



Научная статья
УДК 637.07 : 664.3.033

ИЗМЕНЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ПЛАВЛЕНОГО СЫРА ПРИ ЛАБОРАТОРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ УСЛОВИЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

О.И. Левичева^{1,*}

¹ Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

*E-mail: csu411@rambler.ru

Аннотация. В статье с помощью роторного вискозиметра была выполнено исследование изменения эффективной вязкости образца плавленого в серии опытов, моделирующих производственные условия. Частота вращения ротора изменялась от 0,25 до 1,0 с⁻¹; температура от 74 до 130°С; время воздействия от 0 до 32 минут. Получено количественное подтверждение известных явлений: коэффициент эффективной динамической вязкости растёт с уменьшением температуры и сдвига скорости. Впервые получена зависимость увеличения η от времени воздействия в процессе обработки. Скорее всего, это связано с изменением структуры образца.

Ключевые слова: плавленый сыр; динамическая вязкость; температура; частота.

Для цитирования: Левичева О.И. Изменение вязкости плавленого сыра при лабораторном моделировании условий производственного процесса // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2023. Т.9. №1. С. 18–26.

Original article

CHANGE IN THE VISCOSITY OF PROCESSED CHEESE DURING LABORATORY MODELING OF PRODUCTION PROCESS CONDITIONS

O.I. Levicheva^{1,*}

¹ Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

*E-mail: csu411@rambler.ru

Abstract. In the article, with the help of a rotary viscometer, a study of changes in the effective viscosity of a fused sample was carried out in a series of experiments simulating production conditions. The rotor speed varied from 0.25 to 1.0 s⁻¹; temperature from 74 to 130 ° C; exposure time from 0 to 32 minutes. Quantitative confirmation of the known phenomena is obtained: the coefficient of effective dynamic viscosity increases with decreasing temperature and velocity shift. For the first time, the dependence of the increase in n on the exposure time during processing was obtained. Most likely, this is due to a change in the structure of the sample.

Key words: processed cheese; dynamic viscosity; temperature; frequency.

For citation: Levicheva O.I. Change in the viscosity of processed cheese during laboratory modeling of production process conditions. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2023. V.9, No. 1, pp. 18–26.

Введение

Кулачковые насосы (КН) получили широкое применение для транспортировки плавленного сыра (ПС) по трубам в процессе его производства. Вязкость плавленного сыра оказывает большое влияние на интенсивность перемешивания в технологическом процессе, на подачу КН и на гидравлическое сопротивление транспортной магистрали [1-3]. Так, чтобы выявить влияние вязкости среды на характеристики потока в КН, в [1] была изучена подача пяти сред с различной вязкостью в диапазоне от 1 сантистокс (сСт) до 110 сСт. На основе модели динамической сетки и технологии деформации локальной реконструкции сетки с помощью численного моделирования переходных процессов было исследовано влияние вязкости, структуры зазора и скорости на расход и давление, которые также были проверены экспериментами. Результаты [1] показали, что вязкость оказывает значительное влияние на производительность КН. С увеличением вязкости поток жидкости в полости ротора имеет тенденцию быть устойчивым. Сила вязкости может в некоторой степени препятствовать утечке среды в полости ротора. Изменение вязкости текучей среды влияет на расход. Расход на выходе среды с коэффициентом кинематической вязкости 110 сСт на 40% выше, чем у среды 1 сСт (вода при 20°C). При снижении скорости вращения с 400 об/мин до 100 об/мин расход на выходе уменьшается на 95% при 11 сСт и на 80% при 72 сСт. Кроме того, структура с градиентным зазором может эффективно регулировать пульсации потока в жидкости, что уменьшает колебания давления более чем на 30%.

В результате вязкость заметно влияет на производительность установки для производства ПС. Поэтому исследованию величины динамической вязкости ПС посвящено большое количество публикаций (см. [4-7] и библиографию в них). Модель степенной жидкости считается наиболее подходящей для реологии ПС. Формула Оствальда для эффективной динамической вязкости η (Па·с) имеет вид:

$$\eta = K \cdot \omega^{m-1}, \quad (1)$$

где m – показатель неньютоновского поведения жидкости; K – коэффициент Оствальда (коэффициент консистенции жидкости), Па·с ^{m} ; ω – градиент скорости, с⁻¹.

Реологические параметры m и K зависят от состава ПС, структуры продукта и температуры. Поэтому в процессе производства и транспортировки ПС они могут заметно изменяться.

Интересное направление исследования обозначено в [8]. Была поставлена цель – изучить влияние ряда выбранных факторов (содержание белка и жира, размер жировых шариков и др.) на процесс производства ПС, в частности, на физические изменения, известные как вспенивание. Была создана модельная установка, в которой обрабатывалась смесь со сравнительно невысоким коэффициентом динамической вязкости (0,5-5 Па·с). Чтобы иметь возможность тщательно отслеживать ход процесса, условия реакции были подобраны таким образом, что шкала времени реакции была растянута до 4 часов. В промышленных условиях интенсивность процесса более высокая, но она не позволяет проследить все его особенности. Содержание жира изменялось в диапазоне 0-20%, исходный размер шариков молочного жира – от 1,1 до 3,7 мкм. Было обнаружено, что полимеризация белка постоянна в течение всего хода реакции. Это позволило предположить, что более слабые физические связи отвечают за структурирование матрицы.

На рис. 1 приведено типичное изменение вязкости во время процесса при $\omega=100$ с⁻¹ [8]. Искусственное замедление процесса позволило выделить 4 фазы, которые характеризуют: начальная фаза, экспоненциальная фаза I, фаза плато и экспоненциальная фаза II. Каждая фаза характеризует свой этап структурообразования, различается скоростью изменения вязкости (наклоны кривых) и четко различимыми временами переключения между фазами.

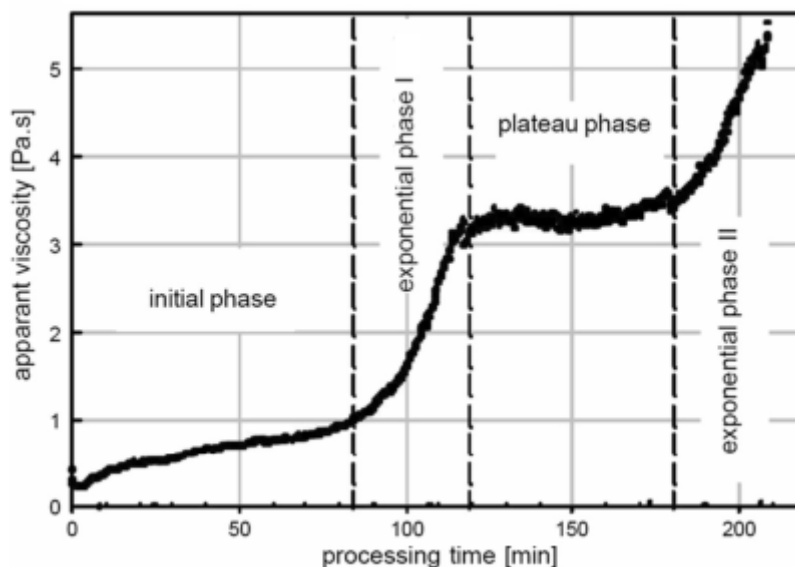


Рисунок 1 – Пример хода изменения коэффициента эффективной динамической вязкости смеси в модельной установке из [9]

Этапы структурообразования протекают последовательно. Во время фазы иницирования вязкость сначала немного увеличивается, а затем остается постоянной примерно на уровне 1,0 Па с. Через 85 мин вязкость резко возрастает с 1,0 до 2,9 Па с (экспоненциальная фаза I). В фазе плато вязкость остается постоянной в течение примерно 50 мин, прежде чем снова резко увеличиться (экспоненциальная фаза II).

В трудах [5-7] с помощью ротационных вискозиметров было выполнено обширное экспериментальное исследование зависимости реологических параметров разных сортов ПС от температуры. При этом для каждого опыта использовался новый образец ПС. Такой подход необходим для составления справочных таблиц, но не отражает производственных условий. Процесс производства предполагает довольно длительное перемешивание и транспортировку ПС, которые сопровождаются изменением температуры.

Результаты [8] весьма интересны, как теоретическая база, но далеки от производственных условий. Коэффициент динамической вязкости производимых ПС может быть в несколько раз больше, чем в лабораторных опытах [8]; время процесса меньше в десятки и сотни раз. Например, в [9] продолжительность процесса от 2 до 6 минут при температуре 80-95°C. Кроме того, необходимо учесть особенности работы ротационного вискозиметра, в частности, переходные процессы (пусковой режим) [10]. Цель данной статьи – экспериментальное исследование изменения коэффициента динамической вязкости при условиях, близких к производственным.

Материалы и методы

Работа была выполнена в лаборатории Калининградского государственного технического университета с помощью ротационного вискозиметра компании «Brookfield» RVDV-II+P, показанном на рис. 2. Принцип работы вискозиметра RVDV-II+P основан на вращении шпинделя (погруженного в жидкую пробу), закрепленного на калиброванной пружине. Торможение шпинделя, возникающее из-за вязкости жидкости, замеряется по отклонению пружины. Отклонение пружины замеряется ротационным преобразователем. Диапазон измерения вискозиметра RVDV-II+P (в сантипуазах или миллипаскалях в секунду) определяется скоростью вращения шпинделя, его размерами и формой, формой испытательного контейнера, в котором вращается шпиндель, и полным диапазоном шкалы вращающего момента калиброванной пружины. Точность вискозиметра RVDV-II+P при любом сочетании шпинделей и скорости вращения составляет $\pm 1\%$.



а



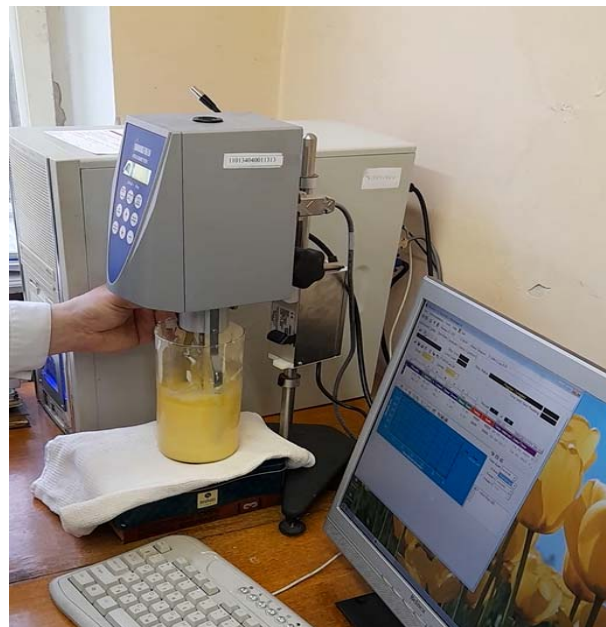
б

Рисунок 2 – Вид лабораторной измерительной системы:
а – вискозиметр «Brookfield» RVDV-II+P, б – вывод на монитор

Для проведения опытов был использован сливочный плавленый сыр торговой марки «Витако». Опыты производились на образцах из одной партии. Разогрев плавленого сыра и поддержание полученной температуры производились путем нагревания плавленого сыра на водяной бане (рис. 3а). После получения постоянной температуры, в опытный образец опускался шпиндель № RV6 (рис. 3б).



а



б

Рисунок 3 – Проведение лабораторного эксперимента:
а – нагревание ПС «водяной баней», б – процесс измерения

Было выполнено несколько серий лабораторных экспериментов, соответствующих процессу производства и транспортировки ПС при различных условиях. Первая серия опытов заключалась в измерении эффективной вязкости ПС при последовательном уменьшении частоты вращения ротора (60, 30, 15 об/мин.) при неизменной температуре.

В качестве базового было принято установившееся значение эффективной вязкости ПС в первой серии опытов при температуре $t=74^{\circ}\text{C}$ и частоте вращения ротора $n_0 = 1 \text{ с}^{-1}$ (60 об/мин.) η_{z60} . Тогда безразмерный коэффициент динамической вязкости в i -том опыте

$$\eta b_i = \eta_i / \eta_{z60} . \quad (2)$$

Учитывая, что величина сдвига ω прямо пропорциональна частоте вращения ротора, после логарифмирования обеих частей равенства (1), получим формулу расчета значения показателя m_i при фиксированной частоте n_i (в с^{-1}):

$$m_i = 1 + \frac{\ln(\eta b_i)}{\ln(n_i)} . \quad (3)$$

Последующие серии опытов были связаны с длительным воздействием роторного вискозиметра на образец ПС в сочетании с его охлаждением и нагреванием. Обозначим через ΔT время, в течение которого образец ПС подвергался воздействию в роторном вискозиметре. Чем больше ΔT , тем больше будет эффективная вязкость ПС (см. рис. 1). Коэффициент эффективной динамической вязкости исследуемого сорта ПС является функцией трех аргументов $\eta = f(t, \Delta T, n)$. Осреднение значений, рассчитанных при нескольких n_i , позволяет найти величину η при заданной температуре и ΔT .

Результаты и их обсуждение

Результаты первой серии опытов представлены на рис. 4. Видно, что в соответствии с физическим смыслом, коэффициент эффективной вязкости ПС растет при уменьшении частоты вращения ротора и неизменных значениях t и ΔT . Расчет по формуле (3) позволил найти среднее значение показателя неньютоновского поведения исследуемого образца ПС при $t=74^{\circ}\text{C}$: $m = 0,524$.

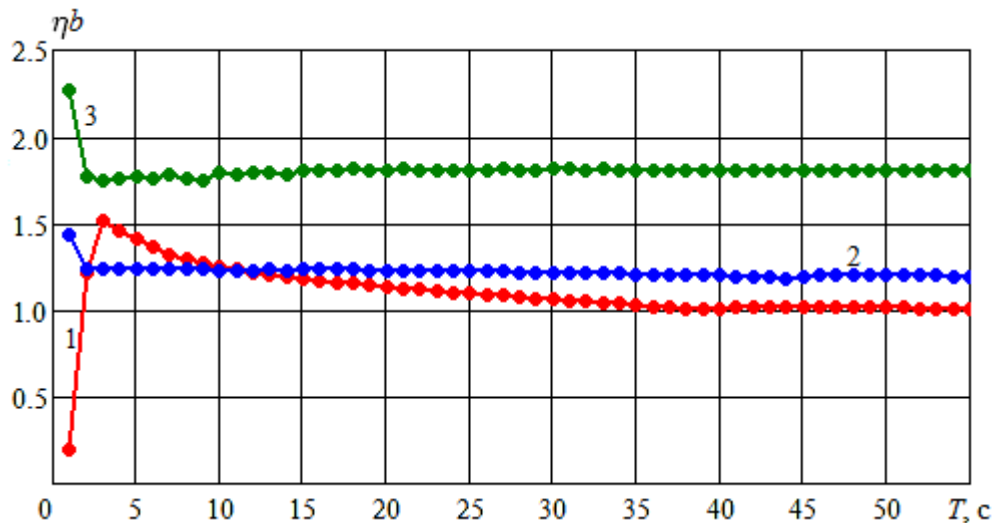


Рисунок 4 – Изменение безразмерной эффективной вязкости в серии опытов 1 ($t=74^{\circ}\text{C}$):
1 – $n = 60$ об/мин. (1 с^{-1}); 2 – $n = 40$ об/мин. ($2/3 \text{ с}^{-1}$); 3 – $n = 20$ об/мин. ($1/3 \text{ с}^{-1}$)

На рис. 5 представлены некоторые результаты второй серии опытов: с увеличением времени ΔT образец ПС подвергался нагреву и остывал.

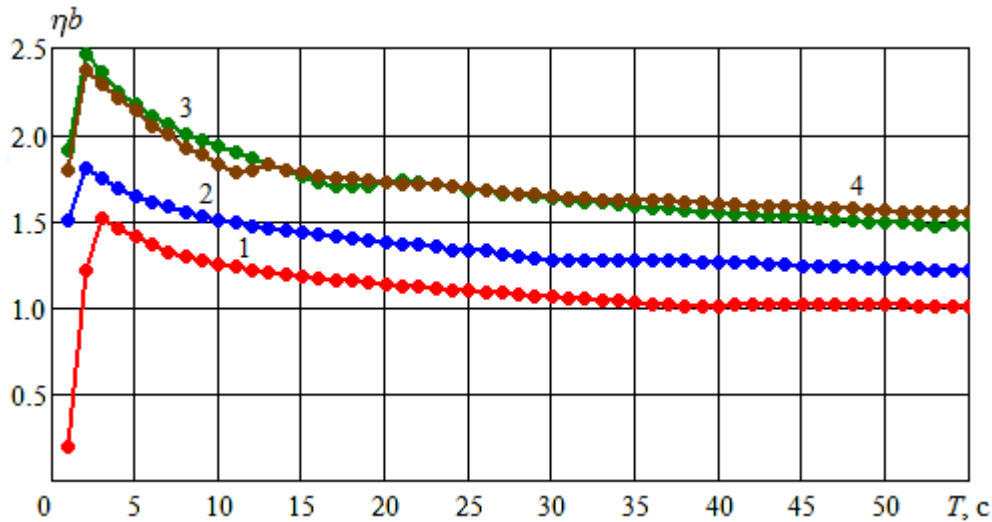


Рисунок 5 – Изменение безразмерной эффективной вязкости в серии опытов 2 ($n=1 \text{ с}^{-1}$):
1 – $\Delta T=0$, $t=74^\circ\text{C}$; 2 – $\Delta T=3$ мин., $t=80^\circ\text{C}$; 3 – $\Delta T=6$ мин., $t=76^\circ\text{C}$; 4 – $\Delta T=9$ мин., $t=83^\circ\text{C}$

На рис. 6 и 7 представлена часть результатов второй серии опытов. Первоначально образец ПС был нагрет до высокой температуры, далее он постепенно остывал во время вращения ротора.

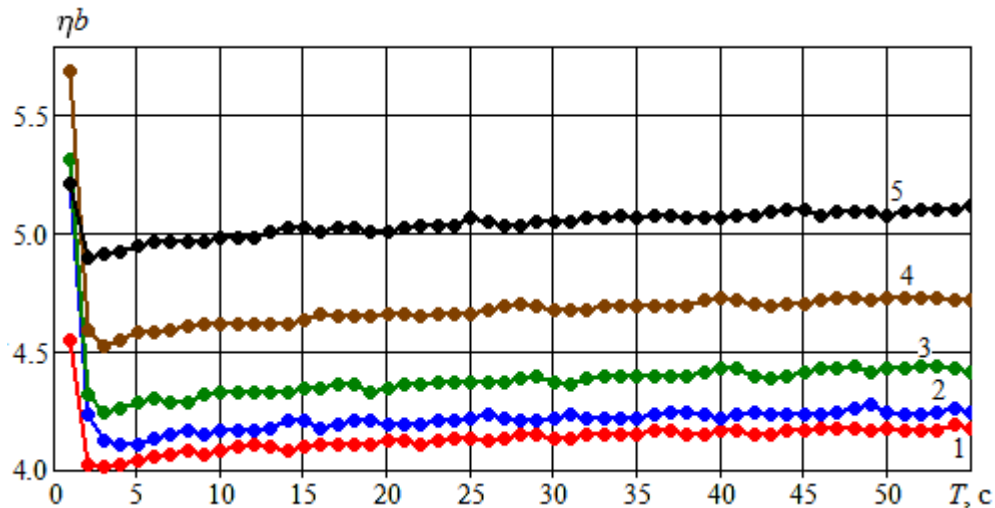


Рисунок 6 – Изменение безразмерной эффективной вязкости в серии опытов 3 ($n=0,25 \text{ с}^{-1}$):
1 – $\Delta T=20$ мин., $t=130^\circ\text{C}$; 2 – $\Delta T=23$ мин., $t=115^\circ\text{C}$; 3 – $\Delta T=26$ мин., $t=111^\circ\text{C}$;
4 – $\Delta T=29$ мин., $t=103^\circ\text{C}$; 5 – $\Delta T=32$ мин., $t=98^\circ\text{C}$

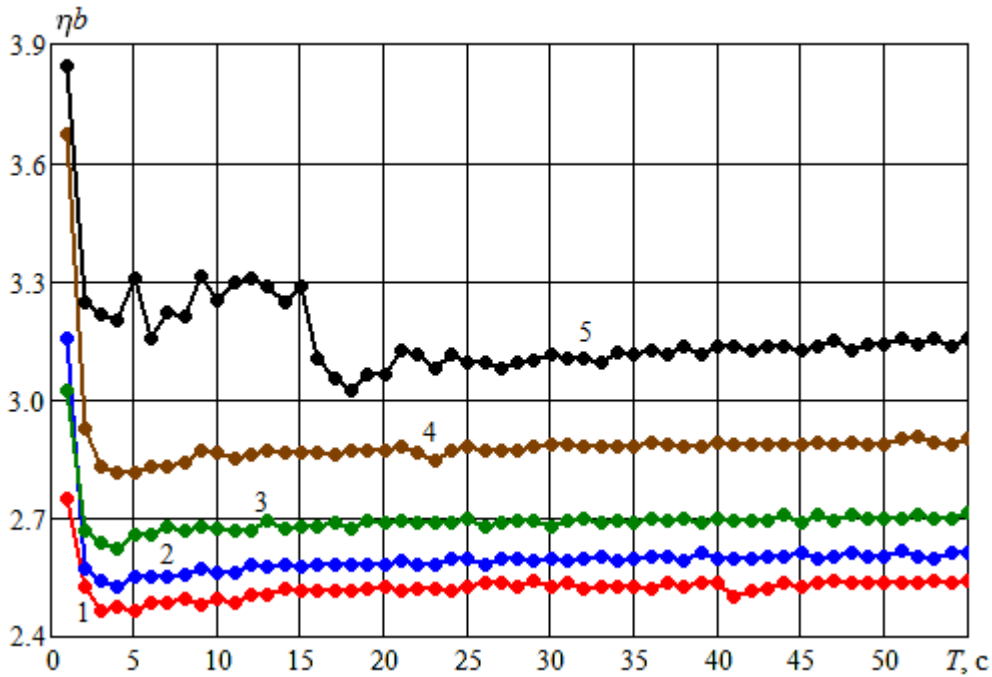


Рисунок 7 – Изменение безразмерной эффективной вязкости в серии опытов 4 ($n=0,5 \text{ c}^{-1}$):
1 – $\Delta T=19$ мин., $t=130^\circ\text{C}$; 2 – $\Delta T=22$ мин., $t=115^\circ\text{C}$; 3 – $\Delta T=25$ мин., $t=111^\circ\text{C}$;
4 – $\Delta T=28$ мин., $t=103^\circ\text{C}$; 5 – $\Delta T=31$ мин., $t=98^\circ\text{C}$;

Заключение

Таким образом, с помощью роторного вискозиметра была выполнено исследование изменения эффективной вязкости образца плавленого в серии опытов, моделирующих производственные условия. Частота вращения ротора изменялась от $0,25$ до $1,0 \text{ c}^{-1}$; температура от 74 до 130°C ; время воздействия от 0 до 32 минут. Получено количественное подтверждение известных явлений: коэффициент эффективной динамической вязкости растет с уменьшением температуры и сдвига скорости. Впервые получена зависимость увеличения η от времени воздействия в процессе обработки. Скорее всего, это связано с изменением структуры образца.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИОКР по теме «Разработка и совершенствование производственных систем пищевой отрасли».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Li Y.B., Du J., Guo D.S. Numerical research on viscous oil flow characteristics inside the rotor cavity of rotary lobe pump // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2019. Vol. 41. P. 1-11.
2. Ахмедова Н.Р., Левичева О.И., Наумов В.А. Влияние вязкости жидких пищевых продуктов на производительность кулачковых насосов (на примере перекачивания рыбного жира) // Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. Серия: Рыбное хозяйство. 2022. № 3. С.74-81.
3. Наумов В.А., Ахмедова Н.Р., Левичева О.И. Расчет гидравлических потерь при транспортировке плавленого сыра по трубопроводу // Материалы X Международного Балтийского морского форума (Калининград, 26 сентября – 1 октября 2022 г.). Т.6. Калининград: Изд-во БГА, 2022. С. 131-137.
4. Dimitreli G., Thomareis A. Effect of temperature and chemical composition on processed cheese apparent viscosity // Journal of Food Engineering. 2004. Vol. 64, No. 2. P. 265-271.

5. Арет В.А., Николаев Б.Л., Забровский Г.П., Николаев Л.К. Реологические основы расчета оборудования производства жиросодержащих пищевых продуктов /: Изд-во СПбГУНиТП, 2006. 435 с.
6. Николаев Л.К., Денисенко А.Ф., Николаев Б.Л. Определение эффективной вязкости плавленого сыра «Российский» // Процессы и аппарата пищевых производств. 2010. № 1. С. 71-73.
7. Николаев Л.К., Николаев Б.Л. О характере изменения эффективной вязкости плавленого сыра «Угличский» // Процессы и аппарата пищевых производств. 2013. № 4. С. 18.
8. Lenze S., Wolfschoon-Pombo A., Schrader K., Kulozik U. Effect of the compositional factors and processing conditions on the creaming reaction during process cheese manufacturing // Food and Bioprocess Technology. 2019. Vol. 12. P.575–586.
9. Kapoor R., Lehtola P., Metzger L. E. Comparison of pilot-scale and rapid visco analyzer process cheese manufacture. Journal of Dairy Science. 2004. Vol. 87, No.9. P. 2813–2821.
10. Круподеров А.Ю., Ахмедов М.Х., Мерещкая А.А., Идрисов Н.И. Экспериментальный стенд на базе ротационного вискозиметра для исследования пускового режима оборудования // Научный альманах. 2015. № 10-3 (12). С. 150-153.

REFERENCES

1. Li Y.B., Du J., Guo D.S. Numerical research on viscous oil flow characteristics inside the rotor cavity of rotary lobe pump. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2019. Vol. 41, pp. 1-11.
2. Ahmedova N.R., Levicheva O.I., Naumov V.A. *Vliyanie vyazkosti zhidkih pishchevyh produktov na proizvoditel'nost' kulachkovykh nasosov (na primere perekachivaniya rybnoho zhira)* [Influence of viscosity of liquid foodstuffs on the performance of cam pumps (on the example of pumping fish oil)]. *Vestnik Astrahanskogo gos. tekhn. un-ta. Seriya: Rybnoe hozyajstvo*. 2022. No. 3, pp.74-81.
3. Naumov V.A., Ahmedova N.R., Levicheva O.I. *Raschet gidravlicheskih poter' pri transportirovke plavlenogo syra po truboprovodu* [Calculation of hydraulic losses during transportation of processed cheese by pipeline]. *Materialy X Mezhdunarodnogo Baltijskogo morskogo foruma (Kaliningrad, 26 sentyabrya – 1 oktyabrya 2022 g.)*. Vol.6. Kaliningrad: BGA Publ., 2022, pp. 131-137.
4. Dimitreli G., Thomareis A. Effect of temperature and chemical composition on processed cheese apparent viscosity. Journal of Food Engineering. 2004. Vol. 64, No. 2, pp. 265-271.
5. Aret V.A., Nikolaev B.L., Zabrovskij G.P., Nikolaev L.K. *Reologicheskie osnovy rascheta oborudovaniya proizvodstva zhirosoderzhashchih pishchevyh produktov* [Rheological bases of calculation of equipment for the production of fat-containing foods]. SPbGUNI TP Publ., 2006. 435 p.
6. Nikolaev L.K., Denisenko A.F., Nikolaev B.L. *Opreделение effektivnoj vyazkosti plavlenogo syra «Rossijskij»* [Determination of the effective viscosity of processed cheese «Russian»]. *Processy i apparata pishchevyh proizvodstv*. 2010. No. 1, pp. 71-73.
7. Nikolaev L.K., Nikolaev B.L. *O haraktere izmeneniya effektivnoj vyazkosti plavlenogo syra «Uglichskij»* [On the nature of changes in the effective viscosity of processed cheese «Uglichsky»]. *Processy i apparata pishchevyh proizvodstv*. 2013. No.4, pp. 18.
8. Lenze S., Wolfschoon-Pombo A., Schrader K., Kulozik U. Effect of the compositional factors and processing conditions on the creaming reaction during process cheese manufacturing. Food and Bioprocess Technology. 2019. Vol. 12, pp.575–586.



9. Kapoor R., Lehtola P., Metzger L. E. Comparison of pilot-scale and rapid visco analyzer process cheese manufacture. *Journal of Dairy Science*. 2004. Vol. 87, No.9, pp. 2813–2821.
10. Krupoderov A.YU., Ahmedov M.H., Mereckaya A.A., Idrisov N.I. *Ekspperimental'nyj stend na baze rotacionnogo viskozimetra dlya issledovaniya puskovogo rezhima oborudovaniya* [Experimental stand based on a rotary viscometer for the study of the starting mode of equipmen]. *Nauchnyj al'manah*. 2015. No. 10-3 (12), pp. 150-153.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Левичева Оксана Игоревна - преподаватель
Калининградский государственный
технический университет, (236022, Россия, г.
Калининград, Советский пр-т 1, e-mail:
csu411@rambler.ru)

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Levicheva Oksana Igorevna – Lecturer,
Kaliningrad State Technical University (236022,
Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail:
csu411@rambler.ru)

Статья поступила в редакцию 05.03.2023; одобрена после рецензирования 12.03.2023, принята к публикации 23.03.2023.

The article was submitted 05.03.2023; approved after reviewing 12.03.2023; accepted for publication 23.03.2023.