



Научная статья
05.18.04 – Технология мясных, молочных и рыбных продуктов и холодильных производств (технические науки)
УДК 664: 001.895
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.005

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАВЛЕННОГО СЫРА

Сергей Алексеевич Бредихин¹, Владимир Николаевич Андреев²,
Александр Николаевич Мартеха³, Юрий Михайлович Березовский⁴

^{1, 2, 3} Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия

⁴ Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова, Москва, Россия

¹ bredihin2006@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6898-0389>

² andr64.64@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4890-379X>

³ man6630@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7380-0477>

⁴ birjuza1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1002-2580>

Аннотация. Реологические измерения весьма актуальны в пищевой промышленности как инструмент для физической характеристики сырья перед переработкой, для промежуточных продуктов в процессе производства и для готовых пищевых продуктов. Цель данного исследования заключалась в определении влияния температуры и химического состава на реологические характеристики плавленого сыра, а также в измерении кажущейся вязкости продукта во время охлаждения и в процессе обработки. Для определения кажущейся вязкости был использован ротационный вискозиметр. Кажущуюся вязкость плавленого сыра определяли при 50, 60, 70, 80 и 90 °С до затвердевания продуктов, когда образцы продукта все еще находились в состоянии эмульсии. Получены зависимости индекса поведения потока, а также коэффициента консистенции от влажности плавленого сыра. Найденные значения индекса поведения потока указывали на псевдопластическую природу плавленого сыра. Характеристики потока образцов сыра были проанализированы с использованием регрессионной процедуры для описания влияния температуры и химического состава на реологические параметры. Наблюдали повышение индекса поведения потока при увеличении содержания влаги и температуры продукта. Коэффициент консистенции и, следовательно, кажущаяся вязкость увеличивались при снижении температуры и влажности. Сделаны выводы, что на кажущуюся вязкость плавленого сыра во время обработки наибольшее влияние оказывают вода и белки (непрерывная фаза), при этом жир (дисперсная фаза) существенного влияния не оказывает.

Ключевые слова: плавленый сыр, формование, оптимизация, реологические характеристики, вязкость.

Для цитирования: Исследование реологических характеристик плавленого сыра / С. А. Бредихин [и др.] // Ползуновский вестник. 2021. № 4. С. 35–40. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.005.

Original article

INVESTIGATION OF THE RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF PROCESSED CHEESE

Sergey A. Bredikhin ¹, Vladimir N. Andreev ², Alexander N. Martekha ³,
Yuriy M. Berezovskiy ⁴

^{1, 2, 3} Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russia

⁴ Federal Scientific Center for Food Systems named after V.M. Gorbatov, Moscow, Russia

¹ bredihin2006@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6898-0389>

² andr64.64@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4890-379X>

³ man6630@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7380-0477>

⁴ birjuza1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1002-2580>

Abstract. *Rheological measurements are very relevant in the food industry as a tool for the physical characterization of raw materials before processing, for intermediate products in the production process and for finished food products. The purpose of this study was to determine the effect of temperature and chemical composition on the rheological characteristics of processed cheese, as well as to measure the apparent viscosity of the product during cooling and during processing. A rotary viscometer was used to determine the apparent viscosity. The apparent viscosity of the processed cheese was determined at 50, 60, 70, 80 and 90 °C until the products solidified when the product samples were still in the emulsion state. The dependences of the flow behavior index and the consistency coefficient on the moisture content of the processed cheese are obtained. The found values of the flow behavior index indicated the pseudoplastic nature of the processed cheese. The flow characteristics of the cheese samples were analyzed using a regression procedure to describe the effect of temperature and chemical composition on rheological parameters. An increase in the flow behavior index was observed with increasing moisture content and product temperature. The consistency factor and therefore the apparent viscosity increased with decreasing temperature and humidity. It is concluded that the apparent viscosity of processed cheese during processing is most influenced by water and proteins (continuous phase), while fat (dispersed phase) has no significant effect.*

Keywords: *processed cheese, molding, optimization, rheological characteristics, viscosity.*

For citation: Bredikhin, S. A., Andreev, V. N., Martekha, A. N. & Berezovskiy, Yu. M. (2021). Investigation of the rheological characteristics of processed cheese. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 35-40. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.005.

ВВЕДЕНИЕ

Обработка в процессе производства плавленного сыра требует перемешивания и нагрева смеси сырья (натуральных сыров, воды, сливочного масла и т.д.) в присутствии эмульгирующих солей. Полученная эмульсия подвергается перекачке, заливке и охлаждению. Поскольку резка и теплопередача применяются на разных стадиях производства плавленных сыров, за исключением тепловых свойств и плотности этих продуктов, знание их вязкости необходимо для моделирования и оптимизации технологических операций. Кроме того, измерение вязкости плавленного сыра в конечном продукте также может характеризовать его способность к плавлению,

что является одним из наиболее важных физических свойств, позволяющих использовать его в различных блюдах [1, 2].

Многие ученые определяли вязкость плавленных сыров, аналогов сыров и натуральных сыров, используя различные методы вискозиметрии, которые имеют некоторые ограничения, главным образом проблему определения кажущейся вязкости при высоких температурах из-за испарения воды [2].

Цель этого исследования состояла в том, чтобы измерить кажущуюся вязкость плавленного сыра во время обработки и перед охлаждением, а также изучить, как температура и химический состав влияют на это свойство. Таким образом, был использован вискозиметр с пневматической трубкой, кото-

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАВЛЕНОГО СЫРА

рый может измерять вязкость в широком диапазоне скоростей сдвига. Образцы плавленого сыра могут быть изготовлены внутри емкости для образцов прибора, который позволяет проводить реологические измерения в режиме реального времени в неблагоприятных условиях повышенных температур, избегая при этом испарения воды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования использовали полутвердый сыр Гауда (44,2 % влаги; 46,4 % жира в сухом веществе; 25,5 % белков), сливочное масло (16,6 % влаги; 81,7 % жира) и сухое обезжиренное молоко (6,6 % влаги; 0,9 % жира; 37,5 % белков). Цитрат тринария, добавляемый в количестве 4 %, использовался в качестве эмульгирующей соли для производства плавленого сыра. Сырье добавлялось в количествах, чтобы текстура образцов плавленого сыра варьировалась в широком диапазоне, в результате чего получались продукты блочного и растекаемого типа. Для проведения эксперимента было изготовлено семь различных образцов плавленого сыра в трех экземплярах для каждой из температур.

Для определения кажущейся вязкости был использован ротационный вискозиметр *Rheotest*. Для потока вязкость рассчитывается по закону Хагена–Пуазейля. Объемный расход может быть определен путем измерения объема выпускаемой жидкости на выходе из трубки вместе с соответствующим временем выпуска. Путем измерения расхода при различных давлениях (скоростях сдвига) можно получить кривую расхода. Для обработки данных вискозиметра была разработана программа на базовом языке, которая учитывает соответствующие поправки, чтобы рассчитать вязкость жидкости в зависимости от скорости сдвига [3, 4].

Кажущуюся вязкость плавленого сыра определяли от 50 до 90 °С до затвердевания продуктов, когда образцы плавленого сыра все еще находились в состоянии жидкой эмульсии. К концу времени, необходимого для завершения эмульгирования, были проведены измерения кажущейся вязкости плавленого сыра, после того как трубка со сжатым воздухом была подсоединена к сосуду и выход капиллярной трубки был освобожден [5].

Содержание влаги в образцах сырья и плавленого сыра определяли путем сушки при температуре 102 ± 2 °С до постоянного веса. Содержание жира определяли методами Ван Гулика и Гербера–Редера для образцов сыра и плавленого сыра соответственно.

Химический анализ образцов проводился в трех экземплярах, по одному для каждой репликации образца [6].

Характеристики потока образцов сыра были проанализированы с использованием регрессионной процедуры. Чтобы выбрать наилучшее уравнение регрессии, выполняются три процедуры: регрессия наилучшего подмножества, прямой выбор и обратное исключение. С учетом результатов всех вышеперечисленных методов выводится наилучшее уравнение регрессии. Статистический анализ экспериментальных данных проводился с использованием статистического программного обеспечения *Minitab*.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

На рисунке 1 показаны кривые течения, которые представляют собой зависимость кажущейся вязкости от скорости сдвига при различных температурах и характерны для данных, полученных в результате реологических измерений на каждом из образцов плавленого сыра.

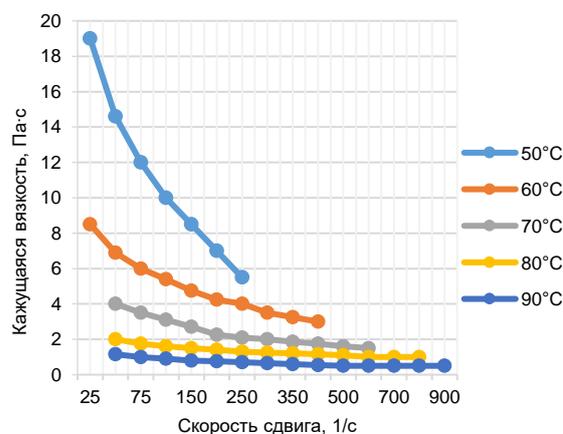


Рисунок 1 – Зависимость кажущейся вязкости от скорости сдвига

Figure 1 - Dependence of apparent viscosity on shear rate

Кривые течения типичны для неньютоновской псевдопластической жидкости, которая может быть описана простой степенной моделью $\tau = k\dot{\gamma}^n$ или $\eta = \tau/\dot{\gamma} = k\dot{\gamma}^{n-1}$, где τ – напряжение сдвига (Па), k – коэффициент консистенции (Па·сⁿ), $\dot{\gamma}$ является скоростью сдвига (с⁻¹), n – индекс поведения потока (безразмерный), при $n < 1$ для псевдопластических жидкостей, а η – кажущаяся вязкость (Па·с). Коэффициент вариации, рассчитанный

на основе трех повторений каждого образца при каждой температуре, варьировался от 0,3 % до 3,3 % и от 0,3 % до 12,8 % для индекса поведения потока и коэффициента консистенции, соответственно.

На рисунке 2 представлены зависимость индекса поведения потока от влажности образцов при различной температуре.

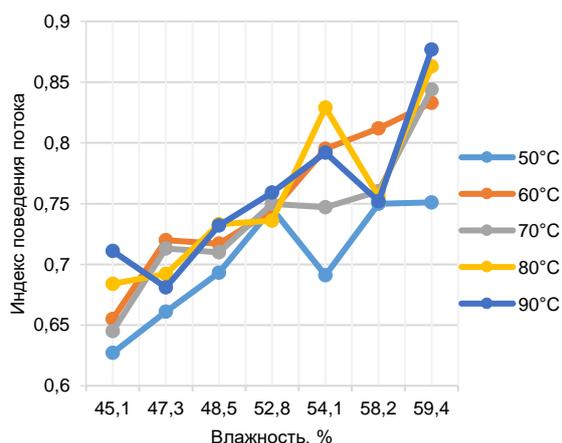


Рисунок 2 – Зависимость индекса поведения потока от влажности

Figure 2 - Dependence of the flow behavior index on moisture

Чтобы понять, как температура и химический состав влияют на кажущуюся вязкость во время обработки, необходимо ознакомиться с результатами применения тепла и механического сдвига к сырной смеси.

Регрессионный анализ был проведен для того, чтобы найти модель, которая описывала бы взаимосвязь между индексом поведения потока и температурой образцов плавленого сыра. Модель регрессионного анализа (1) состоит только из тех переменных, которые являются статистически значимыми.

$$n = 0.084 + 1.06X_v + 0.0014 T, \quad (1)$$

где X_v – массовая доля воды, а T – температура.

Содержание влаги влияет на индекс поведения потока больше, чем температура, и объясняет 70,0 % общего изменения уравнения регрессии, в отличие от температуры, которая объясняет только 10,5 %.

Увеличение содержания влаги увеличивает индекс текучести, и жидкость стремится к ньютоновскому поведению. Индекс поведения потока также увеличивается при повышении температуры. При высоких концентраци-

ях развернутые гидратированные молекулы белка имеют произвольную ориентацию и низкую подвижность, что приводит к получению высоковязких растворов. Эти растворы проявляют псевдопластические свойства течения, что указывает на то, что их вязкость уменьшается, как только скорость сдвига увеличивается. Это поведение можно объяснить постепенным вращением и ориентацией макромолекул в направлении потока. Увеличение содержания влаги и температуры (тепловой энергии) увеличивает подвижность белковых молекул для вращения, поэтому растворы проявляют меньшее поведение, зависящее от сдвига [6, 7].

На рисунке 3 представлена зависимость коэффициента консистенции от влажности образцов при различной температуре.

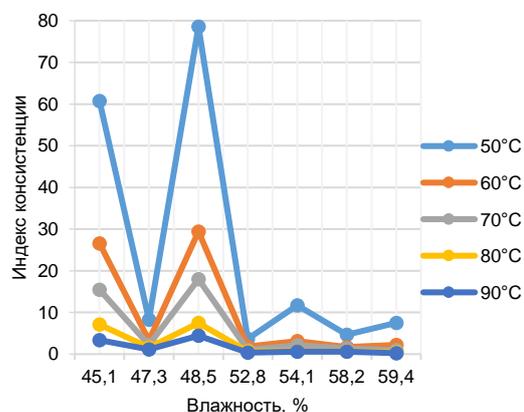


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента консистенции от влажности

Figure 3 - Dependence of the consistency factor on moisture

Кажущаяся вязкость жидкости пропорциональна коэффициенту консистенции. Регрессионный анализ предложил полулогарифмическую модель (2), которая учитывала только статистически значимые переменные для связи между коэффициентом консистенции и как температурой, так и химическим составом плавленого сыра:

$$\log k = 4,6 - 0,028T - 6,9X_v + 10,3 X_b, \quad (2)$$

где X_b – массовая доля белков.

Температура объясняет 41 % общего изменения уравнения регрессии, а содержание влаги и белка составляет 34,5 % и 20,2 % соответственно.

Регрессионный анализ показал, что коэффициент консистенции снижается при повышении температуры, что, в свою очередь, указывает на то, что при высоких температу-

рах кажущаяся вязкость плавленого сыра снижается. Вязкая сила, возникающая в текущей жидкости, должна быть обусловлена скоростью изменения импульса молекул поперек потока и силой притяжения между молекулами. В жидкостях молекулы тесно упакованы вместе, межмолекулярные силы доминируют и пытаются противостоять напряжениям сдвига, возникающим, когда жидкость вынуждена двигаться. С повышением температуры степень молекулярного движения увеличивается, уменьшая силы притяжения на малых расстояниях между молекулами и снижая вязкость [7].

Согласно нашим результатам, белки и вода, составляющие основную часть непрерывной фазы эмульсии плавленого сыра, действуют конкурентно. Увеличение содержания белка увеличивает показатель консистенции плавленого сыра, тем самым увеличивая кажущуюся вязкость. Термическая обработка белков часто приводит к увеличению поглощения воды и набуханию по мере разворачивания белков. В результате этого увеличивается гидродинамический объем и повышается сопротивление потоку. При увеличении концентрации белка возникает большее сопротивление, потому что частицам приходится убираться с пути друг друга. Увеличение вязкости также отражает межмолекулярные взаимодействия, возникающие в результате притяжения между соседними молекулами белка с образованием слабых переходных сетей [8].

По данным регрессионного анализа в нашем исследовании очевидна экспоненциальная связь между коэффициентом консистенции и белками. В отличие от эффекта белков, при увеличении содержания влаги показатель консистенции снижается. Это указывает на то, что плавленый сыр с высоким содержанием влаги будет менее вязким, чем другой с более низким содержанием влаги. Вода является важным агентом в производстве плавленого сыра, поскольку она растворяет эмульгирующие соли, диспергирует и набухает белки. Поэтому добавление воды необходимо даже в небольших количествах. Однако, когда содержание воды еще больше увеличивается, молекулы белка еще больше удаляются, и белок-белковые взаимодействия существенно ослабевают. Уменьшение притяжения между молекулами гидратированного белка приводит к снижению вязкости эмульсии [9].

Методом регрессионного анализа установлено, что жир существенно не влияет на показатель консистенции и, следовательно,

кажущуюся вязкость плавленого сыра. Вязкость дисперсной фазы, состоящей из жидкого жира и жирорастворимых веществ, очень низкая по сравнению с вязкостью непрерывной фазы, состоящей из раствора, в основе которой водорастворимые белки и минералы. Следовательно, на вязкость эмульсии плавленого сыра во время обработки влияет непрерывная фаза (вода и белки), а не дисперсная фаза (жидкий жир).

В диапазоне температур 50–90 °С средняя энергия активации потока для всех образцов плавленого сыра, полученных из любого уравнения, была рассчитана как 15,8 ккал/моль.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Индекс поведения потока меньше единицы, указывающий на псевдопластическую природу плавленого сыра. Содержание влаги и температура влияют на показатель текучести. При увеличении содержания влаги вязкость плавленого сыра в меньшей степени зависит от увеличения скорости сдвига. Это указывает на то, что плавленый сыр имеет тенденцию к ньютоновскому поведению. Температура оказывает аналогичное влияние с содержанием влаги на вязкость плавленого сыра.

На коэффициент консистенции влияют температура, влажность и содержание белка. При повышении температуры и влажности показатель консистенции снижается, что указывает на то, что плавленый сыр менее вязкий. Напротив, увеличение содержания белка приводит к продуктам с высокими значениями вязкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инновационный метод исследования реологических свойств пищевых продуктов / Б.Б. Кабулов [и др.] // Мясная индустрия. 2009. № 6. С. 62–64.
2. Орлова Е.А., Дунаев А.В., Калабушкин В.В. Качество и стабильность плавленых сыров и молоко содержащих сырных продуктов при хранении // Переработка молока. 2018. № 12(230). С. 48–52.
3. Перевертова О. Оптимизация технологии производства плавленых сыров // Переработка молока. 2021. № 5(259). С. 54–55.
4. Орлов Б.Ю., Степанова Е.Г., Зайцев А.С. Исследование реологических свойств пищевых материалов, обработанных методами электротехнологии // Альманах мировой науки. 2017. № 2-1(17). С. 65–66.
5. Коган В.В., Семенова Л.Э. Инженерная реология в пищевой промышленности // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия : Рыбное хозяйство. 2019. № 4. С. 147–156. doi: 10.24143/2073-5529-2019-4-147-156.
6. Инженерная реология. Физико-меха-

нические свойства и методы обработки пищевого сырья : учеб. пособие / С.А. Бредихин [и др.]. Санкт-Петербург : Изд-во Лань, 2021. 192 с.

7. Исследование теплофизических и реологических свойств пищевых растительных масел / А.Н. Остриков [и др.] // Ползуновский вестник. 2021. № 2. С. 36–43. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.05.005.

8. Joyner (Melito) H.S. Explaining food texture through rheology // *Current Opinion in Food Science*. 2018. V. 21. P. 7–14. doi: 10.1016/j.cofs.2018.04.003.

9. Jaensson N.O., Anderson P.D., Vermant J. Computational interfacial rheology // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2021. V. 290. 104507. doi: 10.1016/j.jnnfm.2021.104507.

Информация об авторах

С. А. Бредихин – доктор технических наук, профессор, зав. кафедры «Процессы и аппараты перерабатывающих производств» Российского государственного аграрного университета – Московской сельскохозяйственной академии им. К. А. Тимирязева.

В. Н. Андреев – кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты перерабатывающих производств» Российского государственного аграрного университета – Московской сельскохозяйственной академии им. К. А. Тимирязева.

А. Н. Мартеха – кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты перерабатывающих производств» Российского государственного аграрного университета – Московской сельскохозяйственной академии им. К. А. Тимирязева.

Ю. М. Березовский – доктор технических наук, научный консультант Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова.

REFERENCES

1. Kabulov, B.B., Kakimov, A.K., Kakimova, Z.H.H., Kosoy, V.D. (2009). An innovative method for studying the rheological properties of food. *Meat industry*. (6), 62-64. (In Russ.).

2. Orlova, E.A., Dunaev, A.V., Kalabushkin, V.V. (2018). Quality and stability of processed cheeses and milk-containing cheese products during storage. *Milk processing*. 12(230), 48-52. (In Russ.).

3. Perevertova, O. (2021). Optimization of processed cheese production technology. *Milk processing*. 5(259), 54-55. (In Russ.).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 09.09.2021; одобрена после рецензирования 10.11.2021; принята к публикации 26.11.2021.

The article was received by the editorial board on 9 Sep 21; approved after reviewing on 10 Nov 21; accepted for publication on 26 Nov 21.

4. Orlov, B.Yu., Stepanova, E.G., Zaycev, A.S. (2017). Investigation of the rheological properties of food materials processed by electrotechnology methods. *Almanac of World Science*, 2-1(17), 65-66. (In Russ.).

5. Kogan, V.V. & Semenova, L.E. (2019). Engineering rheology in the food industry. *Proceedings of Astrakhan State Technical University. Series: Fisheries*. (4), 147-156. (In Russ.). doi: 10.24143/2073-5529-2019-4-147-156.

6. Bredikhin, S.A., Andreev, V.N., Berezovskiy, Yu.M. & Martekha, A.N. (2021). Engineering rheology. Physical and mechanical properties and methods of processing food raw materials: Textbook. St. Petersburg: Lan. (In Russ.).

7. Ostrikov, A.N., Kleymenova, N.L., Bolgova, I.N. & Kopylov, M.V. (2021). The research of thermophysical and rheological properties of edible vegetable oils. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 36-43. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.05.005.

8. Joyner (Melito), H.S. (2018). Explaining food texture through rheology. *Current Opinion in Food Science*. (21), 7-14. doi: 10.1016/j.cofs.2018.04.003.

9. Jaensson, N.O., Anderson, P.D., Vermant, J. (2021). Computational interfacial rheology. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. (290), 104507. doi: 10.1016/j.jnnfm.2021.104507.

Information about the authors

S. A. Bredikhin - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head. Department of "Processes and devices of processing industries" of the Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev.

V. N. Andreev - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Processes and Apparatuses of Processing Industries of the Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev.

A. N. Martekha - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Processes and Apparatuses of Processing Industries of the Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev.

Yu. N. Berezovskiy - Doctor of Technical Sciences, Scientific Consultant of the Federal Scientific Center for Food Systems named after V. M. Gorbatov.