

УДК 535.65, 637.07

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-32-38

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ ЦВЕТА РЕДУКТАЗНОЙ ПРОБЫ С РЕЗАЗУРИНОМ КАК ОСНОВА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МОЛОКА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ХРАНЕНИЯ

Е.В. Горбунова, А.Н. Чертов, Е.А. Сычева, Д.Е. Трошкин, А.А. Алёхин, А.А. Горбачёв

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
 Адрес для переписки: a.n.chertov@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 14.11.19, принята к печати 09.12.19

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Горбунова Е.В., Чертов А.Н., Сычева Е.А., Трошкин Д.Е., Алёхин А.А., Горбачёв А.А. Теоретическая модель изменения цвета редуктазной пробы с резазурином как основа контроля качества молока в процессе его хранения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 1. № 1. С. 32–38. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-32-38

Аннотация

Предмет исследования. Приведено теоретическое обоснование возможности перехода от органолептического анализа качества молока на соответствие требованиям государственного стандарта к объективному контролю на основании количественной оценки инструментальным методом. Предложена теоретическая модель изменения цвета редуктазной пробы молока в зависимости от его бактериальной обсемененности. **Методы.** Предлагаемая модель базируется на известных закономерностях протекания химического процесса взаимного превращения резазурина, резозурина и гидрорезозурина и влияния концентрации красящих веществ на цвет получаемого раствора для гомогенных и негомогенных сред. Для построения модели были измерены реальные спектры пропускания указанных веществ. С целью верификации теоретической модели методом редуктазной пробы проведены эксперименты по исследованию изменения качества образца молока, поставляемого в магазины, при его хранении. Продолжительность эксперимента составила три дня до момента скисания молока. Между измерениями молоко хранилось при температуре +4 °С. При экспериментальном исследовании построена теоретическая зависимость изменения цвета пробы с учетом реального спектра пропускания молока. Проведены измерения спектров пропускания редуктазной пробы. По полученным в результате моделирования и эксперимента спектрам пропускания рассчитаны координаты цветности (x, y) пробы. Для визуализации изменения цвета пробы рассчитаны координаты цвета в цветовом пространстве sRGB для случая источника типа D65, эквивалентного дневному освещению. **Основные результаты.** Установлено, что результаты моделирования полностью согласуются с проведенными экспериментальными исследованиями. Расхождение результатов теоретического моделирования с экспериментальными данными по значениям координат цветности не превышает в среднем 0,01. Показано, что предложенная модель позволяет рассчитать концентрацию ферментов редуктазной пробы с резазурином в любой момент времени, определить ее координаты цветности и цвет в соответствии со стандартами Международной комиссии по освещению для прозрачных и полупрозрачных сред. **Практическая значимость.** Полученная зависимость изменения во времени координат цветностей и цвета редуктазной пробы с резазурином может найти применение при контроле качества молока методами спектрофотометрии и технического зрения.

Ключевые слова

молоко, резазурин, бактериальная обсемененность, цвет, спектральная характеристика пропускания, координаты цветности, контроль качества

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-32-38

THEORETICAL MODEL OF COLOR CHANGE FOR MILK REDUCTASE SAMPLE WITH RESAZURIN FOR MILK QUALITY CONTROL DURING ITS STORAGE

E.V. Gorbunova, A.N. Chertov, E.A. Sycheva, D.E. Troshkin, A.A. Alekhin, A.A. Gorbachev

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
 Corresponding author: a.n.chertov@mail.ru

Article info

Received 14.11.19, accepted 09.12.19

Article in Russian

For citation: Gorbunova E.V., Chertov A.N., Sycheva E.A., Troshkin D.E., Alekhin A.A., Gorbachev A.A. Theoretical model of color change for milk reductase sample with resazurin for milk quality control during its storage. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 32–38 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-32-38

Abstract

Subject of Research. The paper deals with theoretical justification of moving from an organoleptic analysis of milk quality in accordance with the requirements of the national standard to objective control based on quantitative assessment by an instrumental method. We propose a theoretical model for changes in color of milk reductase sample depending on its bacterial contamination. **Methods.** The proposed model was based on the known patterns of the chemical process of resazurin, resofurin and hydroresofurin mutual transformation, as well as the impact of the concentration of coloring matters on the resulting solution color for homogeneous and inhomogeneous media. Real transmission spectra of the mentioned substances were measured for model development. For theoretical model verification, experimental studies of quality changes during the storage of a milk sample, which was delivered to a shop, were carried out by reductase method. The experiment duration was 3 days, until the souring of milk. The milk was stored between the measurements at the temperature of +4 °C. A theoretical dependence of color changes for the reductase sample of milk was built during the experiment taking into account real transmission spectrum of milk. Real transmission spectra of the reductase sample were measured. The chromaticity coordinates (x , y) of the sample were calculated from the transmission spectra obtained through the modeling and measurement. To visualize the color change of the sample, the color coordinates in the sRGB color space were calculated for the case of a D65 light source, which is equivalent to daylight. **Main Results.** The simulation results are completely consistent with the results of experimental studies. The discrepancy between the results of theoretical modeling and experimental data does not exceed, on the average, 0.01 for the chromaticity coordinates x and y . The proposed model gives the possibility to calculate the concentration of enzymes for reductase sample with resazurin at any time, and, as a result, determine its color coordinates and color in accordance with the standards of the International Commission on Illumination for transparent and translucent media. **Practical Relevance.** The obtained temporal dependence of the chromaticity coordinates and the color of the reductase sample with resazurin can be used to control milk quality by spectrophotometric method and the method of technical vision.

Keywords

milk, resazurin, bacterial contamination, color, spectral transmittance, color coordinates, quality control

Введение

Главным показателем качества молока является его безопасность для потребителя. В рамках оценки качества молока по микробному загрязнению существует понятие бактериальной обсемененности, которое наиболее точно характеризует санитарно-гигиенические условия его получения. От количества бактерий, находящихся в молоке, зависит сортность реализуемой продукции, следовательно, данный параметр требует постоянного контроля.

Согласно ГОСТ¹, метод определения уровня бактериальной обсемененности молока основан на изменении цвета резазурина при восстановлении его окислительно-восстановительными ферментами, выделяемыми в молоко микроорганизмами в результате их жизнедеятельности. В частности ферментом, катализирующим окислительно-восстановительные реакции в живых организмах, является редуктаза (анаэробная дегидрогеназа) [1]. Размножение бактерий приводит к накоплению в молоке различных дегидрогеназ, а также к возрастанию активности их ферментов. Об уровне активности ферментов и общем количестве бактерий в молоке свидетельствует изменение цвета индикатора бактериального заражения молока с одного оттенка на другой. В качестве индикатора можно использовать слабый органический краситель, например, раствор метиленовой сини или резазурина, так как при добавлении в молоко он обесцвечивается редуктазой. Именно на скорости протекания процесса обесцвечивания основана редуктазная проба — метод проверки бактериального заражения молока.

¹ ГОСТ 32901–2014 Молоко и молочная продукция. Методы микробиологического анализа. Введен 01.01.2016. М.: Стандартинформ, 2015. 28 с.

В зависимости от изменения цвета молоко относят к одному из классов качества (рис. 1).

Цвета от серо-сиреневого до сиреневого со слабым серым оттенком характеризуют молоко с ориентировочным количеством бактерий до 500 тыс. в 1 см³ (класс I). Сиреневая с розовым оттенком или ярко-розовая окраска пробы характеризует молоко с ориентировочным количеством бактерий от 500 тыс. до 4 млн в 1 см³ (класс II). Цвета от бледно-розового до белого оттенков характеризуют молоко с ориентировочной бактериальной обсемененностью от 4 до 20 млн жизнеспособных клеток в 1 см³ (класс III).

В настоящее время, в соответствии с ГОСТ, определение цвета осуществляется субъективным визуальным методом, не способным обеспечить высокую точность оценки. Внедрение инструментального подхода в процесс контроля качества молока позволило бы изменить эту ситуацию.

Целью настоящей работы является поиск корреляционной зависимости между изменением цвета редуктазной пробы и уровнем ориентировочной бактериальной обсемененности молока.

Авторами предложена соответствующая теоретическая модель, основанная на изменении координат цветности и цвета редуктазной пробы в ходе протекающей реакции взаимодействия резазурина с продуктами жизнедеятельности бактерий.

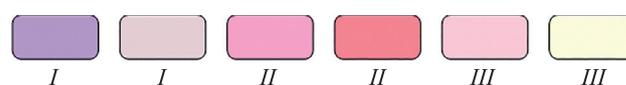


Рис. 1. Цветовая шкала для определения класса молока по редуктазной пробе с резазурином: I — класс I; II — класс II; III — класс III

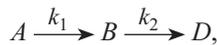
Теоретическая модель

В основе разработанной модели — химическая окислительно-восстановительная реакция взаимодействия индикатора резазурина с продуктами жизнедеятельности бактерий, в ходе которой индикатор, окрашенный в сине-фиолетовый оттенок, лишается кислорода и превращается в соединение резофурина, обладающее розовым оттенком (рис. 2). Резофурин в свою очередь забирает водород и превращается в бесцветный гидрорезофурин.

В ходе экспериментальных исследований, проведенных в соответствии со стандартными методиками спектрофотометрических измерений [2], были получены спектры пропускания указанных выше веществ (рис. 3).

На основании полученных спектров пропускания чистых резазурина, резофурина и гидрорезофурина и закономерностей протекания химического процесса их взаимного превращения возможно построить теоретическую зависимость изменения цвета редуктазной пробы.

Введем некоторые допущения для построения теоретической модели. Будем считать, что реакции превращения веществ являются необратимыми, а сами превращения являются последовательными, т. е. происходят по следующему правилу:



где вещества: *A* — резазурин, *B* — резофурин, *D* — гидрорезофурин; k_1 — константа скорости превращения резазурина (*A*) в резофурин (*B*); k_2 — константа скорости превращения резофурина (*B*) в гидрорезофурин (*D*).

Пусть $C(t)$ — количество прореагировавшего резазурина в момент времени t ; $C_A(t)$ — количество резазурина в момент времени t ; $C_B(t)$ — количество резофурина в момент времени t ; $C_D(t)$ — количество гидрорезофурина в момент времени t . При времени $t = 0$ количества $C(t) = C_B(t) = C_D(t) = 0$, а $C_A(t) = a$, где a — исходное количество резазурина.

Для реакции превращения резазурина в резофурин имеем [3]

$$\frac{dC}{dt} = k_1(a - C). \tag{1}$$

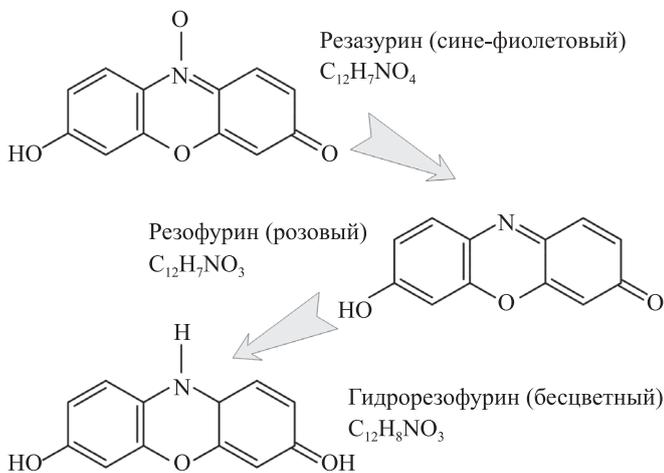


Рис. 2. Химические превращения резазурина

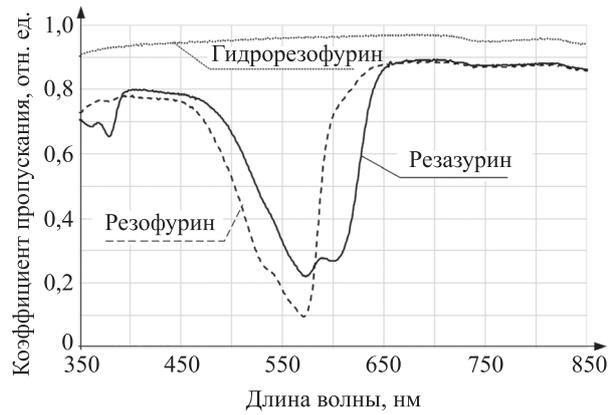


Рис. 3. Спектры пропускания резазурина, резофурина и гидрорезофурина (толщина образца 1 мм)

Из данного соотношения получаем:

$$\frac{-dC}{(a - C)} = -k_1 dt.$$

Очевидно, что левая часть равенства представляет собой производную от $\ln(a - C)$, следовательно, выполнив необходимые преобразования с учетом указанных выше допущений, данное равенство можно записать в виде:

$$C_A(t) = a - C(t) = a \exp\{-k_1 t\}. \tag{2}$$

Соответственно, количество прореагировавшего резазурина в момент времени t может быть рассчитано по формуле

$$C(t) = a(1 - \exp\{-k_1 t\}). \tag{3}$$

Количество резофурина в момент времени t определяется соотношением

$$C_B(t) = C(t) - C_D(t), \tag{4}$$

тогда, по аналогии с (1), скорость превращения резофурина можно записать в следующем виде:

$$\frac{dC_B}{dt} = k_1(a - C) - k_2(C - C_D). \tag{5}$$

Подставляя формулы (2) и (4) в выражение (5) получаем:

$$\frac{dC_B}{dt} + k_2 C_B = k_1 a \exp\{-k_1 t\}.$$

После умножения обеих частей уравнения на $\exp\{-k_2 t\}$ получаем:

$$\frac{dC_B}{dt} \exp\{k_2 t\} + k_2 C_B \exp\{k_2 t\} = k_1 a \exp\{(k_2 - k_1)t\}. \tag{6}$$

Очевидно, что левая часть равенства (6) представляет собой производную сложной функции $F(t) = C_B(t) \exp\{k_2 t\}$. Следовательно, можно записать следующее выражение

$$[C_B(t) \exp\{k_2 t\}]' = k_1 a \exp\{(k_2 - k_1)t\}. \tag{7}$$

Проинтегрируем правую часть равенства в пределах от 0 до t :

$$\int_0^t k_1 a \exp\{(k_2 - k_1)t\} dt = \frac{k_1 a}{k_2 - k_1} [\exp\{(k_2 - k_1)t\} - 1]. \quad (8)$$

Поскольку $C_B(0) = 0$, то константа интегрирования равна 0, поэтому из выражений (7) и (8) получаем:

$$C_B(t) \exp\{k_2 t\} = \frac{k_1 a}{k_2 - k_1} [\exp\{(k_2 - k_1)t\} - 1].$$

Следовательно, функцию для определения количества резозурина в каждый момент времени t можно представить в виде:

$$C_B(t) = \frac{k_1 a}{k_2 - k_1} \frac{[\exp\{(k_2 - k_1)t\} - 1]}{\exp\{k_2 t\}} = \frac{k_1 a}{k_2 - k_1} [\exp\{-k_1 t\} - \exp\{-k_2 t\}]. \quad (9)$$

Для определения выражения для расчета количества гидрорезозурина (4) в любой момент времени t рассмотрим выражение

$$C(t) - C_D(t) = \frac{k_1 a}{k_2 - k_1} [\exp\{-k_1 t\} - \exp\{-k_2 t\}]. \quad (10)$$

Подставляя в выражение (10) формулу (3) получаем:

$$C_D(t) = a(1 - \exp\{-k_1 t\}) - \frac{k_1 a}{k_2 - k_1} [\exp\{-k_1 t\} - \exp\{-k_2 t\}]$$

или

$$C_D(t) = a \left(1 - \frac{k_2}{k_2 - k_1} \exp\{-k_1 t\} + \frac{k_2}{k_2 - k_1} \exp\{-k_2 t\} \right). \quad (11)$$

Все рассмотренные функции изменения количества резозурина $C_A(t)$, резозурина $C_B(t)$ и гидрорезозурина $C_D(t)$ в смеси от времени представлены на рис. 4 при значениях $k_1 = 1,5$ и $k_2 = 1$.

Время, когда количество резозурина достигает своего максимального значения (t_{\max}), можно рассчитать по правилу нахождения экстремума функции, т. е. найти такое значение t , при котором производная от функции $C_B(t)$ будет равна 0.

$$\frac{dC_B}{dt} = 0.$$

Указанную производную можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dC_B}{dt} &= \left[\frac{k_1 a}{k_2 - k_1} [\exp\{-k_1 t\} - \exp\{-k_2 t\}] \right]' = \\ &= \frac{k_1 a}{k_2 - k_1} [k_2 \exp\{-k_2 t\} - k_1 \exp\{-k_1 t\}]. \end{aligned}$$

Тогда при $t = t_{\max}$ имеем

$$\frac{k_1 a}{k_2 - k_1} [k_2 \exp\{-k_2 t_{\max}\} - k_1 \exp\{-k_1 t_{\max}\}] = 0.$$

Таким образом, получаем:

$$\exp\{(k_1 - k_2)t_{\max}\} = \frac{k_1}{k_2}.$$

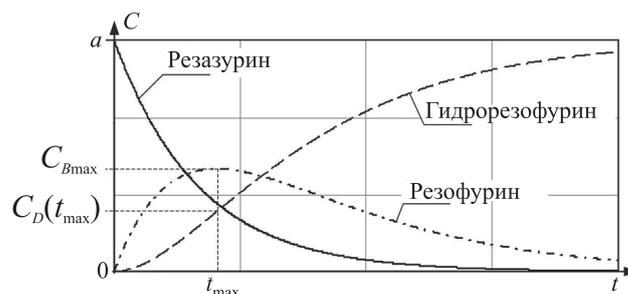


Рис. 4. Динамика изменения концентрации веществ (C) от времени (t) в смеси в ходе химической реакции превращения резозурина: a — исходное количество резозурина; t_{\max} — время, когда количество резозурина достигает своего максимального значения; $C_{B\max}$ — максимальное количество резозурина; $C_D(t_{\max})$ — количество гидрорезозурина в момент времени t_{\max}

Прологарифмировав последнее выражение, имеем

$$(k_1 - k_2)t_{\max} = \ln(k_1) - \ln(k_2).$$

Следовательно, время достижения функцией количества резозурина своего максимума рассчитывается по соотношению

$$t_{\max} = \frac{\ln(k_1) - \ln(k_2)}{(k_1 - k_2)}. \quad (12)$$

Именно в этот момент времени редуцтазная проба приобретает яркий и насыщенный розовато-малиновый оттенок, поскольку концентрация резозурина, имеющего ярко-розовый цвет, достигает своего максимума, и присутствует некоторое количество непрореагировавшего сине-фиолетового резозурина. Далее происходит обесцвечивание раствора, поскольку увеличивается только концентрация бесцветного гидрорезозурина, а концентрации сине-фиолетового резозурина и розового резозурина убывают. Из формулы (12) видно, что этот момент времени (t_{\max}) не зависит от исходных концентраций веществ в растворе, а определяется только значениями констант скоростей химических реакций, которые определяются количеством активных бактерий в молоке.

Определим формулу расчета максимального значения функции количества резозурина $C_B(t_{\max})$.

Пусть константа скорости превращения резозурина в гидрорезозуринов (k_2) линейно зависит от константы скорости превращения резозурина в резозурин (k_1)

$$k_2 = rk_1,$$

где r — некоторая постоянная.

Следовательно, выражение для определения времени достижения резозурином своего максимального количества можно преобразовать до следующего вида:

$$t_{\max} = \frac{\ln(k_1) - \ln(rk_1)}{(k_1 - rk_1)} = \frac{\ln(r)}{k_1(r - 1)}.$$

Соответственно,

$$\begin{aligned} C_B(t_{\max}) &= \frac{k_1 a}{k_2 - k_1} [k_2 \exp\{-k_2 t_{\max}\} - k_1 \exp\{-k_1 t_{\max}\}] = \\ &= \frac{a}{r - 1} \left[\exp\left\{ \frac{-\ln(r)}{(r - 1)} \right\} - \exp\left\{ \frac{-r \ln(r)}{(r - 1)} \right\} \right]. \end{aligned}$$

Именно это значение определяет, насколько насыщенным будет измененный розовый оттенок раствора.

Исходя из полученных функций изменения количества резазурина (формула (2)), резозурина (формула (9)) и гидрорезозурина (формула (11)) в растворе, и известных функций пропускания указанных веществ (рис. 2), можно построить теоретические спектры пропускания раствора в разные моменты времени t в соответствии с законом Бугера–Ламберта–Бера для однородного раствора поглощающих свет молекул [4, 5]. Для удобства визуализации изменения цвета раствора, разделим представленный на рис. 3 диапазон изменения времени на 15 равных частей (временной промежуток для моделирования пусть будет равен 0,4 ч). В каждый из указанных моментов времени у раствора будет разный спектр пропускания (рис. 5).

По полученным теоретическим спектрам пропускания резазурино-резозурино-гидрорезозуриновой смеси в воде по классическим колориметрическим методикам расчета [6, 7] можно получить для нее (смеси) теоретическое изменение координат цветностей в зависимости от времени, представленное на рис. 6.

По данному графику видно, что с течением времени координаты цветностей раствора стремятся к координатам цветностей белого цвета (W). Поскольку в данной теоретической модели рассматривался водный раствор, а вода не обладает какой-либо цветностью, то можно предположить, что для раствора в молоке координаты цветностей реального раствора с течением времени будут стремиться к координатам цветностей чистого молока.

При этом следует заметить, что промежутки времени одинаковые, а расстояния между точками, характеризующими ближайшие координаты цветностей раствора разные и, по мере увеличения значения t , сокращаются (рис. 6, а). Соответственно, если по прошествии одного и того же времени цвета растворов разные, то это говорит о различии констант скоростей химических реакций, которые определяются количеством активных бактерий в исследуемом растворе. На рис. 6, б представлен теоретический ряд изменения цвета раствора с течением времени.

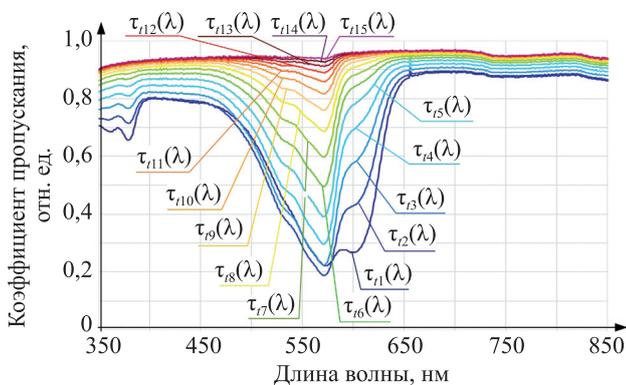


Рис. 5. Теоретическое изменение спектрального распределения коэффициента пропускания ($\tau(\lambda)$) смеси резазурина, резозурина и гидрорезозурина в воде в разные моменты времени (t) в ходе протекания последовательных химических реакций превращения резазурина в резозурин и резозурина в гидрорезозуридин (толщина образца 1 мм)

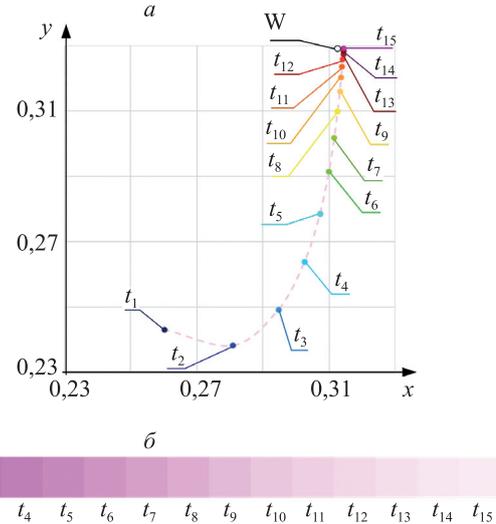


Рис. 6. Теоретическое изменение во времени координат цветности (а) и изменение цвета (б) смеси в воде (при освещении источником типа D65)

Сопоставление результатов численного моделирования с экспериментальными данными

Для оценки адекватности предложенной модели был проведен эксперимент с образцами редуктазной пробы покупного молока. Между измерениями молоко хранилось в холодильнике при температуре +4 °С. Эксперимент продолжался три дня, от момента покупки до момента скисания.

Эксперимент состоял из двух частей.

Сначала, с учетом ранее рассчитанных теоретических изменений во времени спектра пропускания смеси резазурина, резозурина и гидрорезозурина в воде (рис. 5), а также измеренного реального спектра пропускания молока, рассчитывались спектры пропускания смеси молока с красителем.

Затем проводились измерения спектров пропускания редуктазной пробы.

В обоих случаях по полученным в результате моделирования или измерения спектрам пропускания рассчитывались координаты цветности пробы.

Параметры приготовления смеси, концентрация красителя, а также время выдержки редуктазной пробы в редуктазнике брались в строгом соответствии с ГОСТ.

Результаты моделирования и полученные экспериментальные данные приведены на рис. 7, а.

По завершении эксперимента были рассчитаны координаты цвета в цветовом пространстве sRGB для случая дневного освещения (источником типа D65) по стандартной методике, принятой Международной комиссией по освещению. Результаты визуализации цвета приведены на рис. 7, б.

Как видно из рис. 7, характер изменения цвета редуктазной пробы после выдержки в редуктазнике соответствует характеру рассчитанной теоретической зависимости. Подробно проведенный эксперимент описан в работе [8].

В силу малых различий между результатами теоретического моделирования и результатов эксперимента (в среднем около 0,01 по осям x и y) можно заключить,

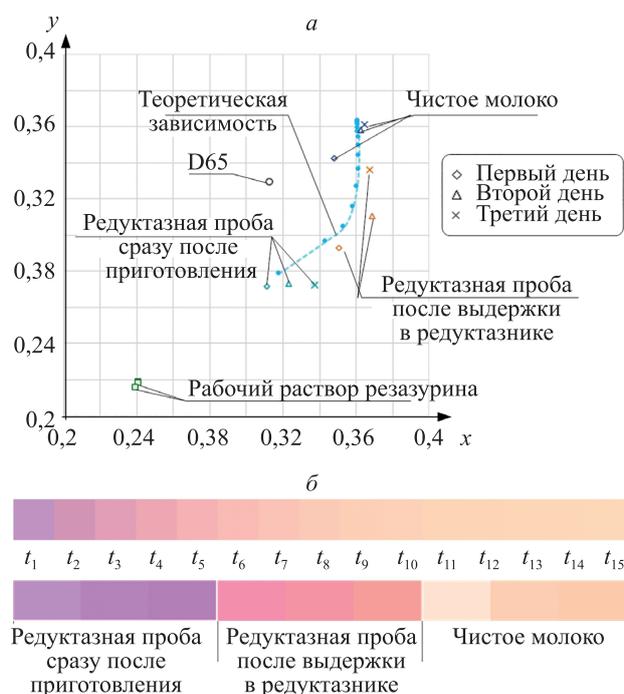


Рис. 7. Сравнение результатов теоретического моделирования изменений во времени координат цветности редуктазной пробы и экспериментальных результатов (а), а также сравнение соответствующих цветов пробы (при освещении источником типа D65) (б)

что теоретическая модель изменения цвета резазурина, как основа контроля качества молока в процессе его хранения, полностью согласуется с экспериментальными данными.

Заключение

Таким образом, впервые предложена и экспериментально подтверждена теоретическая модель изменения цвета редуктазной пробы молока в процессе изменения его качества.

Модель основана на анализе бактериальной обсеменности молока путем исследования изменения цвета редуктазной пробы в определенный ГОСТ промежуток времени. Изменение цвета определяется скоростями превращения резазурина в резозурины, а затем в гидро-резозурины, которые в свою очередь определяются активностью ферментов бактерий (анаэробных дегидрогеназ) и общим количеством бактерий, содержащихся в молоке.

Модель может быть предложена в качестве теоретической основы для реализации объективного инструментального метода контроля качества молока. При этом в качестве методов контроля могут быть использованы как классический спектрофотометрический метод с последующим расчетом координат цветностей, так и метод технического зрения с определением координат цвета по результатам обработки цветных изображений.

Литература

1. Биохимия и микробиология молока и молочных продуктов: учебное пособие: в 2 частях. Ч. 1 / сост. Н.А. Савелькина. Брянск: Мичуринский филиал ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет», 2015. 129 с.
2. Шмидт В. Оптическая спектроскопия для химиков и биологов: пер. с англ. М.: Техносфера, 2007. 368 с.
3. Панченков Г.М., Лебедев В.П. Химическая кинетика и катализ: учеб. пособие для вузов, 3-е изд. испр. и доп. М.: Химия, 1985. 592 с.
4. Уэйн Р. Основы и применения фотохимии: пер. с англ. М.: Мир, 1991. 304 с., ил.
5. Цвет в промышленности / Р.С. Синклер, Д.Р. Батл, Б. Ригг и др.; под ред. Р. Мак-Дональда; пер. с англ. И.В. Пеневой, П.П. Новосельцева под ред. Ф.Ю. Телегина. М.: Логос, 2002. 596 с.: ил.
6. Юстова Е.Н. Цветовые измерения (Колориметрия). СПб.: Изд-во СПбГУ, 2000. 397 с.
7. Кривошеев М.И., Кустарев А.К. Цветовые измерения. М.: Энергоатомиздат, 1990. 240 с.
8. Горбунова Е.В., Чертов А.Н., Горбачёв А.А., Алеев А.М., Алёхин А.А. Инструментальная оценка качества молока по цвету редуктазной пробы с резазурином // Молочная промышленность. 2018. № 11. С. 30–32. doi: 10.31515/1019-8946-2018-11-30-32

Авторы

Горбунова Елена Васильевна — кандидат технических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 55303332800, ORCID ID: 0000-0003-4799-8210, evgorbunova@itmo.ru

Чертов Александр Николаевич — кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 55303364600, ORCID ID: 0000-0002-2015-0458, a.n.chertov@mail.ru

References

1. *Biochemistry and Microbiology of Milk and Dairy Products*. Part 1. Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Bryansk State Agrarian University», 2015, 129 p. (in Russian)
2. Schmidt W. *Optical Spectroscopy in Chemistry and Life Sciences*. Wiley, 2005, 384 p.
3. Panchenkov G.M., Lebedev V.P. *Chemical Kinetics and Catalysis. TUTORIAL*. 3rd ed. Moscow, Himija Publ., 1985, 592 p. (in Russian)
4. Wayne R.P. *Principles and Applications of Photochemistry*. Oxford University Press, 1988, 268 p.
5. *Color Physics for Industry*. Ed. by R. McDonald. Society of Dyers and Colorists, 1997.
6. Iustova E.N. *Color Measurements (Colorimetry)*. St. Petersburg, St. Petersburg University Publ., 2000, 397 p. (in Russian)
7. Krivosheev M.I., Kustarev A.K. *Color Measurements*. Energoatomizdat Publ., 1990, 240 p. (in Russian)
8. Gorbunova E.V., Chertov A.N., Gorbachev A.A., Aleev A.M., Alehin A.A. Instrumental assessment of milk quality by the color of reductase test with resazurin. *Dairy Industry*, 2018, no. 11, pp. 30–32. (in Russian). doi: 10.31515/1019-8946-2018-11-30-32

Authors

Elena V. Gorbunova — PhD, Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 55303332800, ORCID ID: 0000-0003-4799-8210, evgorbunova@itmo.ru

Aleksandr N. Chertov — PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 55303364600, ORCID ID: 0000-0002-2015-0458, a.n.chertov@mail.ru

Сычева Елена Александровна — кандидат технических наук, учебно-методический работник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57190682466, ORCID ID: 0000-0001-7045-5383, sychevaelenka@gmail.com

Трошкин Дмитрий Евгеньевич — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57211395616, ORCID ID: 0000-0003-3330-4505, dimatroskhin@mail.ru

Алехин Артём Андреевич — кандидат технических наук, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 35277945300, ORCID ID: 0000-0002-6603-0662, alekhin.a.a@mail.ru

Горбачёв Алексей Александрович — кандидат технических наук, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 26325293200, ORCID ID: 0000-0002-4905-0688, gorbachev@niuitmo.ru

Elena A. Sycheva — PhD, Teaching and Learning Specialist, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57190682466, ORCID ID: 0000-0001-7045-5383, sychevaelenka@gmail.com

Dmitrii E. Troshkin — Postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57211395616, ORCID ID: 0000-0003-3330-4505, dimatroskhin@mail.ru

Artem A. Alekhin — PhD, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 35277945300, ORCID ID: 0000-0002-6603-0662, alekhin.a.a@mail.ru

Alexey A. Gorbachev — PhD, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 26325293200, ORCID ID: 0000-0002-4905-0688, gorbachev@niuitmo.ru