

УДК 536.252

## РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПОПРАВКИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЖАРКИ ВО ФРИТЮРЕ

© 2018

Гайсин Ирек Аязович, старший преподаватель кафедры «Высокоэнергетические процессы и агрегаты»  
*Набережночелнинский институт (филиал), Казанский (Приволжский) федеральный университет*  
(423810, Россия, г. Набережные Челны, пр. Мира, 68/19, e-mail: aziprin123@yandex.ru)

Исрафилов Ирек Хуснемарданович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
«Высокоэнергетические процессы и агрегаты»

*Набережночелнинский институт, Казанский (Приволжский) федеральный университет*  
(423810, Россия, г. Набережные Челны, пр. Мира, 68/19, e-mail: irmaris@yandex.ru)

Аннотация. Обжаривание во фритюре является одной из наиболее широко распространенных технологий производства кулинарных изделий и одной из основ мировой индустрии питания. В связи с этим, перед исследователями постоянно стоит задача стабильного повышения качества продукции, тепловой экономичности и эксплуатационных характеристик оборудования, которая, в том числе, может быть решена и путем повышения точности задания теплового режима разогрева фритюрного масла. В свою очередь тепловой режим разогрева фритюрного масла напрямую влияет на его качество и качество конечного продукта. Известно, что для некоторых сред макроскопическое состояние в данный момент времени зависит от их состояния в более ранние моменты времени (явление памяти). В работе рассмотрены подходы к моделированию теплофизических процессов жарки во фритюрном масле на основе теории сред с памятью. Показано влияние степени деградации масла на изменение его вязкости и коэффициента конвективной теплопередачи. В результате анализа данных выведены формулы соответствующих поправок. Сделан вывод, что для управления качеством продуктов питания требуется учет данных факторов при разработке математической модели процесса.

Ключевые слова: вязкость, коэффициент конвективной теплопередачи, деградация масла, математическая модель.

## RHEOLOGICAL CORRECTIONS TO MODELING OF THERMOPHYSICAL FRYING PROCESSES IN FRYING OIL

© 2018

Gajsin Irek Aiazovich, Senior Lecturer of the Department «High-Energy Processes and Units»

*Kazan Federal University, Naberezhnyes Chelny Institute (branch)*

(423810, Russia, Republic of Tatarstan, Naberezhnyes Chelny, Mira av., 68/19, e-mail: aziprin123@yandex.ru)

Israfilov Irek Husnemardanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department  
«High-Energy Processes and Units»

*Kazan Federal University, Naberezhnyes Chelny Institute*

(423810, Russia, Republic of Tatarstan, Naberezhnyes Chelny, Mira av., 68/19, e-mail: irmaris@yandex.ru)

Abstract. The deep-frying is one of the most widespread technologies for the production of culinary products and one of the foundations of the global food industry. In this connection, the researchers are faced with the continuous task of stable improvement of product quality, thermal efficiency and operating characteristics of equipment, which can be solved by increasing the precision of setting the thermal regime of heating the frying oil. In turn, the thermal mode of heating the frying oil directly affects its quality and the quality of the final product. It is known that for some media the macroscopic state at a given time depends on their state at earlier time (the phenomenon of memory). These work deals with the modeling of thermo-physical processes in frying oil on the basis of the theory of materials with memory. The influence of the oil degradation degree on the changes in its viscosity and convective heat transfer coefficient is shown. As a result of the data analysis, formulas for the corresponding corrections are derived. The conclusion is drawn that for the management of the quality of food it is necessary to analyze data when developing a mathematical model of the process.

Keywords: viscosity, heat conduction coefficient, oil degradation, mathematical model.

Процесс обжаривания во фритюре контролируется теплопередачей между маслом, используемым для жарки, и обжариваемым продуктом. Тепло последовательно передается через два участка с различными характеристиками теплопередачи: масляную пленку и обжаренную корку [1]. Сначала тепло передается от масла для жарки на поверхность продукта посредством конвекции. Затем оно переносится с поверхности во внутреннюю часть продукта посредством проводимости. Скорость тепловой конвекции связана с испарением воды, которое меняется во время жарки.

На ранней стадии жарки испарение воды возрастает, образуются и интенсивно движутся пузырьки, что приводит к всплыванию масла, увеличению конвекции и возрастанию теплоотдачи. На последней стадии жарки содержание влаги и тепловая конвекция уменьшается [2, 3].

Термодинамика таких неравновесных процессов достаточно хорошо разработана для простых моделей среды, когда справедливы линейные соотношения между термодинамическими силами и потоками, и эти связи носят локальный и мгновенный характер [4].

Однако имеются среды, для которых макроскопическое состояние в данный момент времени зависит от их состояния в более ранние моменты времени (явление памяти) или их состояние в данной точке зависит от состояния в других точках (явление нелокальности). Наиболее часто данный подход реализуется в пищевой промышленности, в которой многие жидкие и полужидкие вещества имеют свойства, отличные от свойства классических (Ньютоновских) жидкостей [5]. В частности, при моделировании теплообмена при стерилизации герметично упакованных пищевых продуктов следует учитывать температурную зависимость кажущейся вязкости ( $\mu$ ) жидкой пищи, поскольку изменение  $\mu$  с температурой является преобладающим по сравнению с изменениями других теплофизических характеристик [5, 6]. В этом случае температурная зависимость  $\mu$  включается в модель путем сравнения экспериментальных данных с полиномиальным уравнением, где температура является единственной независимой переменной [7]. В этом случае необходимо использовать реологическую модель, учитывающую влияние температуры и скорости сдвига на кажущуюся вязкость пищи.

Однако, кроме Бингамовского пластика и псевдопластика, имеется большое число других разновидностей неьютоновских жидкостей, вязкость которых зависит не от усилия сдвига, а от времени. В том случае, если вязкость материала под воздействием усилия со временем снижается, данная жидкость называется тиксотропной, а если повышается, то такая жидкость называется реопектической [8].

У большинства таких жидкостей эти изменения вязкости связаны с физико-химическими процессами, происходящими в них под воздействием внешних факторов – переходами гель-золь или другими изменениями структуры вещества. Хотя такие жидкости встречаются крайне редко, в последнее время появляются данные, что некоторые вещества, ранее считавшиеся классическими ньютоновскими жидкостями, при определенных условиях приобретают некоторые свойства тиксотропных или реопективных жидкостей. В частности, такие тиксотропные свойства обнаруживаются у биодизелей при повышенных температурах, хотя в целом они продолжают считаться ньютоновскими жидкостями [9].

Определенные реопектические свойства были отмечены у образцов жира из отходов производства мясокостной муки [10]. Показано, что эти жиры изменяют реологические свойства при понижении температуры из-за образования кристаллов [11]. Триацилглицеролы кристаллизуются примерно при 31-32° С, по этой причине жир при температуре ниже 32° С ведет себя как неьютоновская жидкость [11], а данные жиры были охарактеризованы как жидкость с реопектическим поведением [10].

Таким образом, поскольку жиры и такие производные растительных масел, как биодизель, при нестандартных условиях способны вести себя способом, отличным от классической ньютоновской жидкости, хотя ими и продолжают при этом считаться, было

проведено исследование поведения при нестандартных условиях такой считающейся классической ньютоновской жидкости, как растительное масло, используемое для жарки во фритюре.

Растительные масла при стандартных условиях являются классическими ньютоновскими жидкостями [12]. Однако в процессе жарки они подвергаются длительному нагреву при высоких температурах (вплоть до 200° С) при постоянном перемешивании за счет температурной конвекции и выделяющихся при жарке пузырьков пара. Данные воздействия вызывают в них окисление под действием кислорода воздуха и гидролиз под действием содержащейся в обжариваемом продукте воды, приводящие к образованию полярных компонентов а также изомеризацию, циклизацию и полимеризацию вследствие прямого действия высоких температур, влияющие на химико-физические свойства масла. Необходимо отметить, что эти изменения намного более медленные, чем происходящие в животных жирах [10, 11], они занимают часы и сутки, а не минуты, но, тем не менее, так же эффективно вызывают изменение их физико-химических свойств. Многие из этих изменений носят циклический характер и имеют свойства гистерезиса. В частности, такие изменения характерны для изменения содержания полярных продуктов, происходящих в циклах жарки при разных температурах (рисунок 1).

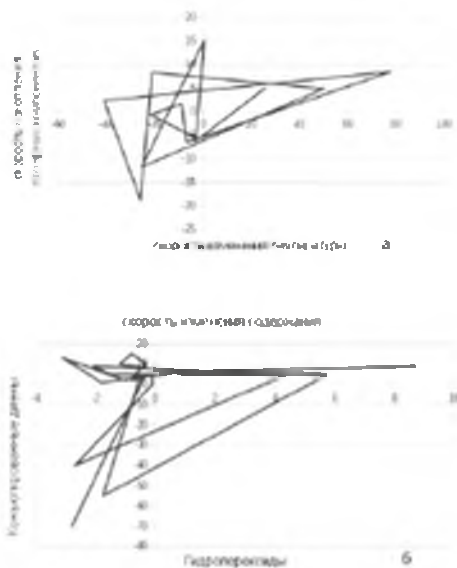


Рисунок 1 – а) Скорость накопления полярных компонентов как функция скорости изменения температуры масла во время жарки и б) Соотношение скорости изменения конъюгированных диенов и пероксидов в газифицированного масла при нагреве в течение 3-х часов до 180° С. (Расчеты проведены по данным [13]).

На рисунке видно, что изменение скорости накопления полярных компонентов по сравнению со скоростью изменения температуры происходит циклически и имеет

явные признаки петель гистерезиса (рисунок 1а). Еще более наглядно выглядит цикличность взаимного изменения скорости изменения содержания разных типов продуктов перекисного окисления липидов – конъюгированных диенов и пероксидов (рисунок 1б).

Таким образом, изменения химического состава деградирующего масла при жарке носят циклический характер. Поскольку изменения в химическом составе веществ должны отражаться на изменении их физических свойств, было проведено изучение данных о влиянии этих изменений на такое важное для жарочного масла свойство, как его вязкость.

Наиболее полно исследования деградации масла под влиянием длительного нагрева при 190° С и его влияния на вязкость масла были проведены Tseng с соавторами [12]. Ими было показано, что вязкость возрастала с увеличением степени деградации масла более чем в 2 раза с  $2,04 \cdot 10^{-3}$  до  $4,39 \cdot 10^{-3}$  Па. При этом отмеченное увеличение вязкости после 30 часов жарки происходило намного быстрее.

Также необходимо отметить, что данное увеличение вязкости масла вызывало образование гистерезисообразной петли, хорошо заметной на графиках, построенных как в обычных, так и в полулогарифмических координатах, что, наряду с зависимостью вязкости от времени воздействия, является одним из характерных признаков «среды с памятью» (рисунок 2).

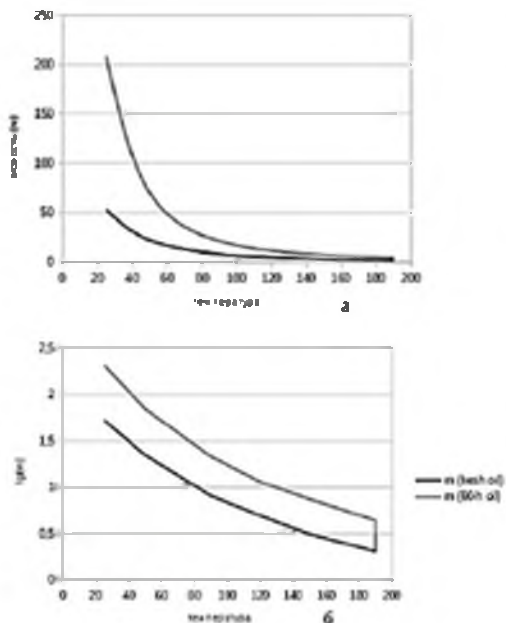


Рисунок 2 – Влияние длительной деградации масла на его вязкость при разных температурах по данным [12]. Синяя ветка графика — вязкость свежего масла при нагреве, красная ветка графика – вязкость деградированного масла при охлаждении при а) линейной шкале и б) логарифмической шкале по оси  $T$

Это увеличение вязкости масла, по видимому, связано с образованием соединений с более высокой молекулярной массой с углеродными связями между окисленными жирными кислотами [14]. Оно также напрямую связано с образованием полимерных соединений из-за воздействия кислорода при высокой температуре во время жарки [15]. Известно, что образование общих полярных веществ увеличивается с каждым циклом жарки и коррелирует с изменением вязкости масла ( $R^2 = 0,93$ ) [16].

Для анализа зависимости вязкости деградирующего масла от времени, были обработаны и проанализированы исходные данные, приведенные в работах Y.C. Tseng с соавторами [12], В.П. Максимен с соавторами [17] и Е.Р. Kalodanni с соавторами [18]. Было установлено, что все исследования проводились при температуре деградации масла в районе 180-190° С, а измерения проводились в основном при температуре 50° С. При этом данные о зависимости вязкости от времени хорошо описываются как кубической полиномиальной регрессией, так и экспоненциальной регрессией с высокой степенью коэффициента корреляции  $R^2 = 0,9789$  в первом случае и  $R^2 = 0,9772$  во втором случае (рисунок 3а, б).

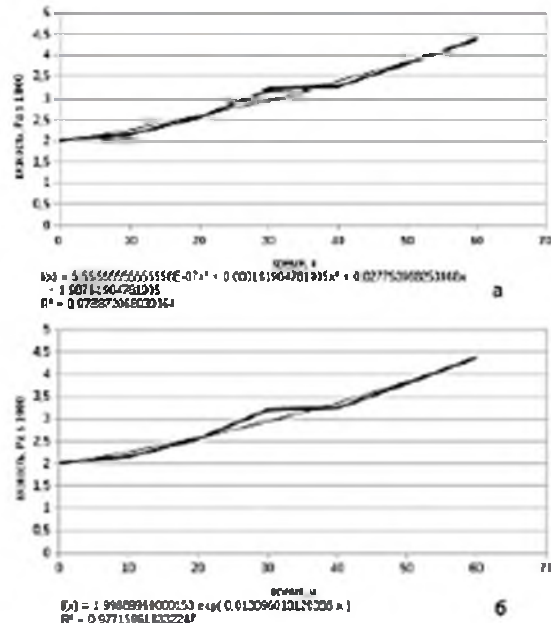


Рисунок 3 – Регрессионный анализ данных [12] по увеличению вязкости в зависимости от времени деградации. а) полиномиальная регрессия, б) экспоненциальная регрессия

Хотя экспоненциальная регрессия и коррелировала с экспериментальными данными немного хуже, чем полиномиальная, но она имеет ясный физический смысл, в связи с чем и была использована в дальнейшем. Формула экспоненциальной регрессии для вязкости  $\mu = a \cdot \exp(b \cdot t)$  имеет два коэффициента –  $a$  и  $b$ . Коэффициент  $a$  в этом уравнении соответствует вязко-

сти свежего масла ( $\mu_0$ ) и сильно зависит от температуры измерения, коэффициент  $b$  характеризует крутизну экспоненты, т. е. скорость химической деградации и в основном зависит от химического состава масла. Результаты анализа этих коэффициентов для имеющихся в литературе данных приведены в таблице 1.

Необходимо отметить, что коэффициент  $a$  показывал намного более сильную зависимость от температуры, чем от состава исследуемого масла, как и положено для растительных и животных жиров [19]. Коэффициент же  $b$  в основном зависел именно от состава масла. Для соевого (0,01847), подсолнечного (0,01872) и пальмового (0,01730) масла эти коэффициенты были достаточно близки, что свидетельствует о близких скоростях их деградации под действием высокой температуры. Оливковое масло имеет намного меньшее значение коэффициента  $b$ , что свидетельствует о намного меньшем увеличении его вязкости под действием высокой температуры.

Таблица 1 – Значения коэффициентов  $a$  и  $b$ , полученных на основании анализа литературных данных, в уравнении  $\mu = a \exp(b^*t)$  и корреляция между расчетными и экспериментальными данными.

Сорт масла, условия деградации и измерения	коэффициенты		
	$a$	$b$	$R^2$
<b>Источник [12]:</b>			
Соевое масло, деградация при 190°С, измерение при 190°С	0,00200	0,01308	0,97706
Соевое масло, деградация при 190°С, измерение при 50°С	0,02001	0,01847	0,95126
<b>Источник [17]:</b>			
Подсолнечное масло, деградация при 180°С, измерение при 50°С	0,02584	0,01872	0,98449
<b>Источник [18]:</b>			
Пальмовое масло, деградация при 180°С, измерение при 50°С	0,02622	0,01730	0,99372
Оливковое масло, деградация при 180°С и измерение при 50°С	0,02556	0,00778	0,98942

Коэффициент корреляции между расчетными и экспериментальными данными достаточно высок,  $R^2$  не опускается ниже 0,95, что позволяет распространить использование этой формулы на весь ряд используемых при жарке масел.

Таким образом, при длительном нагреве при высокой температуре масло для жарки приобретает ряд свойств, характерных для «среды с памятью» изменение его свойств при длительном нагреве можно описать, учитывая то, что  $a \approx \mu_0$ , формулой:

$$\mu = \mu_0 * \exp(b^*t_{\text{ж}}) \quad (1)$$

где  $\mu_0$  – вязкость свежего масла при температуре измерения,  $b$  – коэффициент, зависящий от химической структуры масла,  $t_{\text{ж}}$  – время с последней смены масла.

Второй величиной, на которую влияет деградация масла, является величина конвективного теплообмена  $h$ . Известно, что она уменьшается по мере снижения качества масла [12]. Коэффициент конвективного теплообмена соевого масла нелинейно уменьшается с 274,4 до 225,0 Вт/м<sup>2</sup>К<sup>-1</sup> при 190°С по мере увеличения времени деградации. Эти экспериментальные

данные хорошо описываются экспоненциальным уравнением первого порядка:  $h = 276,5 - 0,525 * \exp(0,076 * t)$ ; ( $R^2 = 0,97$ ) (рисунок 4). При этом изменения величины  $h$  обратно пропорциональны изменению вязкости деградированного масла, а коэффициент корреляции между этими двумя свойствами достаточно высокий ( $R = -0,98$ ).

При этом изменения величины  $h$  обратно пропорциональны изменению вязкости деградированного масла, а коэффициент корреляции между этими двумя свойствами достаточно высокий ( $R = -0,98$ ).

Коэффициент конвективного теплообмена соевого масла при 180°С также выше для свежего масла (282 Вт/м<sup>2</sup>К), чем для отработанного масла (261 Вт/м<sup>2</sup>К) [20]. Аналогичные результаты имеются для 190°С (285 для свежего и 273 Вт/м<sup>2</sup>К для отработанного соевого масла) [21].

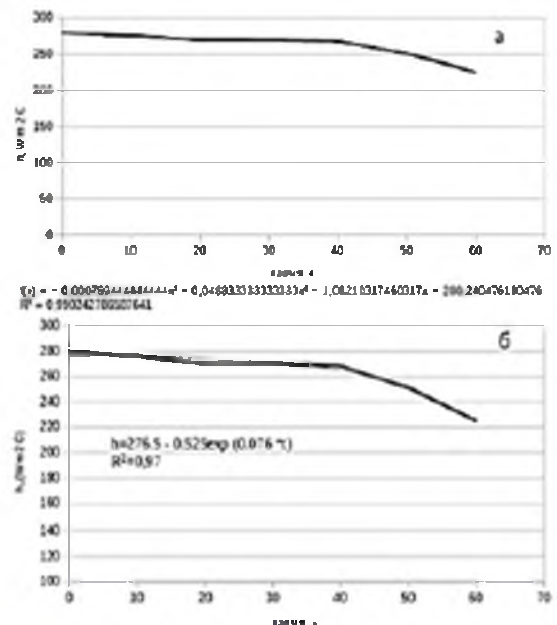


Рисунок 4 – Экспериментальные (по [12]) и расчетные данные по влиянию деградации масла на величину коэффициента конвективной теплопередачи, а) полиномиальная регрессия, б) экспоненциальная регрессия

Таким образом, несмотря на то, что величина  $h$  в настоящее время во всех работах считается константой, на самом деле она является зависящей от времени использования масла переменной. Данная величина изменяется в ходе жарки в достаточно больших пределах (до 20% за цикл использования масла), что, несомненно, оказывает влияние энергетический обмен во время жарки. В связи с этим, несмотря на то, что полиномиальная регрессия дала более высокий коэффициент корреляции, чем экспоненциальная (рисунок 4), в дальнейшем необходимо использовать именно экспоненциальную регрессию, поскольку ее коэффициенты имеют

физический смысл. Вследствие этого

$$h = h_0 \cdot a^{\text{exp}(b \cdot t_{\text{жж}})}, \quad (2)$$

где  $h$  – коэффициент внешнего теплообмена,  $h_0$  – коэффициент внешнего теплообмена со свежим маслом,  $t_{\text{жж}}$  – время, прошедшее с последней замены масла,  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты.

Таким образом, у масла, используемого для жарки, во время жарки обнаруживаются некоторые свойства, характерные для такой неньютоновской «жидкости с памятью», как реопектическая жидкость. Длительный нагрев вызывает значительные изменения таких его физических свойств, как вязкости и коэффициента конвективного теплообмена, которые обязательно должны учитываться при разработках математических моделей жарки во фритюре.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ahromrit A. Heat and mass transfer in deep-frying of pumpkin, sweet potato and taro. [Text] / A. Ahromrit, P.K. Nema // Journal of Food Science and Technology. – 2010. – V. 47(6). – P. 632–637.
2. Costa R.M. Analysis of the heat transfer coefficient during potato frying [Text] / R.M. Costa, F.A.R. Oliveira, O. Delaney, V. Gekas // Journal of Food Engineering. – 1999. – V. 39. – P. 293–299.
3. Fellows P.J. Food processing technology – Principles and practice (2nd ed.) / P.J. Fellows // Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 1996. – P. 331–332.
4. Дэй У.А. Термодинамика простых сред с памятью / У.А. Дэй. // Новости фундаментальной физики. – вып. 4. – Издательство «Мир». – Москва, 1974. – 191 с.
5. Steffe J.F. [Text] / J.F. Steffe // Rheological Methods in Food Process Engineering. 2nd edn. Freeman Press, East Lansing, MI.: 1996.
6. Abdul Ghami A.G. Theoretical and experimental investigation of the thermal inactivation of Bacillus stearothermophilus in food pouches [Text] / A.G. Abdul Ghami, M.M. Farid, X.D. Chen // Journal of Food Engineering. – 2002. – V. 51(3). – P. 221–228.
7. Abdul Ghami A.G. Thermal sterilization of canned food in a 3-D pouch using computational fluid dynamics. [Text] / A.G. Abdul Ghami, M.M. Farid, X.D. Chen, P. Richards // Journal of Food Engineering. – 2001. – V. 48. – P. 147–156.
8. Elert G. The Physics Hypertextbook. Viscosity. 1998–2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://physics.info/viscosity/>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 14.07.2017).
9. Aliche A.A. Guidelines for the rheological characterization of biodiesel [Text] / A.A. Aliche, B.C. Leopércio, F.H. Marchesini, P.R. de Souza Mendes // Fuel. – 2015. – V. 140. – P. 446–452.
10. Travnicek P. Rheoplectic Behavior of Rendered Fat [Text] / P. Travnicek, E. Krcalova, T. Vitez // Pol. J. Environ. Stud. – 2013. – V. 22(5). – P. 1499–1504.

11. Bell A. Effect of composition on fat rheology and crystallization [Text] / A. Bell, M.H. Gordon, W. Jirassubkunakorn, K.W. Smith // Food Chem. – 2007. – V. 101. – P. 799.

12. Tseng Y.C. Total frying-use time effects on soybean-oil deterioration and on tortilla chip quality. [Text] / Y.C. Tseng, R. Moreira, X. Sun // International Journal of Food Science and Technology. – 1996. – V. 31(3). – P. 287–294.

13. Ziaufar A.-M. Oil absorption during deep-fat frying: mechanisms and important factors. [Text] / A.-M. Ziaufar // Engineering Sciences [physics]. AgroParisTech – 2008. – English.

14. Lalas S. Frying stability of Moringa stenopetala seed oil [Text] / S. Lalas, O. Gortzi, J. Tsaknis // Plant Food Hum. Nutr. – 2006. – V. 61(2). – P. 99–108.

15. Kochhar S.P. New theoretical and practical aspects of the frying process. [Text] / S.P. Kochhar, C. Gertz // Eur. J. Lipid Sci. Technol. – 2004. – V. 106. – P. 722–727.

16. Debnath S. Effect of frying cycles on physical, chemical and heat transfer quality of rice bran oil during deep-fat frying of poori: An Indian traditional fried food [Text] / S. Debnath, N.K. Rastogi, A.G. Gopala Krishna, B.R. Lokesh // Food and bioproducts processing. – 2012. – V. 90. – P. 249–256.

17. Максимен В.П. Изменение масла при нагреве [Текст] / В.П. Максимен, Н.В. Федак, Э.Ф. Кравченко, Д.В. Баранов // Известия ВУЗов. Пищевая технология. – 1993. – №1-2. – С. 52–54.

18. Kalogianni E.P. Effect of repeated frying on the viscosity, density and dynamic interfacial tension of palm and olive oil [Text] / E.P. Kalogianni, T.D. Karapanos, R. Miller // Journal of Food Engineering. – 2011. – V. 105. – P. 169–179.

19. Czechowski M. Exhaust opacity in a diesel engine powered with animal fats. [Text] / M. Czechowski, W. Golimowski, T. Sek, J. Szymanowicz // Maintenance and Reliability. – 2015. – V. 17(1). – P. 49–53.

20. Miller K.S. Convective heat transfer coefficient for frying oils. [Text] / K.S. Miller, R.P. Singh // Annual Meeting of Institute of Food Technologists, New Orleans, Louisiana, USA, 1992, June 20-24. Institute of Food Technologists: Chicago, Illinois.

21. Moreira R.G., Palau J.E., Sweat V.E. Thermal properties of tortilla chips during deep-fat frying. [Text] / R.G. Moreira, J.E. Palau, V.E. Sweat // International Winter Meeting of American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan: American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI. – 1992. – Paper No. 92-6595.

Статья поступила в редакцию 26.01.2018

Статья принята к публикации 12.03.2018