

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СЕПАРАТОРА-СЛИВКООТДЕЛИТЕЛЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТАНДАРТИЗИРОВАННОГО МОЛОКА И СЛИВОК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

Марина Геннадьевна Курбанова, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии продуктов питания животного происхождения

E-mail: kurbanova-mg@mail.ru

Анастасия Юрьевна Колбина, канд. техн. наук, доцент кафедры технологии продуктов питания животного происхождения

E-mail: jo1992@yandex.ru

Кемеровский государственный университет, г. Кемерово

Целью настоящего исследования являлась комплексная оптимизация режимов работы сепаратора-сливкоотделителя для гарантированного получения стандартизированных сливок с массовой долей жира 35 % и минимизации потерь ценного сырья, а также гарантированного получения стандартизированных продуктов с заданными показателями качества. Установлены количественные зависимости и построены математические модели, описывающие совместное влияние ключевых технологических параметров (температура сепарирования, частота вращения ротора, расход молока, подача молока на входе в сепаратор) на жирность обезжиренного молока и сливок. Представлены регрессионные модели. Проведен дисперсионный анализ, который показал, что температура вносит наибольший вклад (62,3 %) в эффективность разделения. В результате оптимизации методом функции желательности установлены и экспериментально верифицированы оптимальные параметры: температура 50 °С, частота вращения 9000 об/мин, подача молока на входе в сепаратор 6000 л/ч. Разработан высокоэффективный технологический режим, позволяющий снизить потери жира с обезжиренным молоком до 0,047 %, стабильно получать сливки с массовой долей жира 35,2 %. Полученные модели и установленные оптимальные условия сепарирования имеют практическую значимость для предприятий молочной промышленности, обеспечивая ресурсосбережение и стабильность технологического процесса при производстве широкого ассортимента стандартизированной продукции.

Ключевые слова: сепарирование, стандартизация молока, сливки, жир, оптимизация, потери жира, сепаратор

Для цитирования: Курбанова, М. Г. Оптимизация режимов работы сепаратора-сливкоотделителя для получения стандартизированного молока и сливок / М. Г. Курбанова, А. Ю. Колбина // Молочная промышленность. 2026. № 3. С. 50–55. <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2026-3-87>

ВВЕДЕНИЕ

Производство стандартизированных молочных продуктов является одной из ключевых задач современной молочной промышленности [1]. Точное нормирование массовой доли жира в молоке и сливках критически важно как для обеспечения стабильного качества готовой продукции (питьевого молока, сметаны, масла), так и для экономической эффективности предприятия [2]. Основным аппаратом для разделения молока на фракции является сепаратор сливоотделитель.

Эффективность сепарирования, характеризуемая полнотой выделения в сливочную фракцию и минимальным содержанием жира в обезжиренном молоке, зависит от комплекса взаимосвязанных факторов. Согласно классическим представлениям, процесс описывается законом Стокса в поле центробежных сил, на него напрямую влияют температура, снижающая вязкость среды, и частота вращения ротора, определяющая центробежное ускорение [3, 4]. В современных работах [5, 6] также подчеркивается значимость

поддачи молока на входе в сепаратор, определяющей время пребывания продукта в зоне разделения, и состояния жировых шариков [7].

Несмотря на обилие теоретических исследований, на практике часто наблюдается несоответствие между паспортными и фактическими характеристиками сепаратора, обусловленное вариабельностью свойств исходного сырья [8] и износом оборудования. В доступной литературе недостаточно освещены комплексные исследования, позволяющие количественно оценить взаимное влияние технологических параметров на конкретной модели сепаратора в условиях, приближенных к производственным [9].

Целью настоящего исследования являлась комплексная оптимизация режимов работы сепаратора-сливкоотделителя для гарантированного получения стандартизированных сливок с массовой долей жира 35 % и минимизации потерь ценного сырья, а также гарантированного получения стандартизированных продуктов с заданными показателями качества.



Источник изображения: freerik.com

Задачи исследования:

1. Изучить влияние температуры сепарирования, частоты вращения ротора и подачи молока на входе в сепаратор на жирность обезжиренного молока и сливок.
2. Провести статистическую обработку результатов, построить и верифицировать регрессионные модели.
3. Методами математической оптимизации определить рациональные параметры ведения процесса.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на сыром коровьем молоке высшего сорта с исходной массовой долей жира $3,8 \pm 0,2\%$, кислотностью 16–18 °Т.

Использовалось следующее оборудование:

- сепаратор-сливкоотделитель Alfa Laval MMX 34 (Швеция);
- пластинчатая пастеризационно-охлаждающая установка П8-ОПЛ-5 (Россия);
- насос центробежный ЦН-2;
- ультразвуковой анализатор молока «Лактан 1-4» (Россия) для определения массовой доли жира.

Для исследования был выбран статистический метод оптимизации процессов VoX-Behnken для трех факторов [10]. Уровни варьирования представлены в таблице 1.

Молоко после предварительной очистки нагревали в пастеризационно-охлаждающей установке до заданной в опыте температуры 40–55 °С с точностью $\pm 0,5$ °С. Сепаратор выводили на заданные режимы по частоте вращения и подаче сырья. Отбор проб обезжиренного молока и сливок проводили через 10 мин после выхода аппарата на стационарный режим. Каждый опыт повторяли трижды. Массовую долю жира в пробах определяли ультразвуковым методом, рекомендованным для контроля молочных продуктов [11].

Статистическую обработку данных, регрессионный и дисперсионный анализ проводили с использованием программного пакета Statistica 12.0 (StatSoft, США). Построение поверхностей отклика и оптимизацию проводили с помощью модуля Response Surface Methodology [12].

Таблица 1. Уровни и интервалы варьирования факторов

Фактор	Обозначение	Нижний уровень (-1)	Основной уровень (0)	Верхний уровень (+1)
Температура сепарирования, °С	X_1	40	47,5	55
Частота вращения ротора, об/мин	X_2	7500	8750	10 000
Подача молока на входе в сепаратор, л/ч	X_3	5000	6500	80 000

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведения серии экспериментов по матрице планирования были получены данные, представленные в таблице 2.

Наглядно влияние температуры на основной показатель эффективности – жирность обезжиренного молока ($J_{д.об.м.}$) – при средних уровнях других факторов представлено на рисунке 1. Видно, что повышение температуры с 40 до 50 °С приводит к значимому снижению жирности обезжиренного молока с 0,12 до 0,06 %.

Это связано с уменьшением вязкости молока и увеличении разности плотностей жировой и плазменной фаз, что интенсифицирует процесс всплывания жировых шариков в центробежном поле, что согласуется с данными других исследований [3, 13]. Дальнейший рост температуры до 55 °С не приводит к существенному улучшению сепарации, но повышает риск термической денатурации сывороточных белков и ухудшения функциональных свойств обезжиренного молока [14].

На основе данных таблицы 2 был проведен регрессионный анализ. Для отклика Y_1 ($J_{д.об.м.}$, %) было получено следующее уравнение регрессии в кодированных переменных после исключения незначимых коэффициентов ($p < 0,05$):

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента и результаты исследования по сепарированию молока

№ опыта	Кодированные значения факторов			Натуральные значения факторов			Выходные параметры	
	X_1 (Т)	X_2 (N)	X_3 (Q)	Т, °С	N, об/мин	Q, л/ч	Жирность обезжиренного молока, %	Жирность сливок, %
1	-1	-1	0	40	7500	6500	0,121 ± 0,004	28,5 ± 0,3
2	+1	-1	0	55	7500	6500	0,058 ± 0,003	31,0 ± 0,4
3	-1	+1	0	40	10 000	6500	0,095 ± 0,003	33,8 ± 0,2
4	+1	+1	0	55	10 000	6500	0,045 ± 0,002	36,5 ± 0,3
5	-1	0	-1	40	8750	5000	0,110 ± 0,005	29,2 ± 0,5
6	+1	0	-1	55	8750	5000	0,052 ± 0,002	32,1 ± 0,3
7	-1	0	+1	40	8750	8000	0,135 ± 0,006	27,1 ± 0,4
8	+1	0	+1	55	8750	8000	0,065 ± 0,003	30,3 ± 0,3
9	0	-1	-1	47,5	7500	5000	0,085 ± 0,003	30,5 ± 0,2
10	0	+1	-1	47,5	10 000	5000	0,060 ± 0,002	35,0 ± 0,3
11	0	-1	+1	47,5	7500	8000	0,102 ± 0,004	28,0 ± 0,4
12	0	+1	+1	47,5	10 000	8000	0,071 ± 0,003	33,2 ± 0,3
13	0	0	0	47,5	8750	6500	0,068 ± 0,002	34,5 ± 0,2
14	0	0	0	47,5	8750	6500	0,066 ± 0,003	34,7 ± 0,2
15	0	0	0	47,5	8750	6500	0,070 ± 0,002	34,3 ± 0,3

Примечание: опыты 13–15 – опыты в центре плана. Уровни факторов: X_1 (Т): -1 = 40 °С, 0 = 47,5 °С, +1 = 55 °С; X_2 (N): -1 = 7500 об/мин, 0 = 8750 об/мин, +1 = 10 000 об/мин; X_3 (Q): -1 = 5000 л/ч, 0 = 6500 л/ч, +1 = 8000 л/ч.

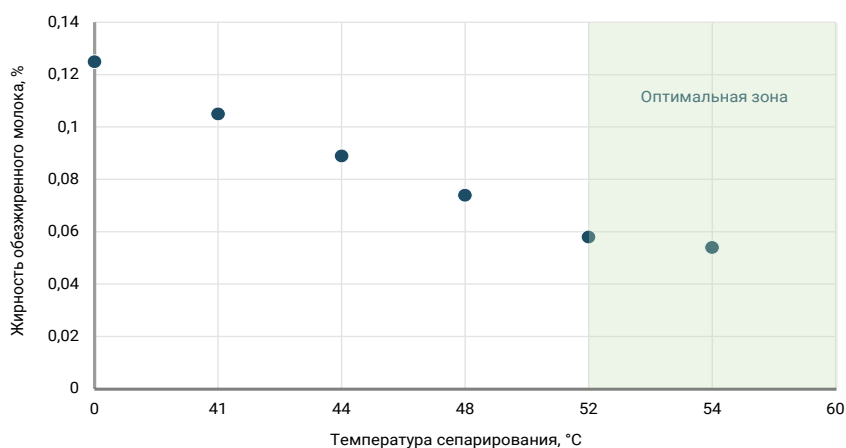


Рисунок 1. Влияние температуры сепарирования на жирность обезжиренного молока (при N = 8750 об/мин, Q = 6500 л/ч)

$$Y_1 = 0,068 - 0,027 \times X_1 - 0,011 \times X_2 + 0,015 \times X_3 + 0,008 \times X_1^2 + 0,005 \times X_1 \times X_3$$

Коэффициент детерминации R^2 для данной модели составил 0,954, что свидетельствует о ее хорошей адекватности.

Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) для отклика Y_1 представлены в таблице 3.

Данные ANOVA подтверждают, что температура сепарирования (X_1) является статистически наиболее значимым фактором (вклад 62,3 %), оказывающим прямое влияние на эффективность процесса. Подача молока на входе в сепаратор (X_3) и частота вращения (X_2) также оказывают значимое влияние, что коррелирует с выводами, сделанными в работе [15].

Для визуализации совместного влияния факторов была построена поверхность отклика, представленная на рисунке 2.

Таблица 3. Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) для модели Y_1 (Ж_{д.об.м})

Источник вариации	Сумма квадратов δS	Степени свободы df	Средний квадрат MS	F -критерий	p -value	Вклад в общую вариацию		Статус
						%	Категория	
X_1 – температура	0,00437	1	0,00437	98,1	< 0,0001	62,3	Высокий	Значим
X_2 – частота вращения	0,00073	1	0,00073	16,4	0,0032	10,4	Средний	Значим
X_3 – производительность	0,00135	1	0,00135	30,3	0,005	19,2	Средний	Значим
X_{12} – квадрат температуры	0,00027	1	0,00027	6,1	0,0370	3,8	Низкий	Значим
$X_1 X_2$ – температура × частота	0,00008	1	0,00008	1,8	0,215	1,1	Минимальный	Незначим
$X_1 X_3$ – температура × производительность	0,00016	1	0,00016	3,6	0,0920	2,3	Пограничный	Значим
$X_2 X_3$ – частота × производительность	0,00005	1	0,00005	1,1	0,321	0,7	Минимальный	Незначим
Остаток (ошибка)	0,00040	9	0,000044	–	–	0,2	–	–
Общая сумма	0,00824	15	–	–	–	100,0	–	–
Модель (регрессия)	0,00784	6	0,00131	29,8	< 0,0001	95,1	Очень высокий	Значим

Примечание: статистические показатели модели – уровень значимости $\alpha = 0,05$; коэффициент детерминации $R^2 = 0,951$ (95,1 %); скорректированный $R^2 = 0,918$ (91,8 %); стандартная ошибка оценки = 0,00663.

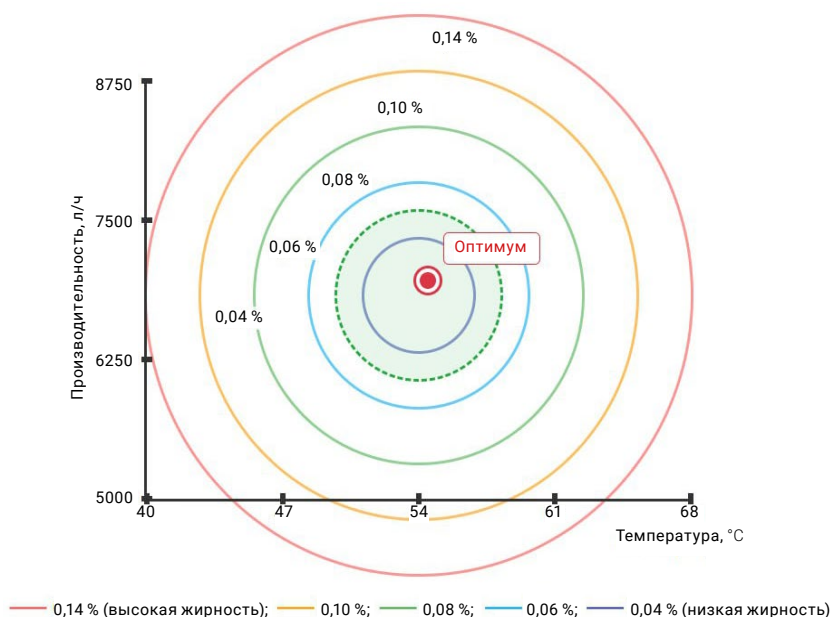


Рисунок 2. Поверхность отклика, демонстрирующая зависимость жирности обезжиренного молока (Y_1 , %) от температуры сепарирования (X_1 , °C) и производительности (X_3 , л/ч) при фиксированной частоте вращения 9000 об/мин

Таблица 4. Результаты верификационного эксперимента

Параметр	Прогноз модели	Экспериментальные данные	Отклонение
Температура сепарирования, °С	50,0 ± 1,0	50,0 ± 0,5	0,0
Частота вращения ротора, об/мин	9000 ± 100	9000 ± 50	0,0
Подача молока на входе в сепаратор, л/ч	6000 ± 200	6000 ± 100	0,0
Жирность обезжиренного молока, %	0,045 ± 0,003	0,047 ± 0,003	0,002/4,3
Жирность сливок, %	35,5 ± 0,5	35,5 ± 0,2	0,2/0,6

Анализ поверхности отклика позволяет идентифицировать область оптимальных параметров. Минимальные значения жирности обезжиренного молока достигаются в области высоких температур (49–52 °С) и средних значений подачи сырья (5500–6500 л/ч). Высокая подача молока на входе в сепаратор при любой температуре приводит к резкому росту потерь жира, что объясняется сокращением времени нахождения молока в зоне разделения [6].

Для нахождения глобального оптимума, соответствующего минимальной жирности обезжиренного молока и целевому значению жирности

сливок (35 %), применен метод функции желательности Харрингтона. В результате расчетов были определены следующие оптимальные параметры:

- температура сепарирования (X_1) – 50 °С;
- частота вращения ротора (X_2) – 9000 об/мин;
- подача на входе в сепаратор (X_3) – 6000 л/ч.

Прогноз модели для данных условий: жирность обезжиренного молока – 0,045 ± 0,005 %, жирность сливок – 35,1 ± 0,2 %.

Для проверки адекватности модели был проведен проверочный эксперимент в трехкратной повторности при оптимальных параметрах (табл. 4).

Как показали результаты, представленные в таблице 4, расхождение между прогнозными и экспериментальными данными не превышает 5 %, что подтверждает адекватность полученной математической модели и корректность проведенной оптимизации.

ВЫВОДЫ

Методом математического планирования эксперимента установлена количественная зависимость эффективности сепарирования молока от трех ключевых технологических параметров. Наибольший вклад в минимизацию потерь жира с обезжиренным молоком вносит температура (62,3 %). Получены адекватные регрессионные модели ($R^2 > 0,95$), позволяющие прогнозировать жирность обезжиренного молока и сливок в рамках исследованных интервалов изменения факторов. Определены и экспериментально подтверждены оптимальные режимы работы сепаратора-сливкоотделителя для получения стандартизированных сливок жирностью 35 %: температура – 50 °С, частота вращения ротора – 9000 об/мин, подача молока на входе в сепаратор – 6000 л/ч. При данных параметрах потери жира с обезжиренным молоком не превышают 0,05 %. ■

Поступила в редакцию: 17.02.2026

Принята в печать: 05.05.2026



Источник изображения: Freepik.com

OPTIMIZING A DISC STACK SEPARATOR FOR MILK AND CREAM STANDARDIZATION

Marina G. Kurbanova, Anastasia Yu. Kolbina

Kemerovo State University, Kemerovo

ORIGINAL ARTICLE

Standardized cream requires a target fat content of 35%. This article describes the optimization of operating parameters for a disc stack cream separator to produce standardized cream while minimizing raw material losses and ensuring high quality. Quantitative relationships and mathematical models made it possible to evaluate the combined effects of separation temperature, rotor speed, and milk flow rate on the fat content of both skim milk and cream. Regression models and analysis of variance (ANOVA) revealed that temperature had the most significant effect and contributed 62.3% to separation efficiency. Optimization using the desirability function yielded the following experimentally verified optimal parameters: 50 °C; 9,000 rpm; 6,000 L/h inlet milk flow rate. Operating under these optimized conditions reduced fat losses to 0.047% and produced cream with the target fat content of 35.2%. These models and optimal separation conditions ensure resource conservation and process stability for manufacturing a wide range of standardized dairy products.

Keywords: separation, standardization of milk, cream, fat, fat loss, optimization, separator

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. **Mikhaylin, S.** Milk protein production by a more environmentally sustainable process; bipolar membrane electrodialysis coupled with ultrafiltration / S. Mikhaylin [et al.] // *Green Chemistry*. 2018. Vol. 2. P. 449–456. <https://doi.org/10.1039/c7gc02154b>
2. **Altin, K. T.** Antibacterial effects of saliva substitutes containing lysozyme or lactoferrin against *Streptococcus mutans* / K. T. Altin [et al.] // *Archives of Oral Biology*. 2021. Vol. 129. Art. no. 105183. <https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2021.105183>
3. **Багаев, А. А.** Результаты применения первой теоремы подобия к моделированию процессов электроконтактного нагрева жидкостей на основе экспериментальных данных / А. А. Багаев, Е. Б. Семенов // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2024. № 5(235). С. 70–78. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2024-235-5-70-78>; <https://elibrary.ru/hesxtk>
4. **Алексеев, Г. В.** Аналитическое исследование процесса импульсного (дискретного) теплового воздействия на перерабатываемое пищевое сырье / Г. В. Алексеев, Б. А. Вороненко, В. А. Головацкий // *Новые технологии*. 2012. № 2. С. 11–15. <https://elibrary.ru/parcyd>
5. **Agborambang, M. E.** Characterization of mixing by cfd simulation and optimization of mixing frequency to break scum and enhance methane yield in chinese dome digester / M. E. Agborambang [et al.] // *Bioenergy Research*. 2023. Vol. 16(3). P. 1902–1912. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10519-w>
6. **Чеботарев, Е. А.** Пути совершенствования процессов сепарирования молочного сырья / Е. А. Чеботарев, А. В. Малсугенов, А. Т. Борисов // *Евразийский союз ученых*. 2015. № 10-2(19). С. 166–169. <https://elibrary.ru/vbgygb>
7. **Matsumiya, K.** Effects of heat treatment and homogenization on milk fat globules and proteins in whipping creams / K. Matsumiya [et al.] // *Food Structure*. 2017. Vol. 12. P. 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2017.02.003>
8. **Остроумова, Т. А.** Влияние сезонных изменений молока на формирование мягких сыров / Т. А. Остроумова, А. П. Шитов // *Техника и технология пищевых производств*. 2009. № 2(13). С. 60–63. <https://elibrary.ru/kyupuf>
9. **Zhang, Z.** Mesoporous silica-coated gold nanorods as a light-mediated multifunctional theranostic platform for cancer treatment / Z. Zhang [et al.] // *Advanced Materials*. 2012. Vol. 24. P. 1418–1423. <https://doi.org/10.1002/adma.201104714>
10. **Bezerra, M. A.** Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry / M. A. Bezerra [et al.] // *Talanta*. 2008. Vol. 76(5). P. 965–977. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019>
11. **Буклагин, Д. С.** Ультразвуковые приборы контроля качества молока и молочной продукции / Д. С. Буклагин // *Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства*. 2019. № 1(33). С. 63–70. <https://elibrary.ru/zairbr>
12. **Tirado Kulieva, V. A.** An overview on the use of response surface methodology to model and optimize extraction processes in the food industry / V. A. Tirado-Kulieva [et al.] // *Current Research in Nutrition and Food Science*. 2021. Vol. 9(3). P. 745–754. <https://doi.org/10.12944/crnfsj.9.3.03>
13. **Datta, N.** Age gelation of UHT milk - A review / N. Datta, H.C. Deeth // *Food and Bioproducts Processing*. 2001. Vol. 79(4). P. 197–210. <https://doi.org/10.1205/096030801753252261>
14. **Zhao, L.** Effect of ultrasound pretreatment on rennet-induced coagulation properties of goat's milk / L. Zhao [et al.] // *Food Chemistry*. 2014. Vol. 165. P. 167–174. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.05.081>
15. **Wang, Y.** Graphene and graphene oxide: Biofunctionalization and applications in biotechnology / Y. Wang [et al.] // *Trends in Biotechnology*. 2011. Vol. 29(5). P. 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2011.01.008>

МОЛОЧНАЯ
ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

СЫРОДЕЛИЕ
МАСЛОДЕЛИЕ

ВНИМАНИЕ!
ПОДПИСКА

В редакции
podpiska.kemsu@mail.ru

