

## Исследование динамической вязкости концентратов ячменного солода и цикория

Газибег О. Магомедов,	<sup>1</sup>	mgazibeg@mail.ru
Владимир К. Кочетов,	<sup>2</sup>	kond_kub@mail.ru
Александр А. Смирных,	<sup>3</sup>	ucheba-a.a.smirnykh@mail.ru
Игорь А. Саранов	<sup>1</sup>	mr.saranov@mail.ru

<sup>1</sup> кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронеж. гос. ун-т. инж. техн., пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

<sup>2</sup> кафедра технологии хранения и переработки растениеводческой продукции, Куб-й гос. агр. ун-т ул. Калинина, 13, г. Краснодар, 350044, Россия

<sup>3</sup> кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронеж. гос. ун-т. инж. техн., пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

**Реферат.** Целью исследования является поиск оптимальных условий диспергирования и последующей дегидратации жидких пищевых сред в камере форсуночной распылительной сушки на основе изучения изменения их динамической вязкости в зависимости от температуры, градиентов скоростей и содержания сухого остатка. В качестве объектов исследования были использованы концентраты жаренного цикория и солодового ячменя с содержанием сухого остатка 20, 40, 60 и 80%. Исследования динамической вязкости проводились на измерительном комплексе, основанном на ротационном вискозиметре Rheotest II, аналогово-цифровом преобразователе, модуле Laurent и персональном компьютере с уникальным программным обеспечением, позволяющим фиксировать в режиме реального времени (не только на ленточном самописце, но и в виде графических файлов) характер изменения вязкостных характеристик концентратов. Регистрация изменения динамической проводилась при изменении градиентов скоростей сдвига от  $1,0 \text{ c}^{-1}$  до  $27,0 \text{ c}^{-1}$  и температурах термостатирования продуктов: 35, 55, 75 °C. В предлагаемой статье, излагаются как принципы работы комплекса, так и методика проведения исследований. Результаты исследований представлены в виде графических зависимостей эффективной вязкости от градиента скорости сдвига и кривых течения (зависимостей касательных напряжений от градиента скорости), по которым определены режимы течения, найдены оптимальные режимы концентратов диспергирования в камеры распылительных сушилок при получении порошкообразных полуфабрикатов и инстантировании: содержание сухого остатка - 40 %, температура концентрата - 75 °C, градиент скорости в канале пневматической форсунки не менее  $20 \text{ c}^{-1}$ .

**Ключевые слова:** вязкость, реология, вискозиметр, распылительная сушка.

## Dynamic viscosity study of barley malt and chicory concentrates

Gazibeg O. Magomedov,	<sup>1</sup>	mgazibeg@mail.ru
Vladimir K. Kochetov,	<sup>2</sup>	kond_kub@mail.ru
Aleksandr A. Smirnykh,	<sup>3</sup>	ucheba-a.a.smirnykh@mail.ru
Igor A. Saranov	<sup>1</sup>	mr.saranov@mail.ru

<sup>1</sup> bakery, confectionery, pasta and grain processing technology industries department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394066, Russia

<sup>2</sup> crop production storage and processing technology department, Kuban State Agrarian University, st. Kalinina, 13, Krasnodar, 350044, Russia

<sup>3</sup> fat technology, processes and apparatuses of chemical and food industries department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394066, Russia

**Summary.** The purpose of research is to find optimal conditions for dispersing and subsequent dehydration of liquid food environments in the nozzle spray drying chamber through the study of dynamic changes in viscosity according to temperature, velocities gradients and dry residue content. The objects of study were roasted chicory and malt barley concentrates with dry residue content of 20, 40, 60 and 80%. Research of dynamic viscosity were carried out at the measuring complex based on the rotational viscometer Rheotest II, analog-to-digital converter, module Laurent and a personal computer with a unique software that allows to record in real time (not only on a tape recorder, but also in the form of graphic files) the behavior of the viscosity characteristics of concentrates. Registration of changes of dynamic viscosity was carried out at a shear rate gradient from  $1,0 \text{ c}^{-1}$  to  $27,0 \text{ c}^{-1}$  and the products temperature thermostating : 35, 55, 75 °C. The research results are presented in the form of graphic dependences of effective viscosity on shear rate and flow curves (dependencies of shear stresses on the velocity gradient), which defined flow regimes, the optimal modes of dispersion concentrates into spray dryer chambers in obtaining of powdered semi-finished products and instanting were found: dry residue content - 40 %, concentrate temperature - 75 °C, velocity gradient in the air channel of the nozzle at least  $20 \text{ c}^{-1}$ .

**Keywords:** viscosity, rheology, viscometer, spray drying.

Для цитирования

Магомедов Г. О., Кочетов В. К., Смирных А. А., Саранов И. А. Исследование динамической вязкости концентратов ячменного солода и цикория // Вестник ВГУИТ. 2016. № 3. С. 11–17. doi:10.20914/2310-1202-2016-3-11-17

For citation

Magomedov G. O., Kochetov V. K., Smirnykh A. A., Saranov I. A. Dynamic viscosity study of barley malt and chicory concentrates. *Vestnik VSUET* [Proceedings of VSUET]. 2016. no. 3. pp. 11–17. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2016-3-11-17

### Введение

На сегодняшний день современная пищевая промышленность активно производит и использует быстрорастворимые порошкообразные полуфабрикаты, которые получают путём сушки концентратов, экстрактов и смесей.

Большой популярностью у потребителей пользуются быстрорастворимые напитки на основе цикорного концентрата, а в кондитерском производстве набирает популярность концентрат ячменного солода в жидком или порошкообразном виде. При производстве таких полуфабрикатов на стадии сушки распылением необходимо знать характер изменения вязкости распыляемого жидкого продукта в исследуемых интервалах температур и скорости течения по цилиндрическому каналу форсунки.

#### 1.1 Материалы и методы исследования

Для исследования динамической вязкости был использован измерительный комплекс, включающий в себя ротационный вискозиметр Rheotest II, водяной термостат, компенсационный самопишущий прибор КСП – 4, аналогово-цифровой преобразовательный модуль Laurent и персональный компьютер, что позволяет фиксировать в режиме реального времени (на ленте прибора КСП – 4) и в виде графических файлов в формате jpg (в памяти персонального компьютера) зависимость

выходного сигнала ( $\alpha$ ) измерительного прибора Rheotest II (рисунок 1), который позволяет в лабораторных условиях фиксировать кривые текучести в больших диапазонах напряжений сдвига и скоростей сдвига, а также измерять структурную вязкость, дилатанцию, тиксотропию и реопексию [6, 7].

Параметры проведения реологических исследований максимально приближены идентичным параметрам течения жидкости в узлах диспергирования установок для распылительной сушки. Исследования проводили при температурах термостатирования продуктов: 35, 55, 75 °С. Градиент скорости сдвига изменялся от 1,0 с<sup>-1</sup> до 27,0 с<sup>-1</sup>, а количество сухих веществ раствора варьировалось с 20 до 80% с шагом 20%.

По диаграммам, полученным в ходе экспериментов была найдена величина  $\alpha$  (изменяется от 1 до 100). По таблице, прилагаемой к паспорту прибора выбирали значение константы прибора в зависимости от соответствующих условий измерения. Затем, по формулам 1 и 2 рассчитывали касательные напряжения  $\tau$ , Па и величину эффективной динамической вязкости  $\eta$ , Па·с [1].

$$\tau = z \cdot \alpha \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2)$$

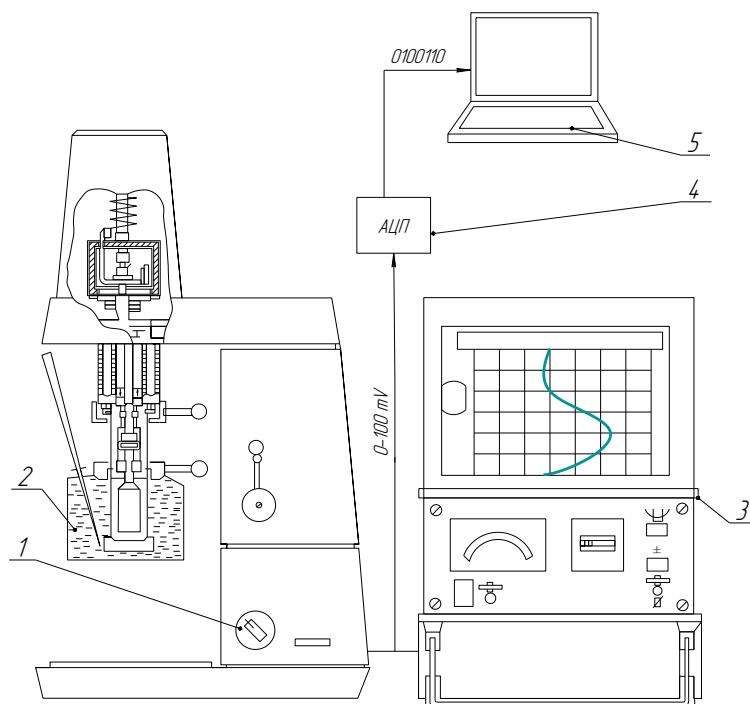


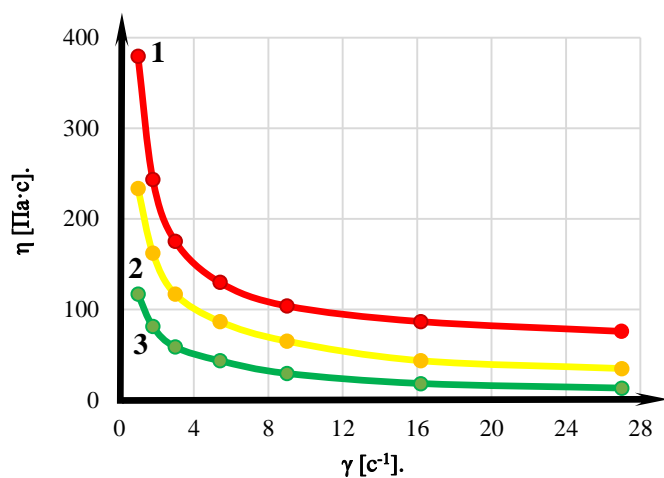
Рисунок 1. Измерительный комплекс: 1 – Rheotest II, 2 – водяной термостат, 3 – компенсационный самопишущий прибор КСП – 4, 4 – аналогово-цифровой преобразовательный модуль Laurent, 5 – персональный компьютер

Figure 1. Measuring complex: 1 – Rheotest II, 2 – water thermostat, 3 – compensating recorder KSP – 4, 4 – analog-to-digital converter module Laurent, 5 – personal computer

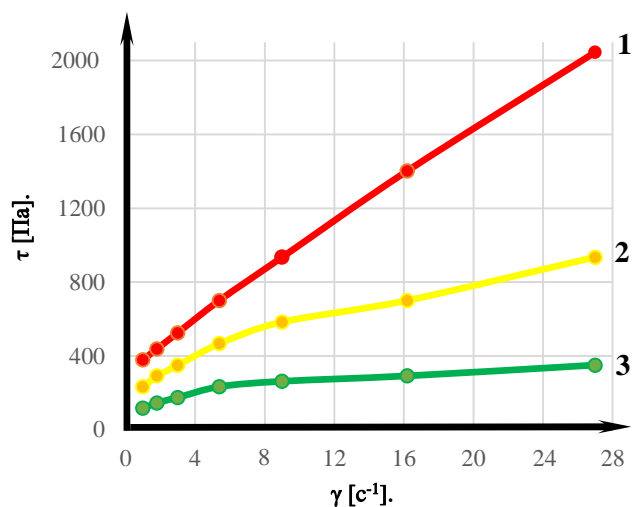
## 1.2 Полученные результаты и их обсуждение

В результате проведённых исследований построены реологические зависимости для

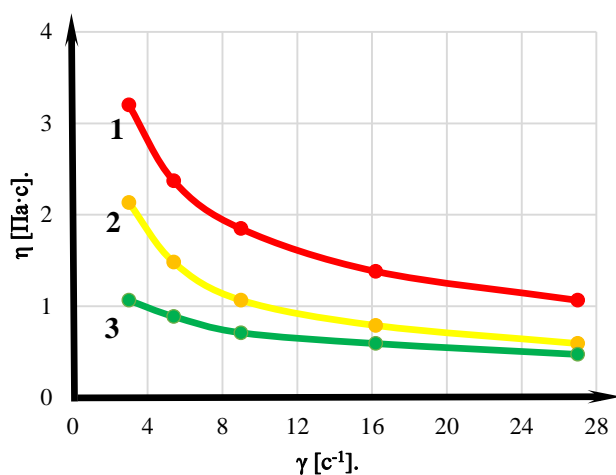
концентрата ячменного солода (КЯС) (рисунок 2) и цикорного концентрата (ЦК) (рисунок 3) с содержанием сухих веществ 20, 40, 60 и 80%.



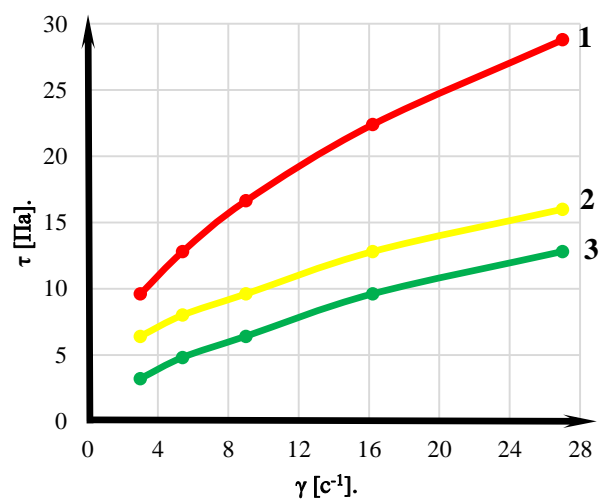
a)



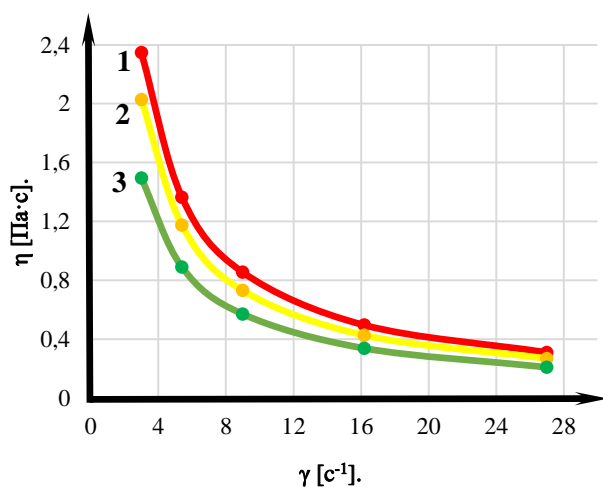
b)



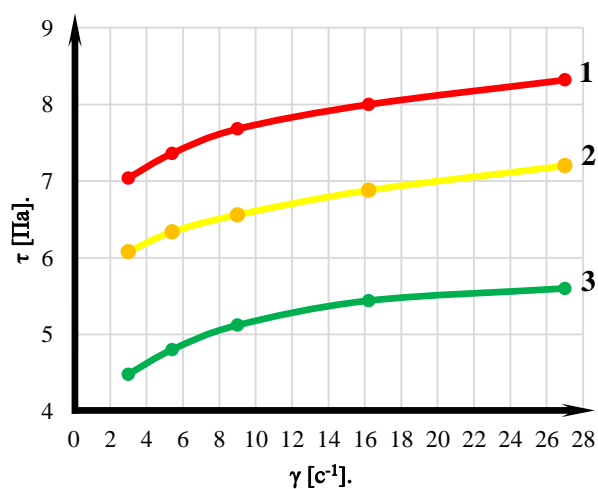
c)



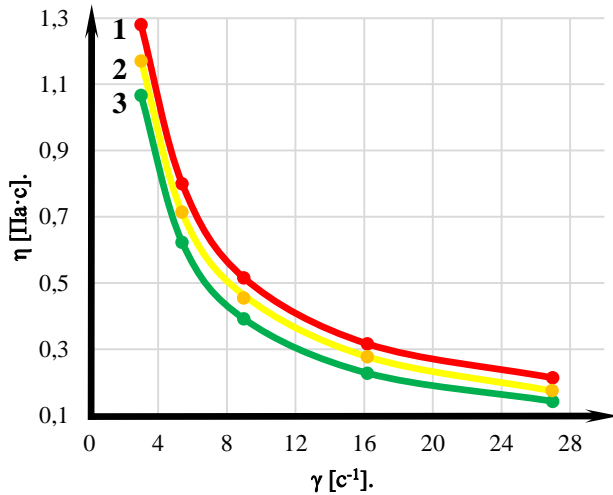
d)



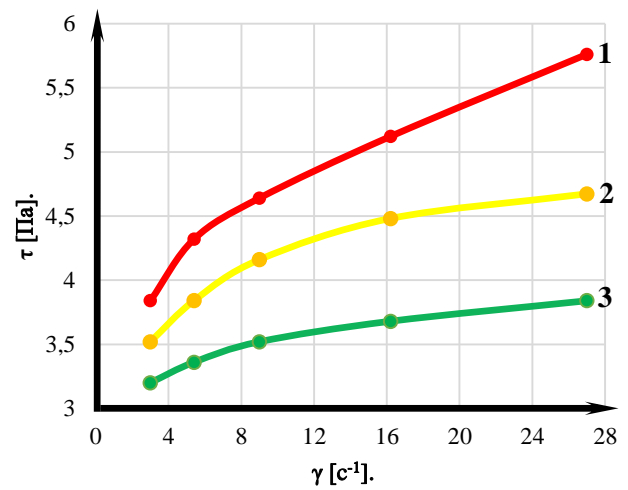
e)



f)



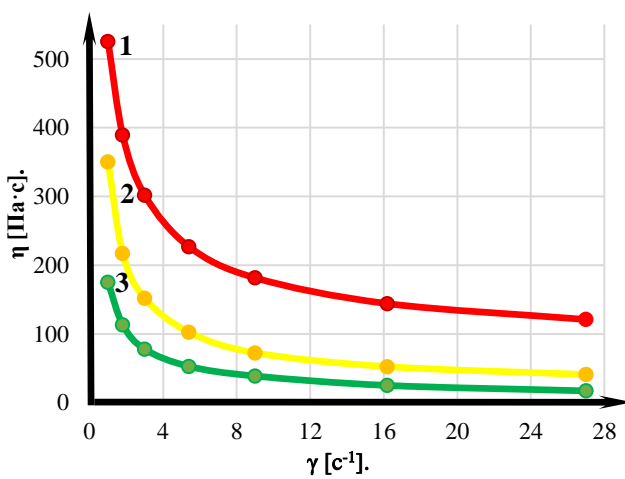
g)



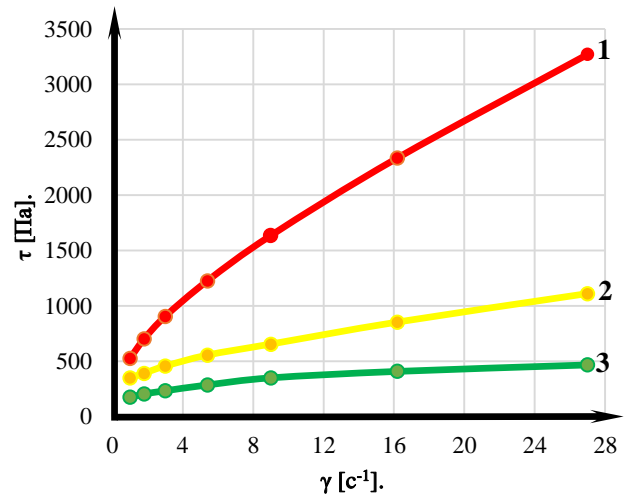
h)

Рисунок 2. Реологические характеристики концентрата ячменного солода спустя 8–12 с. с момента приложения нагрузки: а, б – СВ = 80%; в, д – СВ = 60%; е, ф – СВ = 40%; г, з – СВ = 20%; а, в, е, г – зависимости эффективной вязкости от скорости сдвига (1 – 35°C, 2 – 55°C, 3 – 75°C), б, в, ф, з – зависимости касательных напряжений от скорости сдвига (1 – 35°C, 2 – 55°C, 3 – 75°C)

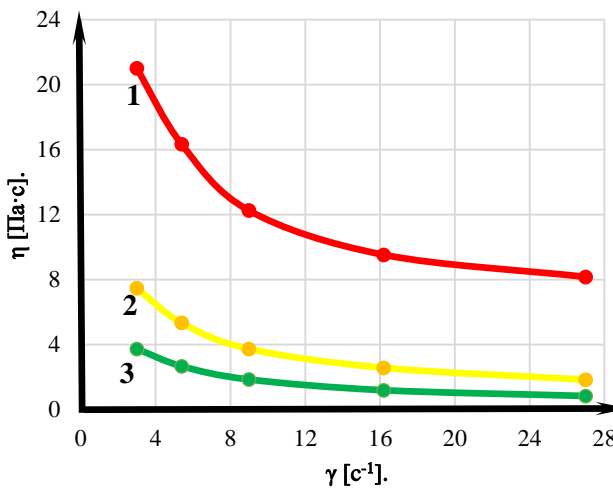
Figure 2. The rheological characteristics of aqueous solutions barley malt concentrate after 8–12 seconds after applied velocity gradient: а, б – DM = 80%; в, д – DM = 60%; е, ф – DM = 40%; г, з – DM = 20%; а, в, е, г – effective viscosity dependence on shear rate (1 – 35°C, 2 – 55°C, 3 – 75°C); б, в, ф, з – dependence of shear stresses on the shear rate (1 – 35°C, 2 – 55°C, 3 – 75°C)



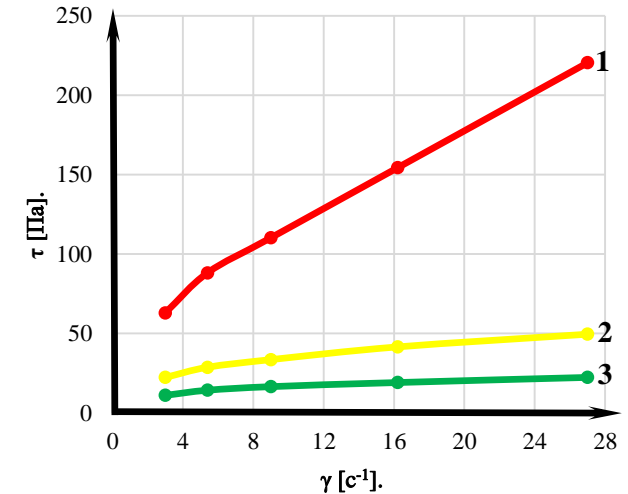
a)



б)



в)



д)

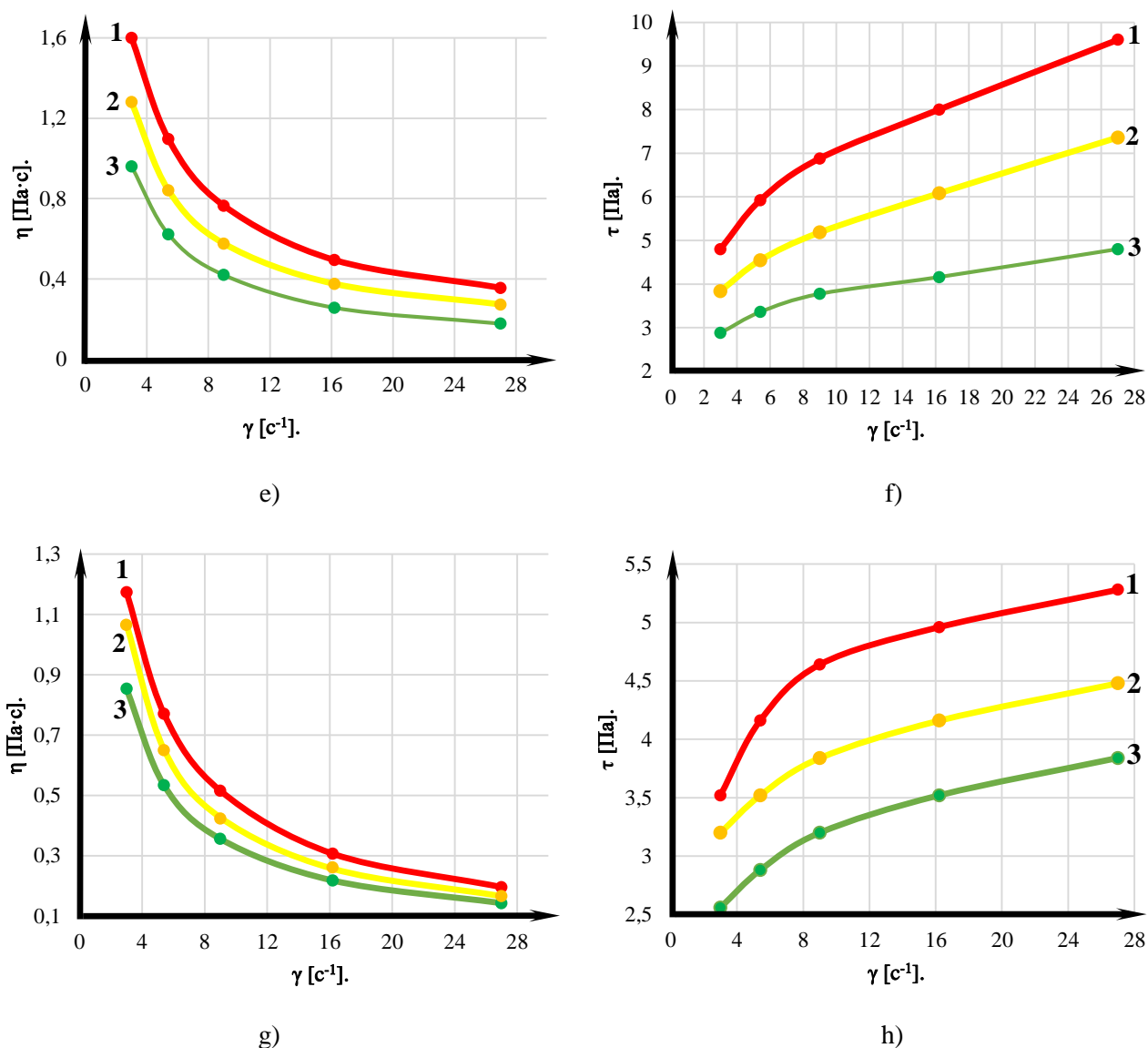


Рисунок 3. Реологические характеристики цикорного концентрата спустя 8–12 с. с момента приложения нагрузки: а, б – СВ = 80%; с, д – СВ = 60%; е, ф – СВ = 40%; г, h – СВ = 20%; а, с, е, г – зависимости эффективной вязкости от скорости сдвига (1 – 35°C, 2 – 55°C, 3 – 75°C.); б, д, ф, h – зависимость касательных напряжений от скорости сдвига (1 – 35°C, 2 – 55°C, 3 – 75°C)

Figure 3. Rheological characteristics aqueous solutions chicory concentrate after 8–12 seconds with the application of after applied velocity gradient: а, б – DM = 80%; с, д – DM = 60%; е, ф – DM = 40%; г, h – DM = 20%; а, с, е, г – effective viscosity dependence on shear rate (1 – 35°C, 2 – 55°C, 3 – 75°C.); б, д, ф, h – dependence of shear stresses on the shear rate (1 – 35°C, 2 – 55°C, 3 – 75°C)

На реологических кривых явным образом выделяются два участка: область резкого снижения вязкости в очень узком диапазоне напряжений сдвига ( $\gamma = 1 \div 20 \text{ c}^{-1}$ ) и ньютоновское течение маловязкой системы ( $\gamma = 3 \div 20 \text{ c}^{-1}$ ) [2, 3].

В результате исследований реологических характеристик КЯС и ЦК установлено, что максимальная эффективная вязкость достигается при максимальном содержании сухих веществ в концентрате, при минимальной температуре и минимальной скорости сдвига

(СВ = 80%,  $t = 35^\circ\text{C}$ ,  $\gamma = 1,8 \text{ c}^{-1}$ ) в исследуемом диапазоне температур ( $t = 35 \div 75^\circ\text{C}$ ), градиентах скоростей ( $\gamma = 1,8 \div 20 \text{ c}^{-1}$ ) и составляет  $\eta_{\text{сэя}} = 379,6 \text{ Па}\cdot\text{с}$  для КЯС и  $\eta_{\text{эжц}} = 525,6 \text{ Па}\cdot\text{с}$  для ЦК.

При ступенчатом увеличении градиента скорости сдвига до  $\gamma = 20 \text{ c}^{-1}$  эффективная вязкость КЯС и ЦК уменьшается по гиперболической траектории на 80% и 77% до значений  $\eta_{\text{сэя}} = 75,7 \text{ Па}\cdot\text{с}$  и  $\eta_{\text{эжц}} = 121,13 \text{ Па}\cdot\text{с}$  соответственно.

Рассмотрим процесс диспергирования экстракта КЯС и ЦК пневматической форсункой внутри корпуса цилиндрической сушильной камеры установки для распылительной суши. Пневматическая форсунка, представленная на рисунке 4, имеет цилиндрический канал, после прохождения которого, продукт под воздействием сжатого воздуха (давлением  $P = 3-8$  атм.) диспергируется в камеру распылительной сушилки. Средняя рекомендуемая скорость движения продукта в канале форсунки  $v_d = 0,5 \div 1,0$  м/с [2].

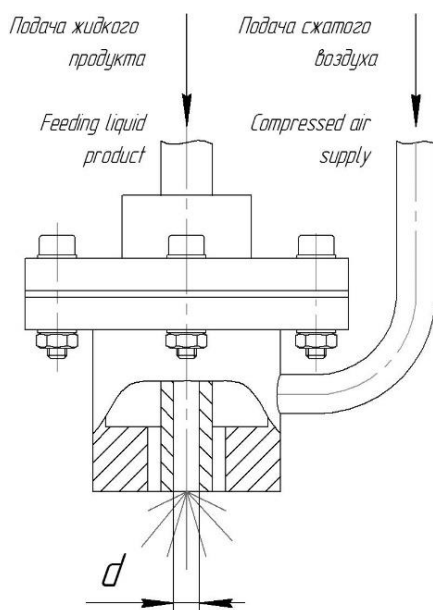


Рисунок 4. Пневматическая форсунка

Figure 4. Pneumatic nozzles

Одним из основных факторов интенсификаций процесса сушки является повышение дисперсности частиц распыла раствора. Поэтому необходимо стремиться максимально снизить поверхностное натяжение и вязкость раствора перед распылением. Анализ кривых течений (рисунок 2, 3) показывает, что для обоих растворов — концентратов цикория и ячменного солода, минимальная вязкость наблюдается при максимальной

## ЛИТЕРАТУРА

1 Остриков А.Н., Смирных А.А., Дорохин С.В. Исследование характера изменения динамической вязкости молочно-фруктовых продуктов // Вестник воронежского государственного университета инженерных технологий. 2013. № 2 (56). С. 47–52.

2 Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 7. Физика сплошных сред. М.: Мир, 2013. 288 с.

3 Авроров В.А., Тутов Н.Д. Основы реологии пищевых продуктов: учебное пособие. Старый оскол: ТНТ, 2014. 268 с.

температуре  $t$  °С, минимальном содержании СВ и максимальном градиенте скорости. Известно, что наибольшая экономическая эффективность распылительной суши достигается при концентрации растворов 40–50% сухих веществ. Поэтому нами были выбраны режимы распыления СВ = 40%,  $t = 75$  °С,  $\gamma$  – не менее  $20$  с<sup>-1</sup>. Для обеспечения течения раствора в канале пневматической форсунки с градиентом скорости  $20$  с<sup>-1</sup> и выше с учётом производительности экспериментальной распылительной сушильной установки необходимо рассчитать диаметр капилляра канала форсунки.

Для обеспечения заданной производительности распылительной сушильной установки, величина расхода продукта перекачиваемого перистальтическим насосом  $Q_v = (1,3 \div 8,3) \cdot 10^{-7}$  м<sup>3</sup>/с, следовательно, площадь сечения канала форсунки:

$$S = \frac{Q_v}{v_d} = (1,3 \div 16,6) \cdot 10^{-7} \text{ м}^2, \quad (3)$$

следовательно, диаметр канала:

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = (1,29 \div 4,59) \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (4)$$

Закключение.

Процесс диспергирования продукта целесообразно осуществлять в области его разрушенной структуры (участок ньютоновского течения), в нашем случае он наблюдается при градиентах скоростей  $\gamma_1$  выше  $20$  с<sup>-1</sup> (рисунки 5в, г и 6в, г). в этой зоне эффективная вязкость разрушенной структуры в данном диапазоне градиентов скоростей практически не будет меняться.

Полученные результаты могут быть положены в основу алгоритмов разработки технологических решений, позволяющих реализовать процессы обезвоживания жидких концентратов до порошкообразных полуфабрикатов путём сушки распылением растворов с минимальной вязкостью, интенсификацией процесса сушки.

4 Stephan K. Viscosity of dense fluids // Springer Science & Business Media. 2013.

5 Ибрагимов И. Е. Реология пищевого сырья, продуктов, полуфабрикатов. Конспект лекций: учебное пособие. М.: Экон-Информ, 2010. 144 с.

6 Магомедов Г.О., Пономарева Е.И., Магомедов М.Г., Журавлев А.А. и др. Использование карамельной патоки для регулирования реологических свойств яблочного пюре // Успехи современного естествознания. 2014. № 11. Ч. 3. С. 123-124.

7 Brenner H. ed al. Interfacial transport processes and rheology. Elsevier, 2013.

## REFERENCES

1 Ostrikov A.N., Smirnykh A.A., Dorokhin S.V. Study nature of the change of the dynamic viscosity of the milk-fruit products *Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii* [Proceedings of VSUET] 2013, no. 2 (56), pp. 47–52. (in Russian).

2 Feynman R., Leyton R., Sands M. Feynmanovskiye lektsii po fizike. Fizika sploshnykh sred [The Feynman Lectures on Physics. Vol. 7. Physics of continuous media] Moscow, Mir, 2013. 288 p. (in Russian).

3 Avrorov V.A., Tutov N.D. Fundamentals of the rheology of foods [Osnovy reologii pishchevykh produktov. Uchebnoye posobie] Staryi Oskol, TNT, 2014. 268 p. (in Russian).

4 Stephan K. Viscosity of dense fluids. Springer Science & Business Media, 2013.

5 Ibragimova I. E. Rheology of food raw materials, products, semi-finished products. Lecture notes [Reologiya pishchevogo syr'ya, produktov, polufabrikatov. Konspekt lektsiy: Uchebnoye posobiye] Moscow, Ekon-Inform, 2010. 144 p. (in Russian).

6 Magomedov G.O., Ponomareva E.I., Magomedov M.G., Zhuravlev A.A. et al. The use of caramel syrup to control the rheological properties of apple puree. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Successes of modern science] 2014, no. 11, part 3, pp. 123-124. (in Russian).

7 Brenner H. et al. Interfacial transport processes and rheology. Elsevier, 2013.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Газибег О. Магомедов** профессор, заведующий, кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронеж. гос. ун-т. инж. техн., пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, mgazibeg@mail.ru

**Владимир К. Кочетов** профессор, профессор, кафедра технологии хранения и переработки растениеводческой продукции, Куб-ий гос. агр. ун-т ул. Калинина, 13, г. Краснодар, 350044, Россия, kond\_kub@mail.ru

**Александр А. Смирных** доцент, доцент, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронеж. гос. ун-т. инж. техн., пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394066, Россия, ucheba-a.a.smirnykh@mail.ru

**Игорь А. Саранов** аспирант, кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронеж. гос. ун-т. инж. техн., пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, mr.saranov@mail.ru

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Gazibeg O. Magomedov** professor, head of department bakery technology, confectionery, pasta and grain processing industries department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394066, Russia, e-mail mgazibeg@mail.ru

**Vladimir K. Kochetov** professor, professor, department of crop production storage and processing technology, Kuban State Agrarian University, st. Kalinina, 13, Krasnodar, 350044, Russia, e-mail kond\_kub@mail.ru

**Aleksandr A. Smirnykh**, associate professor, associate professor, department of fat technology, processes and devices of chemical and food industries, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394066, Russia, e-mail ucheba-a.a.smirnykh@mail.ru

**Igor A. Saranov** graduate student, bakery technology, confectionery, pasta and grain processing industries department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, Russia, e-mail mr.saranov@mail.ru

## КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

**Газибег О. Магомедов** предложил методику проведения эксперимента и организовал производственные испытания

**Владимир К. Кочетов** обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провёл эксперимент, выполнил расчёты

**Александр А. Смирных** консультация в ходе исследования

**Игорь А. Саранов** написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат.

## CONTRIBUTION

**Gazibeg O. Magomedov** proposed a scheme of the experiment and organized production trials

**Vladimir K. Kochetov** review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

**Aleksandr A. Smirnykh** consultation during the study

**Igor A. Saranov** wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

ПОСТУПИЛА 06.07.2016

RECEIVED 7.6.2016

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 25.08.2016

ACCEPTED 8.25.2016