенизации, обеспечивает преимущества в конкурентной борьбе среди производителей. Поэтому, несмотря на то, что гомогенизация является наиболее энергозатратным процессом в технологии переработки молока, её применение является необходимым, так как позволяет стабилизировать жировую фазу молока, улучшить сенсорные и вкусовые свойства и повысить усвояемость продукта.

Существующие и применяемые на практике конструкции гомогенизаторов или обеспечивают невысокую степень диспергирования жировой фазы или очень энергоёмки. Одной из нерешенных проблем гомогенизации является отсутствие общей теории процесса [1]. Существует более 5 гипотез гомогенизации достоверно подтвержденных только частично из-за микроскопических размеров частиц жира и высоких скоростей их движения. Общим для существующих гипотез является создание для процесса измельчения частиц жира максимально возможной разницы скоростей дисперсионной и дисперсной фаз. Большая часть исследователей процесса приходит к выводу о решающем влиянии при разрушении жировых шариков молока разницы скоростей между жировой частицей и окружающей средой.

Последние тенденции молочной отрасли заключаются в применении раздельной гомогенизации и струйного диспергирования, которые обеспечивают снижение энергоёмкости при сохранении показателей качества продукта. Преимущество струйных гомогенизаторов заключается в создании максимальной разницы между скоростями дисперсионной (обезжиренное молоко) и дисперсной (сливки) фазами. Принцип действия этих конструкций состоит в том, что в скоростной поток обезжиренного молока тонким потоком подаются сливки. Таким образом при раздельной струйной гомогенизации создается высокая разница скоростей фаз за счет которой происходит дробление жировых шариков молока. Одной из таких конструкций является разработанный лабораторный образец струйного гомогенизатора молока с раздельной подачей сливок. Проведенные теоретические исследования показали высокую эффективность процесса, при сохранении

показателей качества продукта, сравнимую с клапанными гомогенизаторами. Однако такие исследования позволили определить лишь осреднённые характеристики процесса струйной гомогенизации.

Учитывая вышесказанное, целью данной статьи является более глубокое исследование процесса струйной гомогенизации молока с помощью его компьютерного моделирования.

Результаты исследований и их обсуждение

В соответствии с принципом обеспечения максимальной разницы скоростей фаз продукта была разработана компьютерная модель камеры гомогенизации. Рабочая камера установки состоит из корпуса 1, в котором выполнен центральный канал в виде конфузора диаметром d_u в месте наибольшего сужения. В этом месте в него по тонкому каналу диаметром d_c подаются сливки (рис 1).

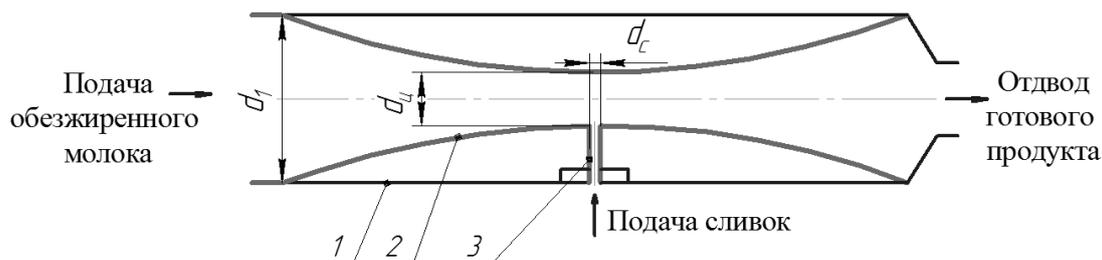


Рисунок 1 – Схема струйного гомогенизатора молока: 1 – корпус, 2 – центральный канал, 3 – канал подачи сливок

В конструкции возможно использование нескольких каналов для подачи жировой фазы с определенной скоростью в определенном соотношении молока и сливок, определяемом из уравнения материального баланса, что дает возможность регулировать жирность продукта [2].

Механизм гомогенизации заключается в следующем. В результате взаимодействия потока молока и струи сливок при достижении числа Рейнольдса $Re > 2300$ устанавливается режим развитой турбулентности. При таком режиме возникают значительные тангенциальные напряжения, которые по утверждению Хинце связаны с критерием Вебера, что обуславливает дробление жировых шариков [3].

Проведенные теоретические исследования процесса струйной гомогенизации молока показывают осредненные значения факторов процесса. Более полные и достоверные данные может дать компьютерное моделирование процесса. Для моделирования гидродинамических процессов используются такие программы как Solid Works, AutoCAD, COSMOS. Среди них выделяется программный комплекс конечно-элементного анализа ANSYS благодаря возможности оперирования большим количеством параметров, а также высокой точностью результатов. Кроме этого ANSYS обеспечивает значения показателей продукта, таких как плотность и вязкость молока и сливок максимально приближенные к реальным значениям [4]. Геометрическая параметризованная модель камеры гомогенизации, потока обезжиренного молока и струи сливок камеры струйного гомогенизатора с отдельной подачей сливок была создана в программе Solid Works и интегрирована в программный комплекс ANSYS.

Для моделирования в ANSYS в качестве переменных факторов, определяющих качество процесса были выделены: давление подачи обезжиренного молока, диаметр канала подачи сливок d_c и диаметр канала в месте подачи сливок в камере гомогенизации d_u .

Согласно теоретическим исследованиям процесса струйной гомогенизации молока рациональными с точки зрения энергетической эффективности процесса и обеспечения качества на уровне клапанных гомогенизаторов является диапазон давлений для подачи обезжиренного молока Δp_1 в диапазоне 3...9 МПа [2].

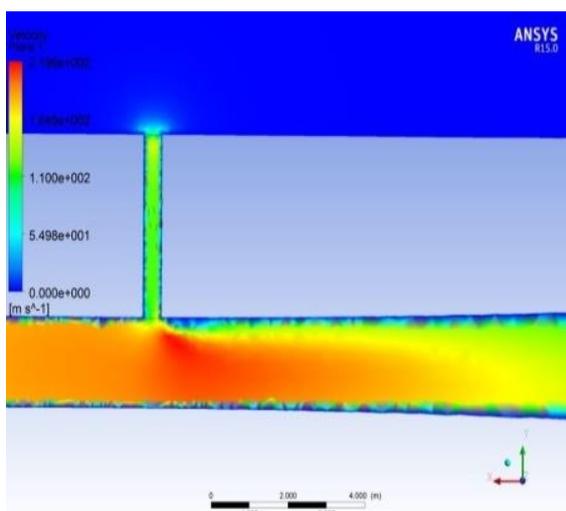
Диаметр канала подачи сливок также будет иметь существенное влияние на показатели качества процесса. Необходимо стремиться к минимальному технологически выполнимому

диаметру. В противном случае высокая скорость обтекания жировых частиц будет создаваться лишь для периферийной части струи сливок, оставляя центральную её часть с низкой степенью диспергирования. С другой стороны, меньший диаметр каналов может приводить к явлениям облитерации. При проведении теоретических исследований был обоснован диапазон изменения диаметра d_c в диапазоне 0,5–0,8 мм. Эти значения технологически достаточны для обеспечения производительности установки до 2000 кг/час. При необходимости повышения производительности возможно применение нескольких каналов подачи сливок.

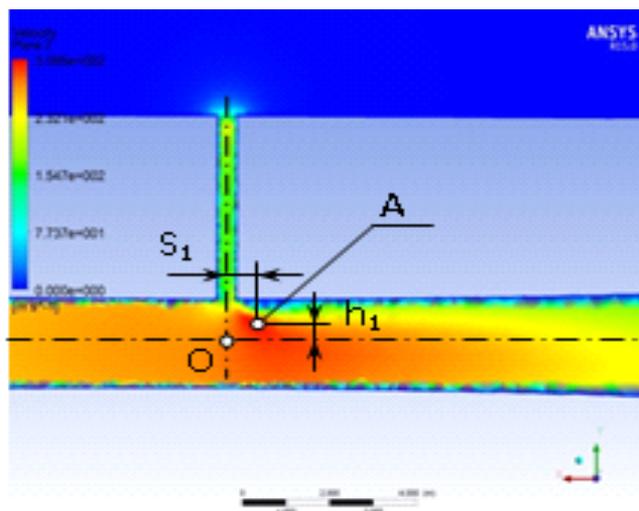
Диаметр центрального канала в месте наибольшего сужения потока согласно теоретическим расчетам будет находиться в пределах от 1 до 3 мм [5]. Нижнее значение фактора ограничено размером канала подачи сливок и достижением необходимой промышленной производительности. Верхнее – снижением скорости потока, что приводит к снижению степени диспергирования. Кроме того при больших значениях диаметра центрального канала и развитой турбулентности увеличивается путь смешения жировой частицы, что негативно влияет на качество диспергирования жировой фазы [6].

Среди большого количества параметров, которые можно определять и моделировать в ANSYS наибольший интерес представляют поля скоростей молока и сливок в центральной части камеры, где происходит гомогенизация.

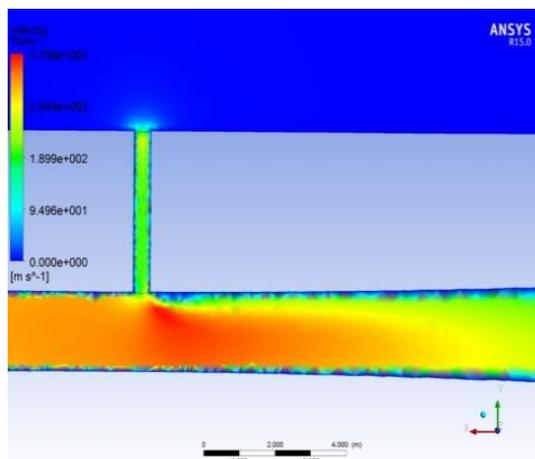
Анализ полей скоростей (рис. 2) при повышении Δp_1 свидетельствует, что в тонком пристенном слое центрального канала, течение жидкости ламинарное и создается невысокое значение средней скорости обезжиренного молока при высоком градиенте скоростей фаз и соответственно дробление жировых шариков происходит весьма эффективно [7, 8].



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Поля скоростей при давлении подачи обезжиренного молока: а) $\Delta p_1=3\text{МПа}$; б) $\Delta p_1=6\text{МПа}$; в) $\Delta p_1=9\text{МПа}$ (при $d_u=2\text{мм}$ и $d_c=0,5\text{мм}$)

Некоторые исследователи придавали этому градиенту определяющее значение в процессе диспергирования жировой фазы в клапанном гомогенизаторе, где размер щели между седлом и клапаном составляет доли миллиметра, и пристенный слой может занимать всю ширину клапанной щели. Однако для исследуемого гомогенизатора в пристенный слой занимает незначительную часть общего диаметра центрального канала, поэтому влиянием пограничного слоя на процесс гомогенизации можно пренебречь.

При увеличении давления в канале подачи обезжиренного молока от 3 до 9 МПа скорость в канале подачи обезжиренного молока увеличивается от 60 (см. рис. 2 а) до 100 м/с (см. рис. 2 в). Зона локализации максимальной скорости расположена не по центру центрального канала, и при повышении давления сдвигается вправо и вверх. Таким образом расположение этой зоны зависит от давления подачи обезжиренного молока. Для создания максимальной разницы скоростей фаз, что является определяющим для диспергирования жировых частиц [5], необходимо подавать сливки в зону максимальной скорости потока обезжиренного молока. На схеме (см. рис. 2 б) точкой О обозначена центральная точка основного канала, а координатами S_1 и h_1 – расположение зоны локализации максимальной скорости. Согласно полученным данным найдены зависимости для определения этих координат

$$S_1 = 0,05\Delta p_1 + 0,6. \quad (1)$$

$$h_1 = 0,02\Delta p_1 + 0,28. \quad (2)$$

Характер полученных зависимостей (1, 2) представлен на рис.3.

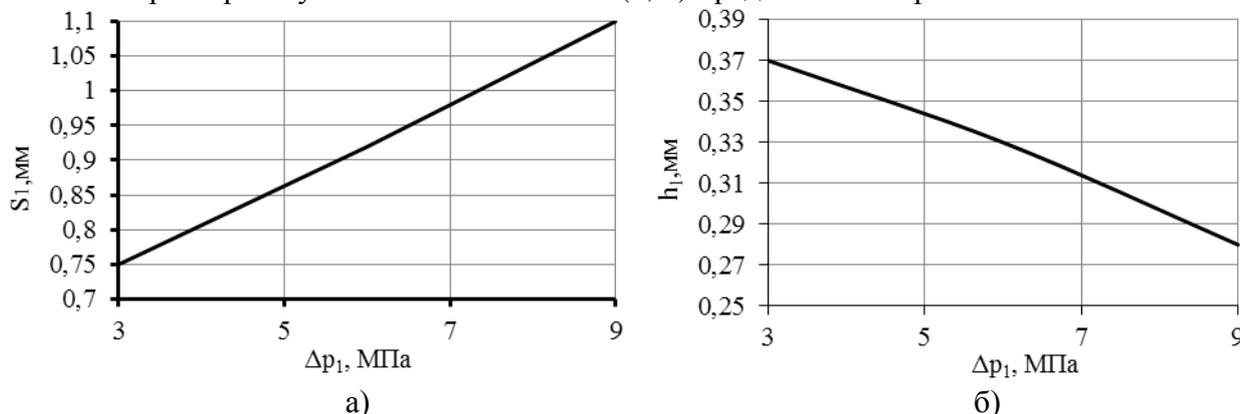


Рисунок 3 – Зависимость между координатами подачи жировой фазы в поток обезжиренного молока а) S_1 и б) h_1 от давления подачи обезжиренного молока Δp_1

В лабораторной установке канал подачи сливок выполнен в виде иглы, расстояние от торца которой до стенки камеры h_1 можно регулировать. Знание координат точки подачи жировой фазы позволят скорректировать подачу сливок в зону локализации максимальной разницы скоростей фаз продукта, что позволит повысить степень диспергирования жира.

Не менее важным в процессе гомогенизации является такой фактор как диаметр центрального канала в месте наибольшего сужения потока, влияние которого представлено на рис.4.

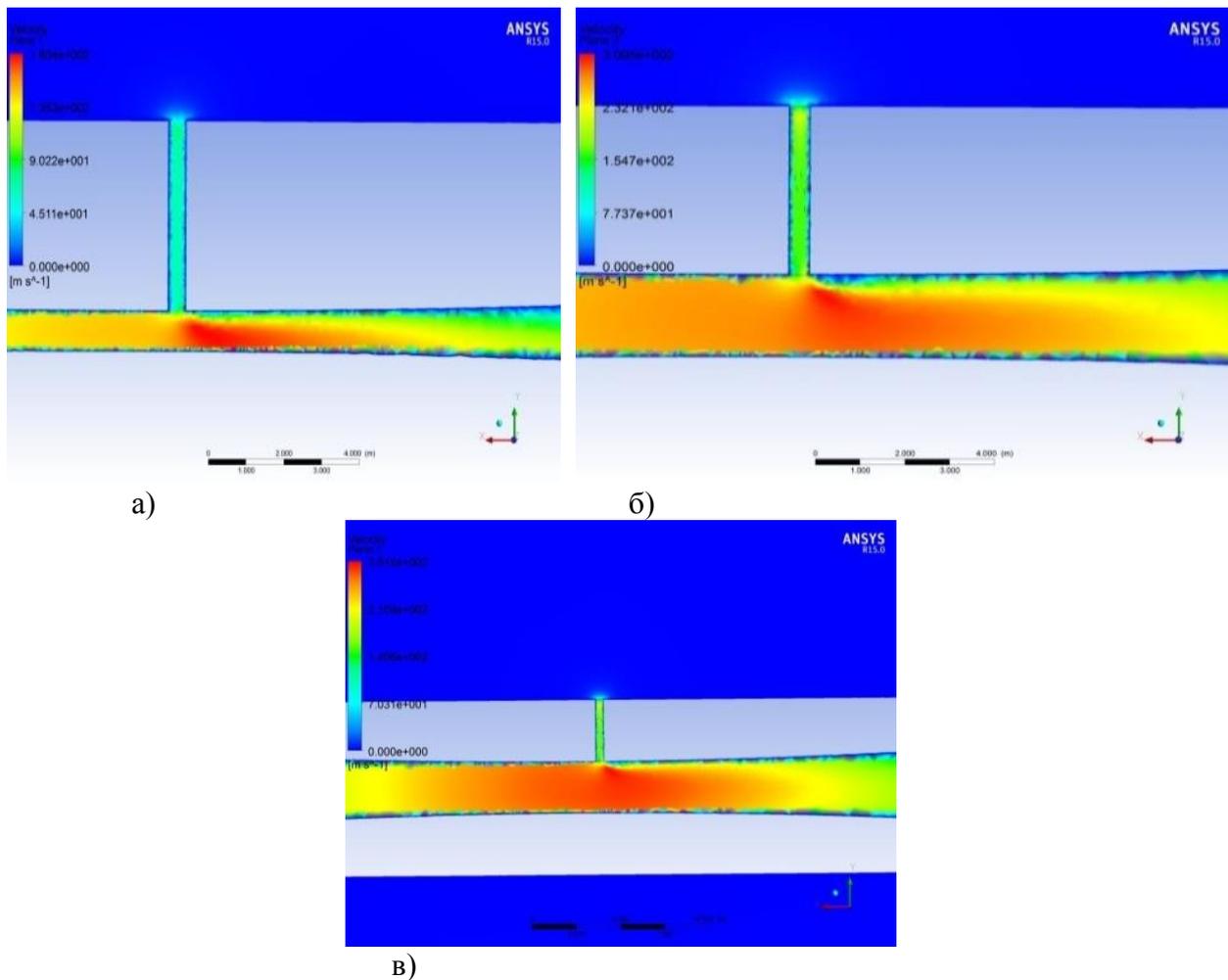


Рисунок 4 – Поле скоростей молока при диаметре центрального канала в месте наибольшего сужения потока а) $d_{ц}=1\text{мм}$; б) $d_{ц}=2\text{мм}$; в) $d_{ц}=3\text{мм}$ (при давлении обезжиренного молока $\Delta p_I=6\text{МПа}$, диаметре канала подачи жировой фазы $d_c=0,5\text{мм}$)

При увеличении диаметра центрального канала в месте наибольшего сужения потока от 1 до 3 мм скорость в канале подачи обезжиренного молока падает от 105 до 60 м/с. При этом увеличивается площадь зоны локализации максимальной скорости, что вызывает диссипацию мощности на большей площади, снижая концентрацию энергии. Зона локализации максимальной скорости при увеличении $d_{ц}$ находится на одном расстоянии от канала подачи сливок и от стенки основного канала (в месте подачи сливок), то есть не зависит от $d_{ц}$. При этом при $d_{ц}=1\text{мм}$ (рис. 4 а) эта зона расположена ближе к стенке основного канала, противоположного каналу подачи сливок, а при $d_{ц}=3\text{мм}$ (рис. 4 в) – ближе к каналу подачи сливок. Для повышения степени диспергирования определяющим фактором является скорость потока обезжиренного молока, то есть необходимо уменьшать диаметр узкой части конфузора.

Влияние диаметра канала подачи жировой фазы на поле скоростей в струйном гомогенизаторе показано на рис. 5.

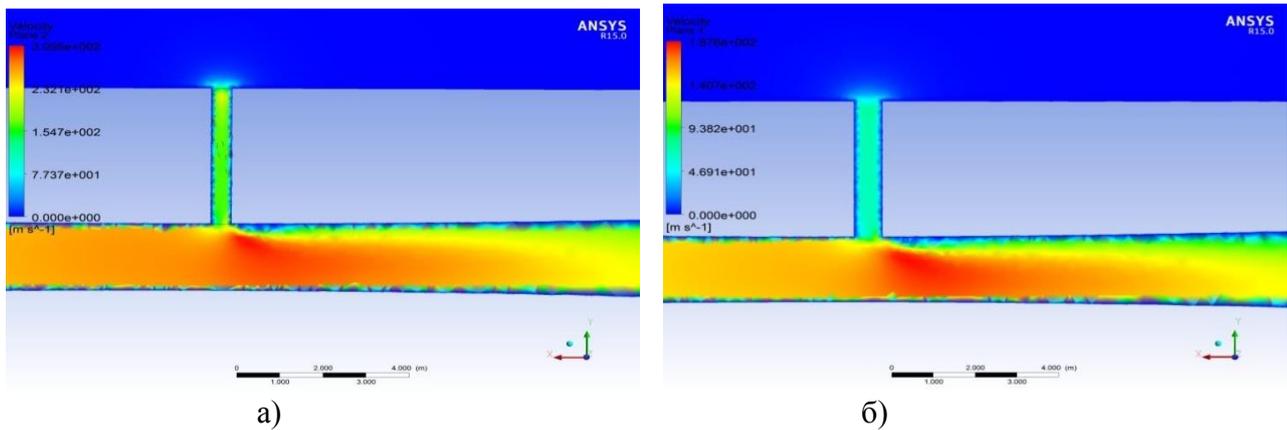


Рисунок 5 – Поле скоростей молока при диаметре канала подачи жировой фазы а) $d_c=0,5\text{мм}$; б) $d_c=0,8\text{мм}$ (при давлении обезжиренного молока $\Delta p_1=6\text{МПа}$, диаметре центрального канала в месте наибольшего сужения потока $d_u=2\text{мм}$)

При анализе рис. 5 можно констатировать более высокие показатели скорости при $d=0,5\text{мм}$ (см. рис. 5 а) и их уменьшение при $d_c=0,8\text{мм}$ (см. рис. 5 б) от 60 до 55 м/с. Преимущество использования канала меньшего диаметра заключается в обеспечении более равномерного воздействия на струйку сливок как с точки зрения меньшей толщины потока, так и с точки зрения создания более равномерного поля скоростей. При увеличении диаметра канала подачи сливок площадь зоны локализации максимальной скорости обезжиренного молока увеличивается, что ведет к рассеянию энергии потока. Таким образом для повышения качества гомогенизации необходимо уменьшать диаметр канала подачи сливок.

Для оценки режима наибольшей эффективности из предложенного диапазона вариации давлений, обезжиренного молока необходима оценка по показателям качества и энергетическим параметрам процесса. Диаметр жирового шарика после диспергирования определяются формулой [9]

$$d_k = 0,75 \frac{We_{кр} \cdot \sigma_{ж-п}}{\rho_{пл} u^2}, \quad (3)$$

где d_k – диаметр жирового шарика стойкого в турбулентном потоке, м;

σ – межфазное натяжение на границе раздела фаз жир-плазма;

$\rho_{пл}$ – плотность плазмы молока, кг/м^3 ;

$We_{кр}$ – критическое значение числа Вебера, определяющее условия разрушения капли;

u – разницa скоростей жировой фазы и обезжиренного молока, м/с.

Из условия неразрывности потока, при подаче жировой фазы перпендикулярно потоку обезжиренного молока, разницa скоростей фаз в зоне подачи сливок будет равна

$$u = \frac{d_1}{d_u} \varphi \sqrt{\frac{2}{\rho_m} \Delta p_1}, \quad (4)$$

где d_1 – диаметр канала подачи обезжиренного молока, м;

ρ_m – плотность молока, кг/м^3 ;

φ – коэффициент скорости обусловленный конструкцией патрубкa подачи обезжиренного молока.

Таким образом формула (3) с учётом (4) преобразуется к виду

$$d_k = 0,34 \frac{d_u^2 We_{кр} \rho_m \sigma_{ж-п}}{\rho_{пл} d_1^2 \varphi^2 \Delta p_1}. \quad (5)$$

Критические значения чисел Вебера для разрушения капель в потоке воздуха определены экспериментально, однако для разрушения жировых шариков в потоке обезжиренного молока, его значение будет выше из-за высокой вовлечённости в поток соседних слоев плазмы. Ученые приводят экспериментальные данные модифицированного критерия Вебера (в котором относительная скорость дисперсной частицы заменена на скорость потока), которые отличаются на порядки. Наиболее близким процессом к исследуемой струйной гомогенизации является противоточно-струйная, для которой экспериментально подтвержденные критические значения числа Вебера варьируются в диапазоне 500–600 [9].

Удельные энергозатраты исследуемого гомогенизатора определяются по формуле [10]

$$E_{уд} = \frac{\Delta p_1}{\rho_m} + \frac{\Delta p_2}{\rho_{сл}}, \quad (6)$$

где $\rho_{сл}$ – плотность сливок, кг/м³.

Зависимости 5 и 6 отобразим графически, учитывая, что средний размер жировых шариков до гомогенизации составляет 4 мкм (рис.6).

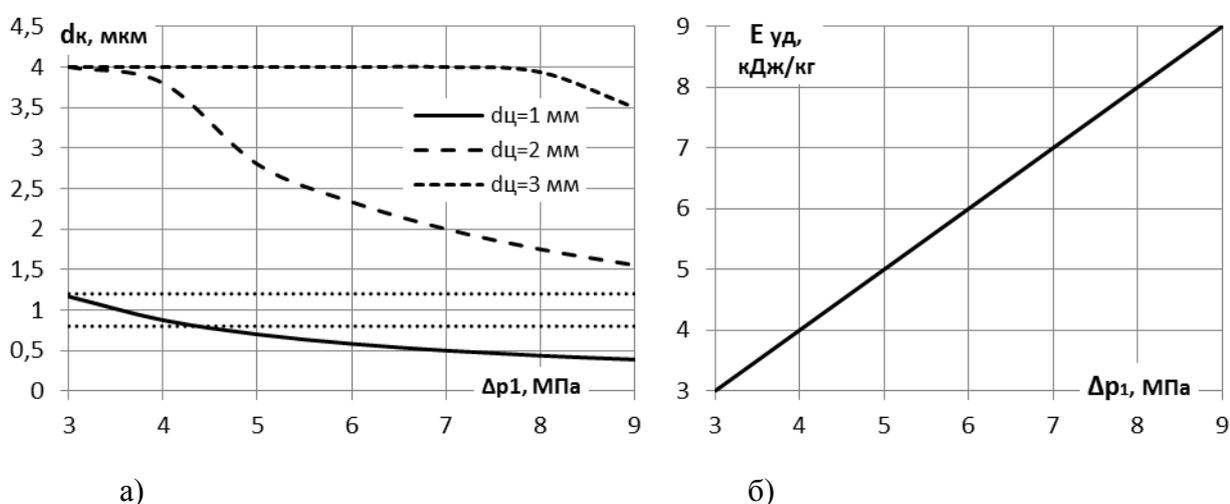


Рисунок 6 – График зависимости диаметра жировых шариков после гомогенизации а) и график зависимости удельных энергозатрат б) от давления обезжиренного молока

Размер жировых шариков молока после обработки в существующих гомогенизаторах находится в диапазоне 0,8–1,2 мкм. Для этого диапазона (на рис. 6 выделен пунктирными линиями) удельные энергозатраты исследуемого гомогенизатора составляют 3,0–4,5 кДж/кг (при $d_{ц}=1$ мм), а давления подачи обезжиренного молока 3–4,5 МПа. Измельчение до необходимых размеров при $d_{ц}=1$ мм происходит во всём принятом диапазоне изменения давлений. Для молока при $d_{ц}=2$ мм диспергирование происходит при $\Delta p_1 > 4$ МПа, а при $d_{ц}=3$ мм при $\Delta p_1 > 8$ МПа, но необходимая степень дисперсности не достигается. Это происходит вследствие недостаточной скорости скольжения жирового шарика и, как следствие, значения критерия Вебера меньше критического. Однако для других эмульсий, где необходимый размер жировых частиц гораздо больше, например майонезной, диаметр центрального канала более 1 мм позволяет повысить производительность диспергатора. Для повышения степени диспергирования необходимо уменьшать диаметр центрального канала в месте наибольшего сужения. Однако большой перепад между d_c и $d_{ц}$ при малой длине конфузора может привести к срыву течения, в результате которого образуются завихрения, приводящие к снижению качества диспергирования.

Последние исследования ученых рекомендуют достигать дробления жировых шариков молока до возможно меньшей величины (0,3–0,4 мкм) – размеров хиломикрон. Утверждается, что благодаря своим размерам они лучше включаются в кровоток и усваиваются организмом человека [11]. Однако такие данные требуют тщательной

экспериментальной проверки. На практике же минимальный среднеарифметический размер жировых шариков после гомогенизации составляет 0,65–0,75 мкм.

Заключение

Таким образом, данные полученные в программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS для процесса струйной гомогенизации молока с отдельной подачей сливок позволяют сделать следующие выводы. Определяющим фактором диспергирования жировой фазы молока, согласно критерия Вебера, является скорость подачи обезжиренного молока. Поэтому для повышения степени гомогенизации необходимо повышать давление подачи обезжиренного молока, уменьшать диаметр наибольшего сужения конфузора и уменьшать диаметр канала подачи сливок. Определены координаты подачи жировой фазы в зону локализации максимальной скорости, что позволяет повысить степень диспергирования. При давлении в канале подачи обезжиренного молока 3 - 9 МПа достигается скорость эмульсии молока 60–100 м/с. При этом аналитически рассчитанные значения среднего размера жировых шариков достигают 0,4 мкм, а удельные энергозатраты 3,0–4,5 кДж/кг, что в 1,8–2,2 раза меньше чем энергозатраты в клапанных гомогенизаторах.

Литература:

1. Фиалкова Е.А. Гомогенизация. Новый взгляд: Монография – справочник / Е.А.Фиалкова – Спб.: ГИОРД, 2006. – 392с
2. Самойчук К.О. Розробка лабораторного зразка струминного гомогенізатору з роздільною подачею вершків/ К.О.Самойчук, О.О.Ковальов// Праці ТДАТУ – Мелітополь: 2011. – 77-84с.
3. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй/Г.Н. Абрамович. – Эколит - М: 2011 – 728с.
4. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство /А.Б.Каплун, Е.М.Морозов, М.А.Олферьева – М.: Едиториал, 2003. – 272с.
5. Самойчук К.О. Механізм руйнування жирових кульок у струминному гомогенізаторі з роздільним подаванням вершків /К.О.Самойчук, О.О.Ковальов// ДонНУЕТ – Донецьк.: – 2013. – Вип. 30. – С.148 – 155.
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
7. Веремеев С.А. Взаимодействие импульсной затопленной струи жидкости с преградой / С.А. Веремеев, А.Н. Семко // Прикладна гідромеханіка. – 2008. – Т. 10, № 1. – С. 3 – 9.
8. Матвиенко О.В. Математическое моделирование турбулентного переноса дисперсной фазы в турбулентном потоке / О.В. Матвиенко, Е.В. Евтюшкин // Вестник ТГПУ, 2004. Вып. 6, С. 50 – 53.
9. 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.
10. Самойчук К.О. Якість та енергетична ефективність процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків /К.О.Самойчук, О.О.Ковальов, В.О.Султанова // Праці ТДАТУ – Мелітополь: 2015. – Вип15. – Том1.С 241 – 249.
11. Петров А.Н. Теория и практика повышения устойчивости жировой фазы консервов на молочной основе общего и специального назначения автореферат дис. ... доктора технических наук : 05.18.04 /А.Н. Петров - Москва, 2010. - 50 с.

MODELLING OF JET – MIXING MILK HOMOGENIZATION WITH SEPARATE CREAM FEED

К.Сamoichuk, А.Кovalyov, А.Bezditnyi

The work is devoted to the computer simulation of jet-mixing milk homogenization with the separate cream feed in ANSYS simulation software. We researched influence of pressure of skim milk in the central channel, diameter of central channel in the area of the most narrowing of stream and diameter of fatty phase feed channel on the velocity fields of milk emulsion. Influence of these parameters on the degree of dispersing has been defined. Formulas are got to determine coordinates of localization area of the maximum velocity of the emulsion in order to obtain the highest homogenization degree. Formulas are got to determine the medium diameter of fat globules and specific power inputs of the investigated homogenizer. Obtained data gives more clear idea about the process of jet-mixing milk homogenization with the separate cream feed and allow decreasing experimental researches.

Keywords. *Milk, homogenization, jet-mixing homogenizer, simulation, velocity, efficiency.*