УДК [637.12'639:604]:519.8 https://doi.org/10.21603/1019-8946-2024-4-5

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МОЛОЧНОЙ ПИЩЕВОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

Наталья Борисовна Гаврилова, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры
Наталья Леонидовна Чернопольская, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры
E-mail: nl.chernopolskaya@omgau.org
Алия Жолатовна Агибаева, аспирант
Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина, г. Омск

Биотехнологические процессы производства молочных белковых продуктов, таких как творог и сыр на основе козьего молока, динамично развиваются. В связи с этим в научно-исследовательской работе поставлена цель – определить биотехнологические параметры процесса ферментации молочной пищевой системы, состоящей из козьего молока и соевой клетчатки, используемой в качестве пребиотика.
В процессе ферментации использовались два вида заквасочных культур: по первому варианту «Yolactis»-«Cottage-Cheese» и BB12; по второму варианту – «Творог», ООО «Зеленые линии» и BB12. Анализ экспериментальных данных проводился с использованием компьютерных программ Table-Curve 3d, MathCAD-Pro и программы для работы с электронными таблицами Excel. В результате разработаны математические модели на уровне одно- и двухфакторных зависимостей, что позволило установить наиболее эффективный вид заквасочной культуры – «Творог», ООО «Зеленые линии»; рассчитать параметры процесса ферментации не установленные экспериментальным путем.

Ключевые слова: биотехнология, козье молоко, соевая клетчатка, ферментация, математические модели

Для цитирования: Гаврилова, Н. Б. Разработка технологии молочной пищевой системы с использованием математического моделирования / Н. Б. Гаврилова, Н. Л. Чернопольская, А. Ж. Агибаева // Молочная промышленность. 2024. № 4. С. 82–87. https://www.doi.org/10.21603/1019-8946-2024-4-5

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время общемировым трендом является здоровый образ жизни, который успешно сочетается с поддержанием достойного физического состояния организма людей различного возраста и соблюдение рациона питания [1].

В России при поддержке государства интенсивно развиваются занятия любительским и профессиональным спортом, а также растет внимание к организации научных разработок функциональных и специализированных видов пищевой продукции для диетического, детского, диабетического, спортивного и других видов питания[1, 2].

В Российской Федерации, так же как в Республике Казахстан, с каждым годом успешно развивается козоводство в виде крупных промышленных и племенных ферм, мелких и средних крестьянских (фермерских) хозяйств, растет разнопородное стадо коз, в связи с чем существует необходимость в переработке козьего молока и производстве из него таких высокобелковых молочных продуктов, как творог и сыры [2, 3, 4, 5].

Необходимо отметить, что основным ингредиентом в биотехнологии кисломолочных (ферментированных) продуктов, в том числе творога и сыров, являются закваски[3, 4] [6, 7, 8, 9, 10]. Так как специалисты при реализации заквасок не указывают, для переработки какого молочного сырья они будут более востребованы, то необходимо проводить экспериментальные исследования по определению вида закваски и биотехнологических параметров производства молочных продуктов с их использованием. В связи с этим выбранное и реализуемое направление научных исследований является актуальным.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основными объектами исследований являлись:
– молоко козье по ГОСТ 32940-2014 «Молоко козье, сырое. Технические условия»;
– изолят соевого белка маркировки «SOY ISOLATE BELOK»;
– закваска «Yolactis»-«Cottage-Cheese»;
– закваска BB12 «Христиан Хансен»;
– культура заквасочная «Творог» ООО «Зеленые линии».

[1]Распоряжение Правительства РФ от 25 октября 2010 г. № 1873-р «Об утверждении Основ государственной политики РФ в области здорового питания населения на период до 2020 г.» [Электронный ресурс] URL: http://government.ru (дата обращения: 14.02.2024)
[2]Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 027/2012 «О безопасности отдельных видов специализированной пищевой продукции, в том числе диетического, лечебного и диетического профилактического питания». Утвержденешением Совета Евразийской экономической комиссии 15 июня 2012 года № 34.
[3]Шевелева, С. А. Пробиотики в пищевой индустрии: нормативная база, перспективы / С. А. Шевелева // Переработка молока. 2018. № 10(228). С. 30–35. https://elibrary.ru/yvlswl
[4]Шевелева, С. А. Пробиотики в пищевой индустрии: нормативная база, перспективы / С. А. Шевелева // Переработка молока. 2018. № 12(230). С. 16–19. https://elibrary.ru/srpcgt

Исследования проводились с использованием стандартных методов и современных приборов.

Разработка математических моделей проводилась с использованием компьютерных математических программ Table-Curve 3d, MathCAD-Pro и программы для работы с электронными таблицами Excel. Данные математические пакеты позволяют разрабатывать модели на уровне одно- и двухфакторных зависимостей, рассчитывать коэффициенты детерминации и корреляции модели (коэффициенты прогнозирования), проводить статистическую оценку абсолютной и относительной погрешности параметров исследуемого процесса[5].

Цель исследования – на основании математического моделирования определить биотехнологические параметры процесса ферментации молочной пищевой системы, состоящей из козьего молока и соевой клетчатки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе экспериментальных данных, полученных в процессе ферментации молочной пищевой системы, состоящей из козьего молока и соевой клетчатки с закваской «Yolactis»-«Cottage-Cheese» проведено моделирование.

Графическая иллюстрация результатов двухфакторного моделирования представлена на рисунках 1–10, в виде поверхностей отклика изменения параметров ферментации молочной системы с заквасочной культурой марки «Yolactis»-«Cottage-Cheese».

Математическая модель изменения активной кислотности молочной системы с данной закваской имеет вид:

$$Z1(x, y) = a + bx + c\ln(y), \text{ ед. pH} \quad (1)$$

где: Z1(x, y) – активная кислотность молочной системы, ед. pH; x – доза пребиотика, %; y – время свертывания, ч; Коэффициенты модели равны: a = 3,2179; b = 0,4977; c = 1,0886. Коэффициент детерминации модели равен R^2 = 0,983 Коэффициент корреляции модели равен R = 0,991.

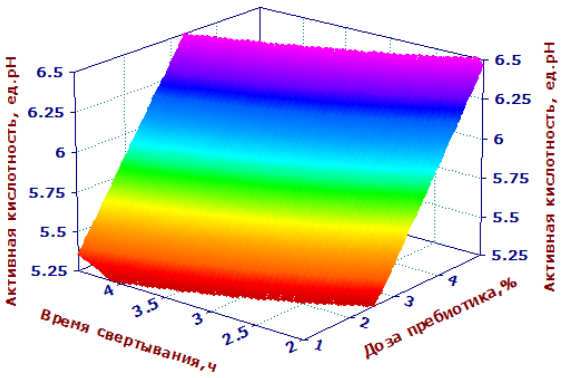

Рисунок 1. Поверхность отклика изменения активной кислотности в молочной системе, в зависимости от времени свертывания и дозы пребиотика с закваской «Yolactis»-«Cottage Cheese»

Относительная погрешность разработанной модели не превышает 2 %, а в комплексе с коэффициентом корреляции равным 0,991 можно утверждать о высоком уровне адекватности разработанной модели (соответственно минимальной ошибки прогнозирования ферментации процесса).

Спрогнозируем значение активной кислотности молочной системы при ферментации. Так, например, при дозе внесения пребиотика равной x = 5 % и времени свертывания y = 2 ч, получим величину активной кислотности Z(x, y) = 6,46 ед. pH. Экспериментальное значение кислотности при заданных параметрах равно 6,40 ед. pH. Расхождение между экспериментальным значением и модельным отличается на уровне сотых значений, что подчеркивает высокий уровень адекватности модели.

Разработанная модель изменения активной кислотности (формула 1) позволяет установить скорость изменения активной кислотности в зависимости от времени свертывания. Как известно для этого необходимо определить частную производную от функции Z(x,y) по независимой переменной y – времени свертывания, которая и будет характеризовать скорость (динамику) процесса ферментации.

$$d/dy\ Z1(x, y) = 1{,}0886/y, \text{ (ед. pH)/ч} \quad (2)$$

На рисунке 2 приведена поверхность отклика изменения скорости кислотонакопления в молочной системе с закваской «Yolactis»-«Cottage Cheese».

[5]Gavrilova, N. Application of the Method of Mathematical Modeling for the Analysis of Thermodynamic Parameters of the Process of Milk Biofermentation / N. Gavrilova, N. Chernopolskaya, S. Konovalov // Intelligent Biotechnologies of Natural and Synthetic Biologically Active Substances. XIV Narochanskie Readings. (5–7 October 2022). – Stavropol, Melville: AIP Conference Proceedings, 2023. Volume 2931 P. 040002-1–040002-8.

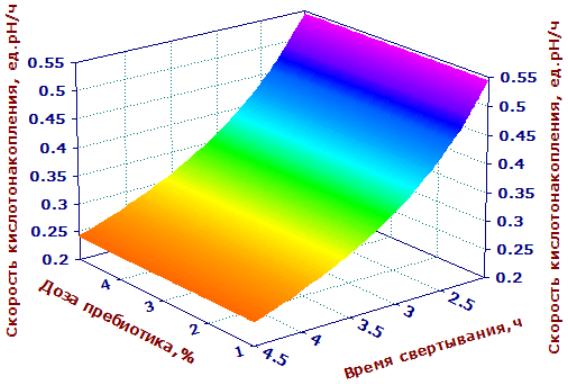

Рисунок 2. Поверхность отклика изменения скорости кислотонакопления в молочной системе с закваской «Yolactis»-«Cottage Cheese»

Подставив в формулу 2 интервал варьирования времени свертывания от 2 до 5 часов, получим значения скорости кислотонакопления в молочной системе. Данные расчетов приведены в таблице 1.

На рисунке 3 представлена графическая иллюстрация зависимости скорости кислотонакопления от времени свертывания.

Таблица 1
Изменение титруемой кислотности в процессе сквашивания культурой *Streptococcus thermophilus*

№	Время свертывания, ч	Скорость кислотонакопления, ед. pH/ч
1	2,0	0,544
2	2,5	0,435
3	3,0	0,363
4	3,5	0,311
5	4,0	0,272
6	4,5	0,242
7	5,0	0,218

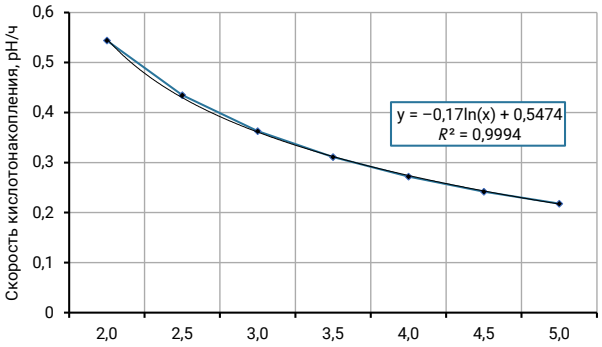

Рисунок 3. Логарифмическая зависимость скорости кислотонакопления в молочной системе с закваской «Yolactis»-«Cottage Cheese»

Источник изображения: unsplash.com

Коэффициент детерминации (прогнозирования) модели скорости кислотонакопления равен R^2 = 0,9994 (практически равен единице), что подчеркивает высокую адекватность представленной логарифмической зависимости. Модельные точки величин скорости идеально расположены на логарифмической функции.

Важным этапом моделирования процесса ферментации является определение числа микроорганизмов пробиотиков и бифидобактерий в исследуемой молочной системы. На рисунке 4 представлена поверхность отклика содержания пробиотиков в молочной системе.

Математическая модель изменения логарифма КОЕ пробиотиков в молочной системе представлена в следующем виде:

$$Z2(x, y) = a + bx1,5+c/y, \text{ КОЕ/г} \quad (3)$$

где: Z2(x, y) – логарифм КОЕ пробиотиков, КОЕ/г; x – доза пребиотика, %; y – время свертывания, ч; Коэффициенты модели равны: = 10,4167; b = 0,2196; c = −9,6727. Коэффициент детерминации модели равен R^2 = 0,999 Коэффициент корреляции модели равен R = 0,999.

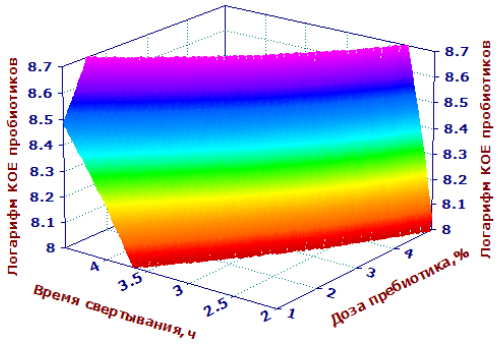

Рисунок 4. Поверхность отклика изменения логарифма КОЕ пробиотиков, в молочной системе с закваской «Yolactis»-«Cottage Cheese»

Скорость роста пробиотиков при ферментации приведена на рисунке 5.

Диаграмма изменения содержания бифидобактерий в молочной пищевой системе представлена на рисунке 6.

Математическая модель изменения логарифма КОЕ бифидобактерий в молочной системе имеет вид:

$$Z3(x, y) = a + bx + clny, \text{ КОЕ/г} \quad (4)$$

где Z3(x, y) – логарифм КОЕ бифидобактерий, КОЕ/г; x – доза пребиотика, %; y – время свертывания, ч; Коэффициенты модели: a = -8,8009; b = 1,7466; c = 9,020. Коэффициент детерминации модели равен R^2 = 0,977 Коэффициент корреляции модели равен R = 0,988.

Относительная погрешность модели числа бифидобактерий в молочной системе не превышает 2 % по абсолютной величине, что характеризует адекватность модели.

Скорость роста бифидобактерий в биосистеме представлена на рисунке 7.

На втором этапе исследований моделирование процесса ферментации молочной системы проводилось с закваской «Творог» ООО «Зеленные линии». На рисунке 8 изображена поверхность отклика изменения активной кислотности с отечественной заквасочной культурой марки «Творог» ООО «Зеленые линии».

Математическая модель изменения активной кислотности в молочной системе имеет вид:

$$Z4(x, y) = a + bx + cy + dy2, \text{ ед.pH} \quad (5)$$

где Z4(x, y) – активная кислотность молочной системы, ед. pH; x – доза пребиотика, %; y – время свертывания, ч; Коэффициенты равны: a = 7,9825; b = 0,0812; c = -1,8637; d = 0,2964. Коэффициент детерминации модели равен R^2 = 0,985 Коэффициент корреляции модели равен R = 0,992.

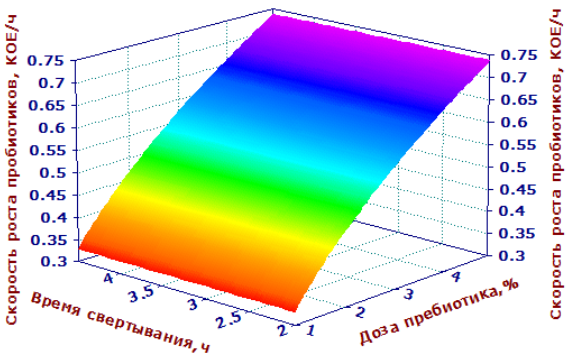

Рисунок 5. Скорость роста КОЕ пробиотиков в молочной системе, с закваской «Yolactis»-«Cottage Cheese»

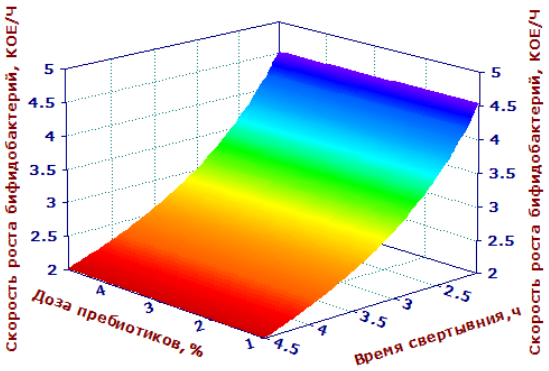

Рисунок 7. Скорость роста бифидобактерий в молочной системе с заквасочной культурой марки «Yolactis»-«Cottage Cheese»

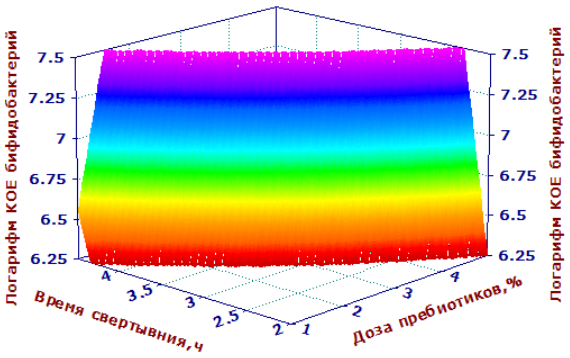

Рисунок 6. Поверхность отклика изменения логарифма КОЕ бифидобактерий, в молочной системе с закваской «Yolactis»-«Cottage Cheese»

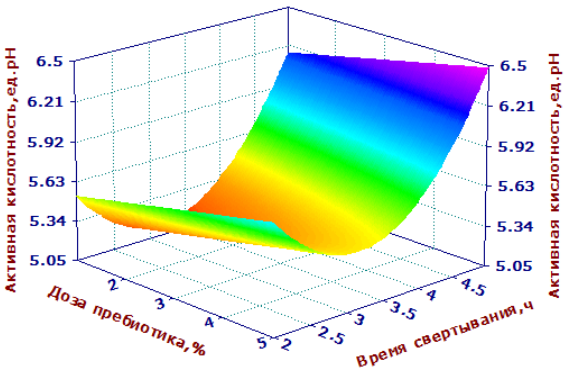

Рисунок 8. Поверхность отклика изменения активной кислотности в молочной системе, с заквасочной культурой «Творог» ООО «Зеленые линии»

Скорость кислотонакопления в молочной системе представлена на рисунке 9.

Скорость кислотонакопления выражена линейной зависимостью следующего вида:

$$d/dy\ Z5(x, y) = -1{,}8638 + 0{,}5928y\ (\text{ед. pH})/\text{ч} \qquad (6)$$

где: Z5(x, y) – скорость кислотонакопления молочной системы, ед. pH/ч.

Расчет значений скорости кислотонакопления осуществлялся по разработанной в MathCAD Pro авторской программе.

Так, например, при времени свертывания равным y = 3,5 ч, скорость накопления молочной кислоты составит 0,221 ед. pH/ч.

На рисунке 10 изображена поверхность отклика изменения логарифма КОЕ пробиотиков в молочной системе с закваской «Творог».

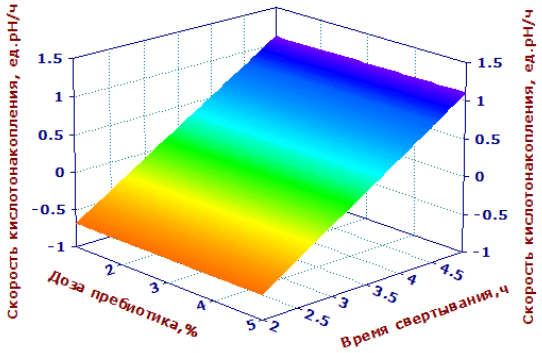

Рисунок 9. Скорость кислотонакопления в молочной системе с заквасочной культурой «Творог» ООО «Зеленые линии»

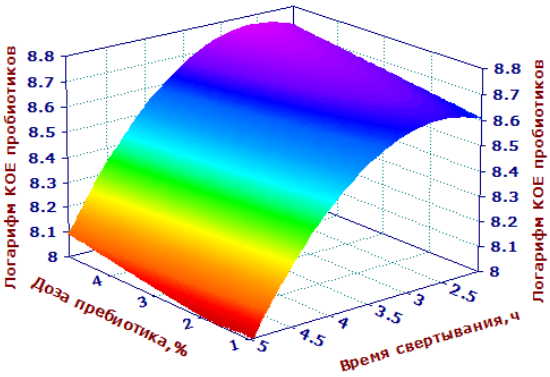

Рисунок 10. Поверхность отклика изменения десятичного логарифма КОЕ пробиотиков в молочной системе, с использованием закваски «Творог»

Математическая модель в данном случае имеет вид:

$$Z6(x, y) = a + bx + cy + dy2 \qquad (7)$$

Коэффициенты модели: a = 7,8754; b = 0,02966; c = 0,5765; d = −0,1125. Коэффициент детерминации (прогнозирования): R^2 = 0,965. Коэффициент корреляции: R = 0,982. Относительная погрешность модели не превышает 1 %, что позволяет утверждать, что математическая модель обладает высокой достоверностью прогнозирования процесса.

На рисунке 11 изображена поверхность отклика изменения содержания бифидобактерий в исследуемой молочной пищевой системе. Погрешность модели не превышает 3 % по абсолютной величине, модель адекватно – с минимальной ошибкой описывает процесс ферментации.

Для сравнительной оценки активности заквасочных культур в работе использовались два варианта: 1 – закваска «Yo*lactis*» - «Cottage Cheese» совместно с BB12, 2 – заквасочная культура «Творог» ООО «Зеленые линии» совместно с BB12. Ставилась задача, определить какая из данных двух заквасок обладает повышенной активностью при ферментации пищевой молочной системы: козье молоко и соевая клетчатка. Применяли метод сравнения скоростей кислотонакопления в молочных системах с представленными заквасками. На рисунке 12 изображены линейные корреляционные зависимости скорости кислотонакопления заквасочных культур.

Верхняя линия на рисунке 12 характеризует скорость кислотонакопления в молочной системе с закваской марки «Творог». Линейная корреляционная зависимость выражается уравнением y = 0,2964x − 0,0855. Коэффициент детерминации модели равен R^2 = 1. Нижняя линия характеризует скорость кислотонакопления

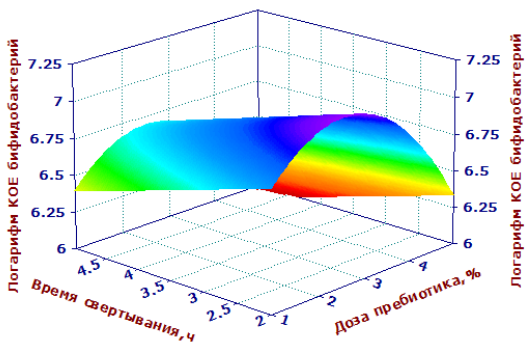

Рисунок 11. Поверхность отклика содержания бифидобактерий в молочной системе с закваской «Творог»

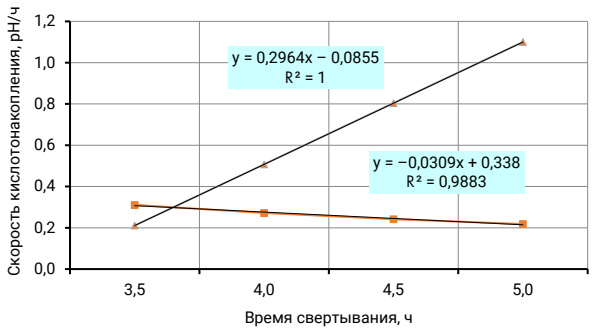

Рисунок 12. Сравнительная оценка активности используемых заквасочных культур

в системе с закваской марки «Yolactis». Линейная зависимость представлена уравнением y = –0,0309x + 0,338. Коэффициент детерминации модели равен R^2 = 0,9883.

Таким образом до значения времени свертывания равным 3,5 ч активность двух заквасок практически одинаковая, после 3,5 ч видно, что закваска «Творог» обладает большим потенциалом. Заквасочная культура «Творог» является предпочтительней, чем закваска «Yolactis».

ВЫВОДЫ

В результате анализа экспериментальных данных математического моделирования сделаны следующие выводы:

– разработаны математические модели процесса ферментации молочной пищевой системы, состоящей из козьего молока и соевой клетчатки, с использованием двух видов заквасочных культур – «Yolactis» и «Творог». Модели отличаются высоким уровнем адекватности, коэффициенты корреляции моделей по величине составляет более 0,95, а относительная погрешность не превышает 0,5 %;

– разработанные математические модели позволяют осуществлять прогнозирование параметров процесса ферментации, т. е. рассчитывать показатели процесса не установленные экспериментальным путем и определять скорость кислотонакопления в процессе ферментации;

– заквасочная культура «Творог» ООО «Зеленые линии» обладает большей потенциальной активностью, чем закваска «Yolactis»-«Cottage-Cheese». Определены параметры биотехнологии с ее использованием. ■

MATHEMATICAL SIMULATION OF DAIRY FOOD TECHNOLOGY

Natalia B. Gavrilova, Natalia L. Chernopolskaya, Aliya Zh. Agibayeva
Omsk State Agrarian University named after P. Stolypin, Omsk

ORIGINAL ARTICLE

Goat cottage cheese and cheese are popular dairy protein products. This article describes biotechnological parameters for fermenting a dairy food system from goat's milk and soy fiber as prebiotic. The research featured two types of starter cultures: 1) Yolactis (Cottage-Cheese) + BB12; 2) Tvorog (Zelyonye Linii) + BB12. The experimental data were analyzed using Table-Curve 3d, MathCAD-Pro, and Excel. The resulting mathematical models demonstrated single-phase and two-factor dependencies, which proved that Tvorog (Zelyonye Linii) was the most effective starter culture. The method of mathematical simulation also made it possible to calculate those fermentation variables that were not established experimentally.

Keywords: biotechnology, goat's milk, soy fiber, fermentation, mathematical simulation

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Щетинина, Е. М.** Современные аспекты использования козьего молока в биотехнологии мягких и полутвердых сыров: монография / Е. М. Щетинина, Н. Б. Гаврилова. –Омск: Изд-во Омского ГАУ, 2021. — 184 с.
2. **Рыбалова, Т. И.** Сыроделие и маслоделие: итоги 2018 г / Т. И. Рыбалова // Сыроделие и маслоделие. 2019. № 1. С. 4–8. https://elibrary.ru/vvhhsa
3. **Гаврилова, Н. Б.** Перспективы производства специализированной пищевой продукции на основе молока коз Алтайского края / Н. Б. Гаврилова, Е. М. Щетинина // Молочная промышленность. 2019. № 6. С. 56–57. https://doi.org/10.31515/1019-8946-2019-6-56-57; https://elibrary.ru/kkizkk
4. **Темербаева, М. В.** Использование молока различных сельскохозяйственных животных для производства ферментированных продуктов / М. В. Темербаева, Н. Б. Гаврилова, Е. А. Молибога // Молочная промышленность. 2018. № 10. С. 46–48. https://doi.org/10.31515/1019-8946-2018-10-46-48; https://elibrary.ru/yamkxb
5. **Горлов, И. Ф.** Новое в производстве функциональных продуктов из козьего молока / И. Ф. Горлов, Н. И. Мосолова, А. А. Короткова // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2012. № 4. С. 16–18. https://elibrary.ru/pdfslh
6. **Ганина, В. И.** Рынок заквасок в России / В. И. Ганина // Молочная промышленность. 2018. № 12. С. 29–30. https://elibrary.ru/vnpeva
7. **Зипаев, Д. В.** Биотехнология заквасок для молочной промышленности. Культивирование микроорганизмов / Д. В. Зипаев, Л. В. Красникова // Молочная промышленность. 2019. № 8. С. 32–34. https://elibrary.ru/zzlzfz
8. **Маяускайте, В.** Роль защитных культур в современном мире / В. Маяускайте, М. Хесселинг // Молочная промышленность. 2017. № 12. С. 28–29. https://elibrary.ru/zuvpnz
9. **Свириденко, Г. М.** Использование защитных культур. Теоретические аспекты / Г. М. Свириденко, Н. П. Сорокина // Молочная промышленность. 2018. № 7. С. 25–28. https://elibrary.ru/uvdfge
10. **Чернопольская, Н. Л.** Научно-практические аспекты биотехнологии специализированной пищевой продукции на молочной основе с использованием иммобилизации заквасочных (пробиотических) культур : монография / Н. Л. Чернопольская, Н. Б. Гаврилова.– Омск: Изд-во ФГБОУ ВО Омский ГАУ, 2019. – 351 с.