

УДК 664.647.3

Профессор А.Н. Остриков, доцент А.А. Смирных,
аспирант С.В. Дорохин

(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра процессов и аппаратов химических и пищевых производств, тел. (4732) 55-35-54

Исследование характера изменения динамической вязкости молочно-фруктовых продуктов

Изучен характер изменения динамической вязкости молочно-фруктовых продуктов при свободном стекании пюре по вертикальной стенке вакуум-камеры при двухстадийном вакуум-выпаривании. Изучены влияния температуры выпаривания и влажности продукта на реологические свойства молочно-фруктовых смесей.

The variation of the dynamic viscosity of dairy products and fruit puree with the free run-off on the vertical wall of the vacuum chamber with a two-stage vacuum evaporation was studied. The effect of evaporation temperature and product moisture on the rheological properties of milk and fruit blends was investigated.

Ключевые слова: выпаривание, вязкость, молочно-фруктовая смесь.

Одним из основных этапов технологии производства молочно-фруктовых концентратов методом двухстадийного выпаривания является кипение пюре при свободном стекании его по вертикальной стенке вакуум-камеры. Однако для правильной организации процесса выпаривания влаги из движущейся вниз пленки пюре необходимо знать характер изменения динамической вязкости концентрируемого пюре в исследуемом интервале температур. Определяющее значение на протекание процесса выпаривания и качество получаемого продукта оказывают реологические свойства сырья, которые, в свою очередь, зависят от таких параметров, как исходная влажность, дисперсность пюре, температура выпаривания и др. Особенно важно оценить влияние температуры на эти свойства. Также необходимо установить, к какому классу реологических тел относятся исследуемые молочно-фруктовые смеси.

Исследование динамической вязкости молочно-фруктовых продуктов проводили на структурном ротационном вискозиметре «Реотест-2» (Германия) (рисунок 1) [1]. Вискозиметр подходит как для определения динамической вязкости ньютоновских жидкостей, так и для проведения глубоких реологических исследований над неньютоновскими жидкостями. Им можно измерить следующие аномалии текучести: структурную вязкость, дилатацию,

пению, реопексию. Реологические свойства вещества можно исследовать или в цилиндрическом измерительном устройстве (ЦИУ) по Куэтту, или в устройстве конус-плита.



Рисунок 1 - Структурный ротационный вискозиметр «Реотест-2»

В ЦИУ измеряемое вещество находится в кольцеобразном зазоре системы соосных цилиндров. Наружный стационарный цилиндр радиуса R , оформленный в качестве мерного бачка, принимает измеряемое вещество и с целью регулирования температуры окружается сосудом для регулирования температуры, предназначенным для присоединения термостата с циркуляцией жидкости. Измерительный вал соединяет вра-

шающийся на постоянной угловой скорости ω внутренний цилиндр радиуса r и длины l с цилиндрической винтовой пружиной, отклонение которой представляет меру вращающего момента M , действующего на внутреннем цилиндре.

Отклонение звена пружины ощущается потенциометром сопротивления расположенного в мостовой схеме, причем измерение диагонального тока мостика пропорционально вращающему моменту M звена пружины.

Можно точно исчислить касательное напряжение τ_r и градиент напряжения на срез D_r для системы соосных цилиндров. Обе величины непостоянны в кольцеобразном зазоре. Поэтому стремятся к соотношению радиусов $r/R \approx 1$ и относят рассчитанные параметры τ_r и D_r к радиусу r внутреннего цилиндра. Существуют следующие соотношения:

– касательное напряжение τ_r , Па:

$$\tau = \frac{M}{2\pi \cdot l \cdot r}; \quad (1)$$

– градиент напряжения на срез D_r , с^{-1} :

$$D = \frac{\alpha \cdot \omega \cdot R}{R - r}; \quad (2)$$

– вязкость η , Па·с:

$$\eta = \frac{\tau}{D} \quad (3)$$

Алгоритм расчета величины эффективной вязкости при проведении исследований с помощью ротационного вискозиметра «Реотест-2» [2] представлен ниже:

1. необходимо по диаграмме, полученной при проведении исследований определить величину α (изменяется от 1 до 100);

2. по таблице, прилагаемой к паспорту прибора выбрать значение константы прибора – z для соответствующих условий проведения эксперимента (скорость I или II и тип измерительной ячейки) и использовать её значение для расчета касательного напряжения τ , Па:

$$\tau = z \cdot \alpha. \quad (4)$$

3. по таблице, прилагаемой к паспорту прибора выбрать величину градиента скорости сдвига γ , с^{-1} , соответствующую условиям проведения эксперимента (скорость и тип измерительной ячейки) и использовать её значение для расчета эффективной динамической вязкости η , Па·с:

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \quad (5)$$

Параметры проведения реологических исследований были выбраны в зависимости от технических характеристик вакуум-камеры, ис-

пользуемой в дальнейших экспериментах, и режима выпаривания исследуемых овощных пюре. Каждый опыт, соответствующий определенной нагрузке, записывали на осциллограмму на протяжении не менее одного полного оборота внутреннего ротора вискозиметра.

В результате проведенных исследований построены реологические зависимости для поликомпонентных смесей, содержащих:

– 45 % пахты, 33 % груши, 12 % облепихи, 10 % айвы;

– 47,5 % пахты, 21 % яблоко, 16,5 % груши, 15 % абрикоса;

– 46 % пахты, 20 % яблоко, 20 % персика, 14 % крыжовника;

– 48 % пахты, 15 % груши, 13 % абрикоса, 12 % персика, 12 % сливы

в исследуемом интервале влажности продукта и изменения температур вертикальной стенки вакуум-камеры (рисунки 2 – 9).

На реологических кривых явным образом выделяются три участка. Это область резкого падения вязкости в очень узком диапазоне напряжений сдвига ($\gamma = 1 \div 3 \text{ с}^{-1}$), неньютоновское течение маловязкой системы ($\gamma = 3 \div 16 \text{ с}^{-1}$) и область ньютоновского течения ($\gamma = 16 \div 49 \text{ с}^{-1}$) [3].

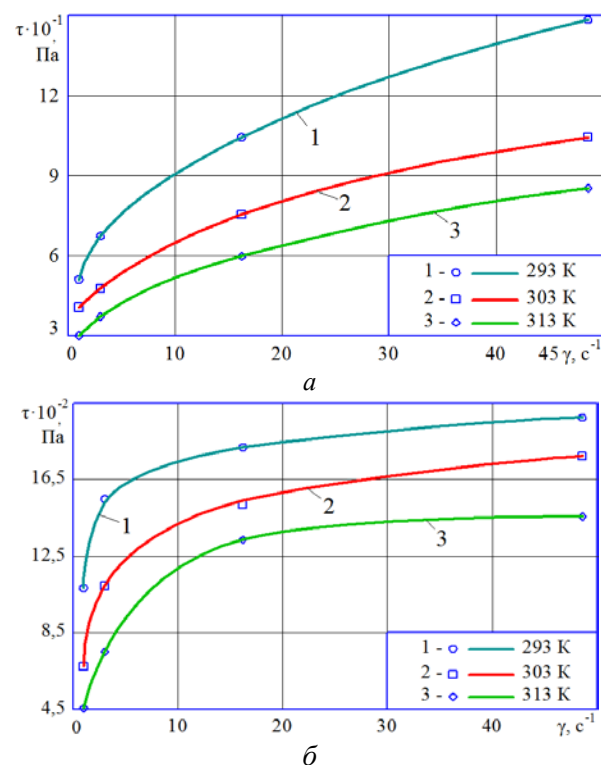


Рисунок 2 - Кривые течения поликомпонентной смеси № 1 при различных температурах при влажности, W , %: а) $W = 91,2$ %, б) $W = 72,3$ %

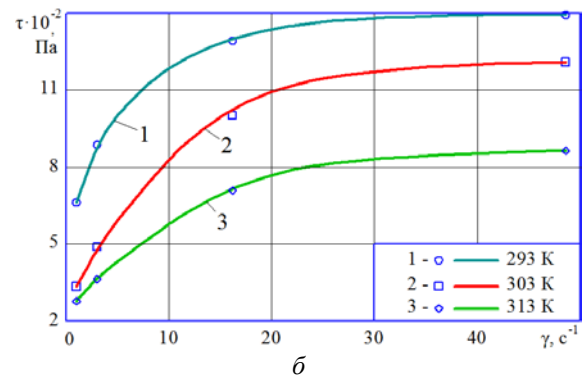
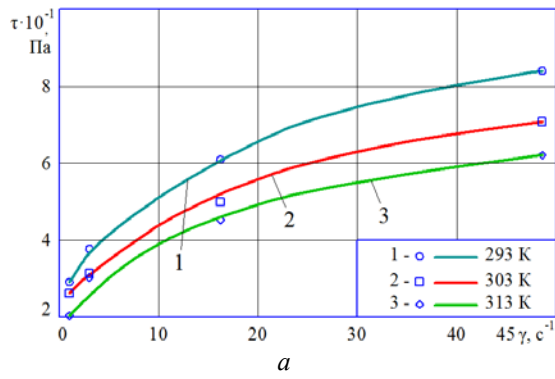


Рисунок 3 - Кривые течения поликомпонентной смеси № 2 при различных температурах при влажности, W , %:
а) $W = 90,4\%$, б) $W = 73,4\%$

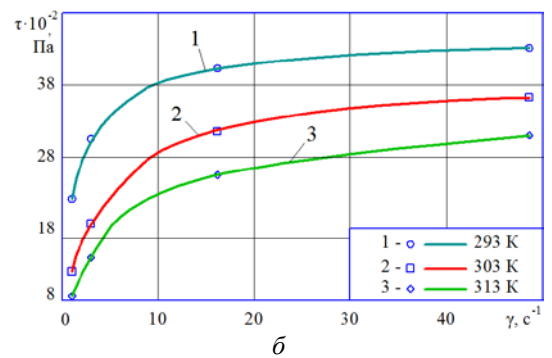
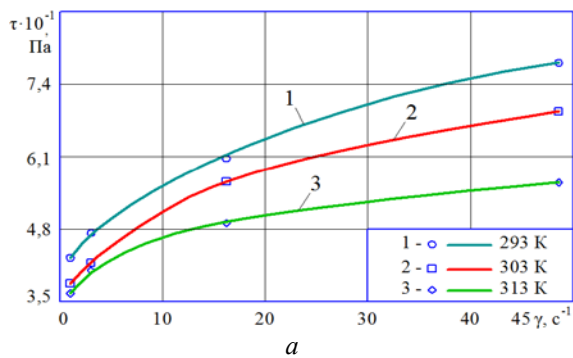


Рисунок 4 - Кривые течения поликомпонентной смеси № 3 при различных температурах при влажности, W , %:
а) $W = 91,4\%$, б) $W = 71,6\%$

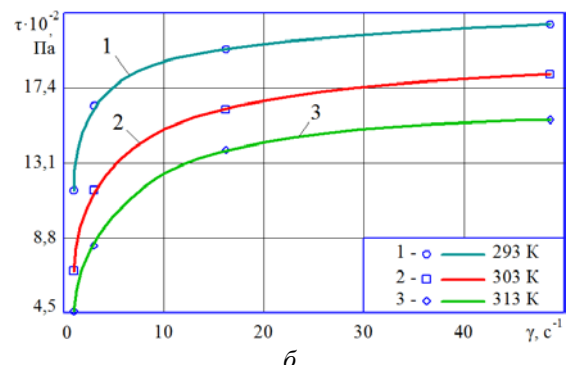
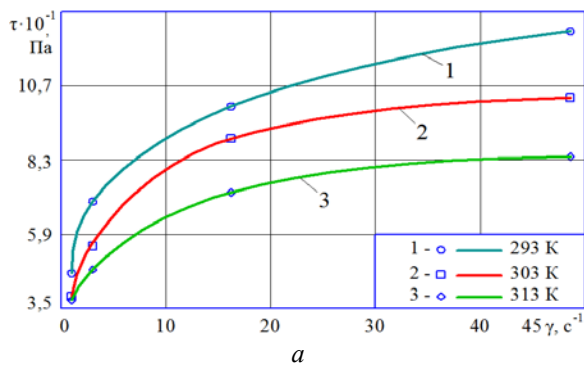


Рисунок 5 - Кривые течения поликомпонентной смеси № 4 при различных температурах при влажности, W , %:
а) $W = 91,1\%$, б) $W = 75,6\%$

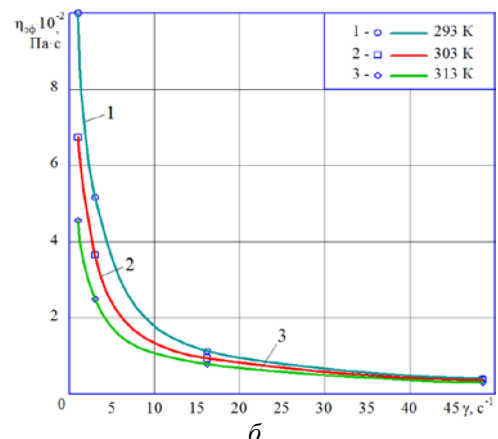
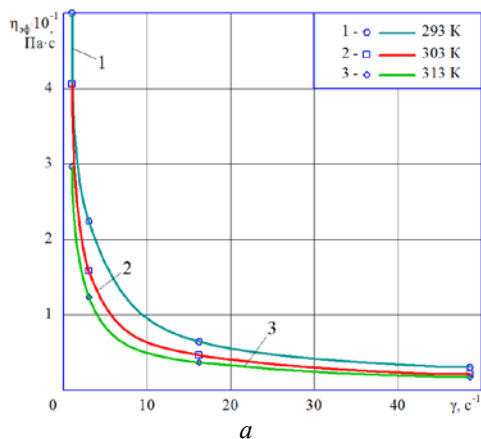


Рисунок 6 - Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига для поликомпонентной смеси № 1 при различных температурах при влажности, W , %: а) $W = 91,2\%$, б) $W = 72,3\%$

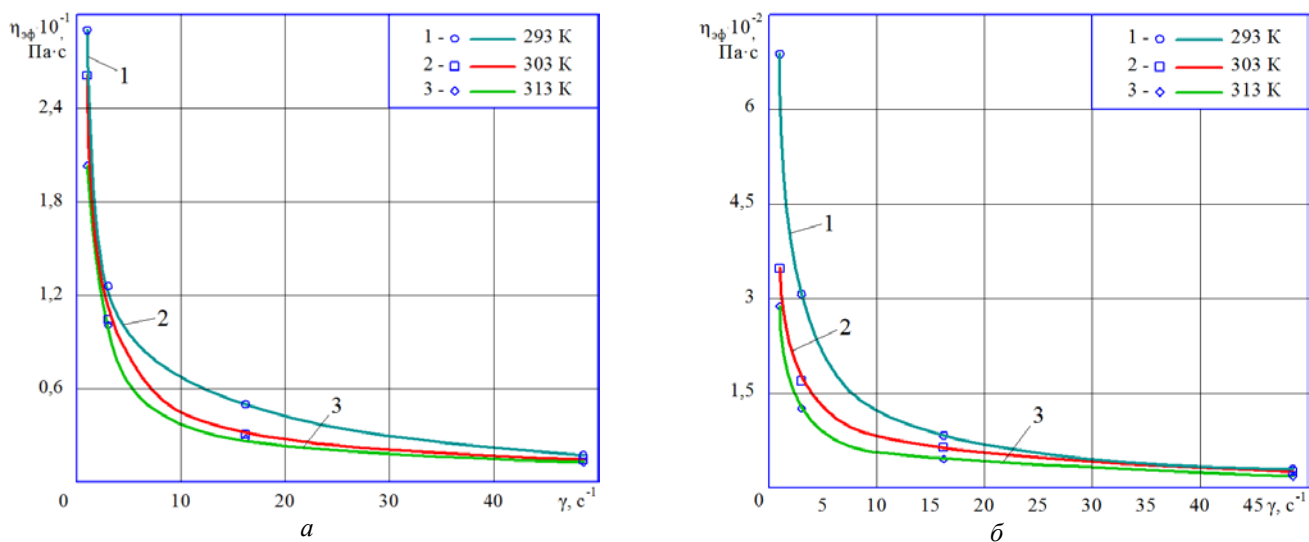


Рисунок 7 - Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига для поликомпонентной смеси № 2 при различных температурах при влажности, W , %: а) $W = 90,4\%$, б) $W = 73,4\%$

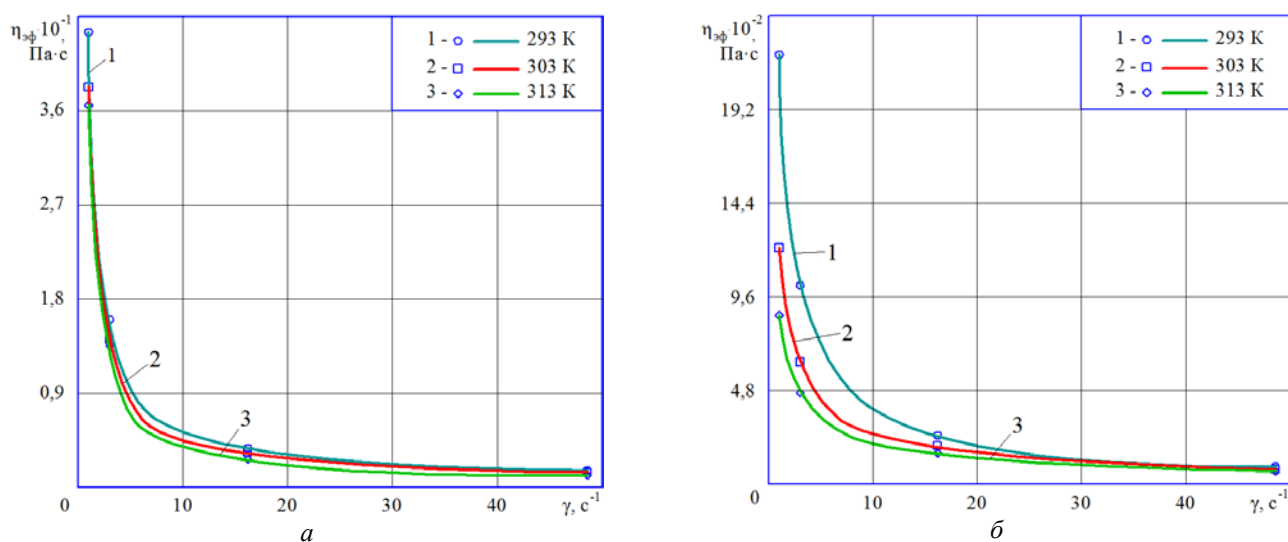


Рисунок 8 - Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига для поликомпонентной смеси № 3 при различных температурах при влажности, W , %: а) $W = 91,4\%$, б) $W = 71,6\%$

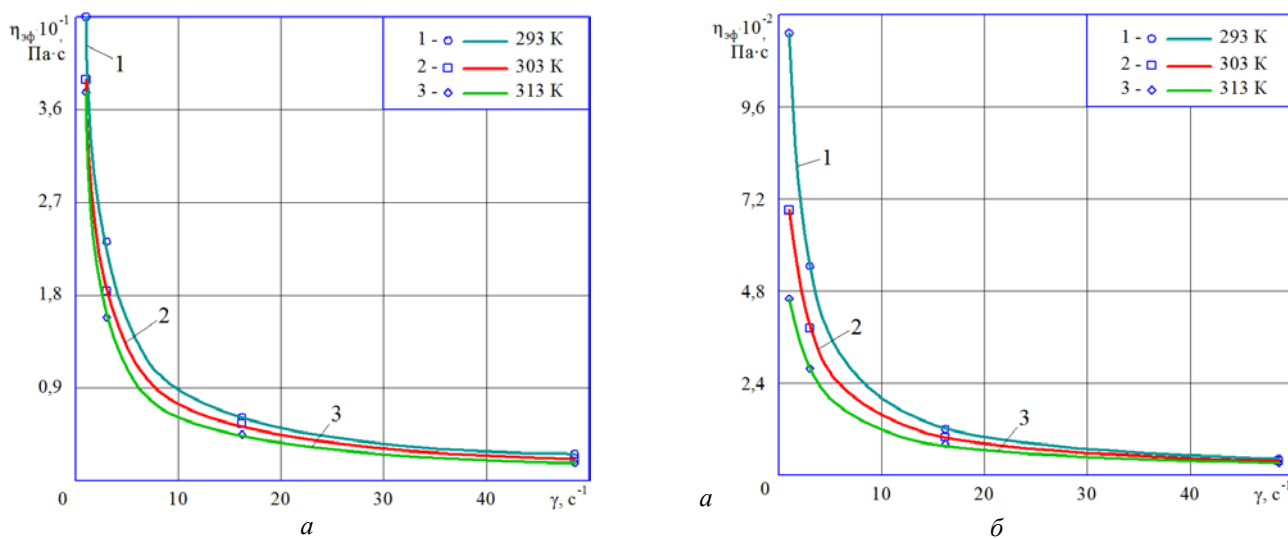


Рисунок 9 - Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига для поликомпонентной смеси № 4 при различных температурах при влажности, W , %: а) $W = 91,1\%$, б) $W = 75,6\%$

Резкое падение вязкости обусловлено тем, что дисперсная фаза образует непрерывную трехмерную структуру (коагуляционную структуру) путем взаимодействия между частицами и молекулами через прослойки дисперсионной среды в результате Ван-дер-ваальсовых сил сцепления, обладающую определенной прочностью. При низких напряжениях течение происходит путем скольжения по тонким (молекулярных размеров) прослойкам между элементами дисперсионной среды. Сопротивление течению в этом случае очень велико, что и обуславливает высокие значения вязкости при низких напряжениях сдвига [3].

Прочность коагуляционной структуры характеризуется величиной напряжения τ_y , называемого пределом текучести. Начальная структура разрушается при достижении этого напряжения, что приводит к резкому падению вязкости. Причем переход через предел текучести лежит в широком диапазоне напряжений сдвига. При более высоких напряжениях течет маловязкая жидкость (дисперсионная среда), в которой сохраняется небольшое количество частиц твердого наполнителя. Вязкость такой системы близка (по порядку величины) к вязкости дисперсионной среды. Эта величина намного меньше, чем вязкость неразрушенной коагуляционной структуры. На данном участке идет разрушение структуры. При малых напряжениях сдвига и небольших скоростях сдвига структура частично восстанавливается [4].

На третьем участке, при больших значениях скорости сдвига эффективная вязкость изменяется незначительно, а кривые течения носят линейный характер, что свидетельствует о высокой степени разрушения структуры.

С повышением же температуры при малых скоростях сдвига (первый участок) силы взаимодействия между дисперсными частицами ослабевают и вязкость заметно уменьшается (рисунки 5-9). С повышением скорости сдвига влияние температуры на градиент изменения вязкости purely ослабевает. При больших скоростях сдвига ($\gamma = 16-49 \text{ с}^{-1}$) температура почти не оказывает влияние на изменение эффективной вязкости. Такое поведение обусловлено малым влиянием броуновского движения молекул (за счет увеличения температуры), нарушающего их ориентацию при перемещении вдоль направления деформации, относительно возрастающих сдвигающих усилий.

Изменение влажности исследуемых продуктов в среднем на 20 % на целый порядок повышает эффективную вязкость. Данная закономерность сохраняется на всем диапазоне исследования.

Вязкость жидкости увеличивается при добавлении к ней некоторого количества твердых частиц. Это обусловлено необходимостью дополнительных затрат энергии на создание потоков вокруг этих частиц [3].

Вязкость дисперсии можно описать полуэмпирическим уравнением для концентрационной зависимости вязкости поликомпонентных смесей, предложенным Муни:

$$\eta = \eta_s \exp \left[\frac{2,5\phi}{1 - (\phi/\phi^*)} \right] \quad (7)$$

где η – вязкость смеси; η_s – вязкость жидкой фазы (дисперсной среды); ϕ , ϕ^* – объемная и критическая концентрация твердых диспергированных частиц соответственно.

Уравнение Муни описывает экспериментальные данные для области промежуточных концентраций и предсказывает эффект неограниченного роста вязкости при приближении к некоторой критической концентрации ϕ^* . Эта величина имеет смысл предельно возможной максимальной степени заполнения объема твердыми частицами и зависит от формы частиц и способа их укладки.

Таким образом, такой тип реологического поведения называется пластичностью, а неньютоновское поведение системы, у которой существует неявно выраженный предел текучести, называют псевдопластическим течением – структурированной системой.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Горбатов, А. В. Реология мясных и молочных продуктов [Текст] / А. В. Горбатов. – М.: Пищевая промышленность, 1979. — 384 с.
- 2 Доня, Д. В. Инженерная реология [Текст]: учебное пособие / Д. В. Доня, А. А. Леонов. – Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2008.
- 3 Косой, В. Д. Инженерная реология биотехнологических сред [Текст] / В. Д. Косой, Я. И. Виноградов, А. Д. Малышев. – СПб.: ГИОРД, 2005. – 648 с.

4 Маликин, А. Я. Реология: концепции, методы, приложения [Текст] / А. Я. Маликин, А. И. Исаев. – СПб.: Профессия, 2007. – 560 с.

REFERENCES

1 Gorbatov, A. V. Rheology of meat and dairy products [Text] / A. V. Gorbatov. – M.: Pishhevaya promyshlennost, 1979. - 384 p.

2 Donja, D. V. Engineering rheology [Text]: textbook / D. V. Donja, A. A. Leonov. – Kemerovo: KTIFI, 2008.

3 Kosoy, V. D. Engineering rheology biotech media [Text] / V. D. Kosoy, J. I. Vinogradov, A. D. Malyshev. - St.P.: GIORO 2005. – 648 p.

4 Malikin, A. J. Rheology: concepts, methods, and applications [Text] / A. Y. Malikin, A. I. Isayev. - St. P.: Professya, 2007. - 560 p.