

УДК 664+635.655

Басок Б.И., Пироженко И.А., Давыденко Б.В., Ободович А.Н.*Институт технической теплофизики НАН Украины***СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЕВОЙ ПАСТЫ, ПОЛУЧЕННОЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ**

Наведено результати досліджень реологічних властивостей соєвої пасты в діапазоні різних швидкостей зсуву, температур та концентрації сухих речовин. Встановлено, що білкова паста – складна, в'язкопластична тиксотропна система, що характеризується структурним гістерезисом.

Представлены результаты исследований реологических свойств соевой пасты в диапазоне различных скоростей сдвига, температур и концентрации сухих веществ. Установлено, что белковая паста – сложная вязкопластичная тиксотропная система, обладающая структурным гистерезисом.

Soy bean rheological properties investigation results are presented under different shear rates, temperatures and concentrations of dry components. It is established, that protein paste is complicated viscoplastic thixotropic system with structural hysteresis features.

C – концентрация сухих веществ,
 T – температура,
 W – влажность;
 α – количество делений шкалы вискозиметра;
 μ – динамический коэффициент вязкости;
 μ_0 – начальная вязкость;
 ρ – плотность;
 σ – сдвиговое напряжение;
 σ_0 – предельное сдвиговое напряжение;
 $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига;
 τ – время.

БГТ – тип аппарата;
 РПА – роторно-пульсационный аппарат.

В Институте технической теплофизики НАН Украины по разработанной технологии (ТУ У 88.066.007-98) с использованием роторно-пульсационного аппарата типа БГТ [1] получена новая структурированная система – соевая белковая паста. Результаты исследований физико-химических свойств, структурных особенностей сои до и после термовлажностной обработки, а

также дисперсного анализа соевой пасты представлены в работах [2, 3].

Для решения задач о динамике жидкости и теплообмене в роторно-пульсационных аппаратах (РПА) цилиндрического типа при обработке в них неньютоновских систем необходимо знать их реологические свойства. В связи с этим, в данной работе проведены исследования реологических свойств соевой пасты.

Структурно-механические характеристики соевой пасты измерены на ротационном вискозиметре «Реотест-2.1» при помощи цилиндрических измерительных устройств по методу Сирле [4]. Исследуемая среда помещалась в кольцевой зазор между двумя коаксиальными цилиндрами, после чего наружный цилиндр для поддержания постоянства определенной температуры помещался в термостат, подключенный к жидкостному циркуляционному термостату. В ходе исследований использовали цилиндр Z, предназначенный для измерения вязкости смазочных материалов и паст. Для определения реологических

ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

свойств соевой пасты определяли пары значений $[\sigma; \dot{\gamma}]$ – сдвиговые напряжения и скорости сдвига, начиная с малых значений скорости сдвига при установившихся режимах.

Измерения предельного напряжения сдвига в зависимости от скорости сдвига проводились при различных температурах: 17, 35, 40 °С и концентрациях добавляемой в соевую пасту водной фазы: 0, 20, 30, 40, 60 %. Температурные режимы выбраны в соответствии с возможными температурами обрабатываемого продукта, поступающего в роторно-пульсационный аппарат.

Как видно из рис. 1, малые величины напряжения сдвига вызывают течения с малой скоростью, а слабый наклон кривых свидетельствует о больших значениях вязкости и, следовательно, о неразрушенной структуре пасты. По мере увеличения скорости деформации сопротивление деформированию уменьшается, происходит интенсивное разрушение пространственной структуры соевой пасты, и наклон кривой становится более пологим. При этом эффективная вязкость падает, достигая наименьшего значения, что свидетельствует о ее зависимости от вида и скорости нагружения.

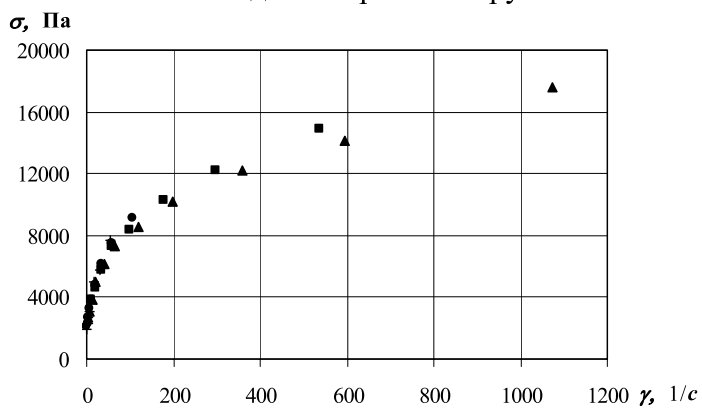


Рис. 1. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига для соевой пасты влажности $W=65\%$. Обозначения: \blacktriangle – 2,453 ... 1073 c^{-1} ; \blacksquare – 1,227 ... 536 c^{-1} ; \bullet – 0,33...107,3 c^{-1} ; $+$ – 0,033... 53,6 c^{-1} .

Следует отметить, что нелинейная форма указанной кривой является характерной особенностью структурно-вязких сред. Это означает, что вязкость для вязкопластичных систем не постоянна. С увеличением градиента скорости она уменьшает-

ся по некоторому закону, в данном случае – по закону Балкли-Гершеля [5]:

$$\sigma = \sigma_0 + A \dot{\gamma}^k, \quad (1)$$

где σ_0 – предельное напряжения сдвига, Па; A и k – реологические константы; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, c^{-1} .

Использование приведенной зависимости для описания полученных экспериментальных результатов предполагает определение значения предельного напряжения сдвига σ_0 , т.е. значения напряжения, при котором происходит переход от упрочнения в процессе деформирования материалов с неразрушенным структурным каркасом к разупрочнению при его разрушении. С целью определения σ_0 , зависимость $\sigma = f(\dot{\gamma})$ представляется в логарифмических координатах $\lg \sigma = f(\lg \dot{\gamma})$. Значения эмпирических коэффициентов для вышеприведенного уравнения (1) устанавливались из зависимости $\lg(\sigma - \sigma_0) = f(\lg \dot{\gamma})$ для соевой пасты при различных значениях температур (рис. 2).

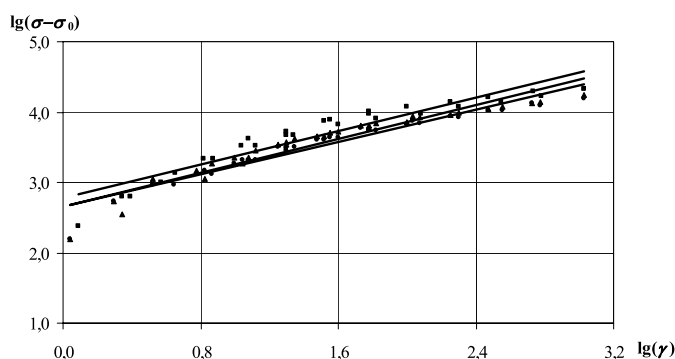


Рис. 2. Зависимость изменения $(\sigma - \sigma_0)$ от скорости сдвига при температурах: \blacktriangle – 40 °С; \blacksquare – 35 °С; \bullet – 17 °С.

Полученные значения напряжений при различных скоростях сдвига позволили рассчитать значения эффективной вязкости, зависимости которых от скорости сдвига при температурах: 17, 35 и 40 °С представлены на рис. 3. Данные зависимости условно можно

разделить на три зоны: в первой – эффективная вязкость резко падает, во второй – наблюдается незначительное ее изменение, а третья зона характеризуется практически постоянной эффективной вязкостью, характерной для вязкопластичных тел. Такое реологическое поведение пасты обусловлено соотношением разрушенных и восстановленных связей структуры, зависящих от величины напряжения сдвига.

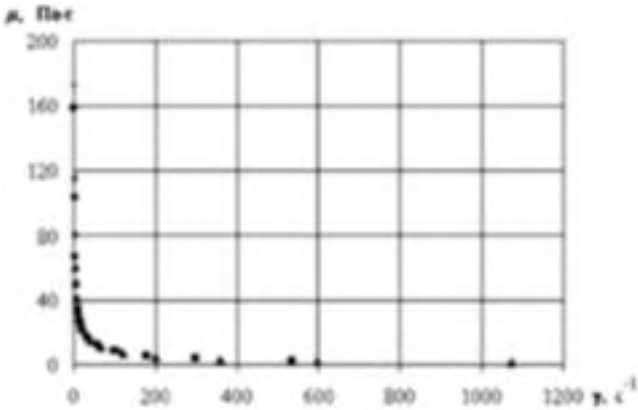


Рис. 3. Зависимость значений эффективной вязкости от скорости сдвига. Обозначения:
 ▲ – 2,453... 1073 с⁻¹; ■ – 1,227... 536 с⁻¹; ● – 0,33...107,3 с⁻¹; + – 0,033... 53,6 с⁻¹.

Значение начальной вязкости (μ_0) определялось из зависимости $\lg \mu = f(\lg \dot{\gamma})$ (рис.4) путем нахождения точки пересечения аппроксимирующей прямой с осью $\lg \mu$. Полученные результаты свиде-

тельствуют о том, что увеличение концентрации водной фазы и температуры соответственно приводит к уменьшению предельного напряжения сдвига и начальной вязкости.

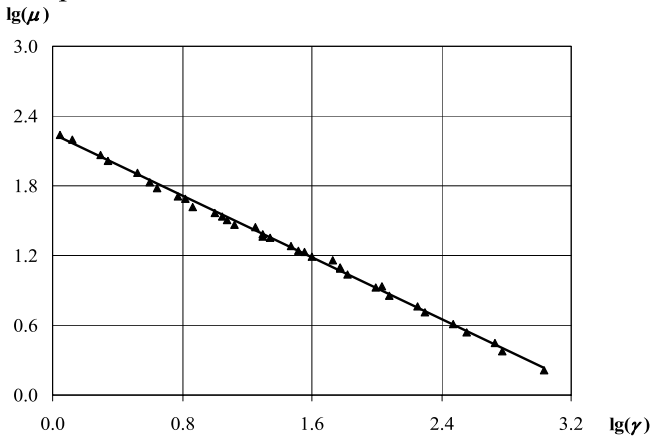


Рис. 4. Зависимость значений эффективной вязкости от скорости сдвига.

Значения предельных напряжений сдвига σ_0 , начальных вязкостей μ_0 , а также коэффициентов аппроксимирующего уравнения, описывающего зависимость вязкости от скорости сдвига при температурах 17, 35 и 40°C и различных концентрациях добавляемой в пасту водной фазы представлены в табл.1.

Табл. 1. Реологические зависимости соевой пасты при различных начальных условиях

| Характер нагружения | Концентрация водной фазы | Температура | Начальная вязкость | Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига $\sigma = \sigma_0 + A\gamma^k$ | | |
|---------------------|--------------------------|-------------|--------------------|--|--------------|------|
| | | | | Значение | Коэффициенты | |
| | % | T, °C | μ_0 , Па·с | σ_0 , Па | k | A |
| уменьшение | 0 | 17 | 281,9 | 2819 | 0,264 | 3469 |
| | | 34 | 194,5 | 1945 | 0,361 | 1700 |
| | | 40 | 172,5 | 1753 | 0,361 | 1507 |
| увеличение | 20 | 15 | 274,7 | 2747 | 0,263 | 3469 |
| | | 40 | 164,9 | 1649 | 0,323 | 1341 |
| увеличение | 30 | 15 | 253,0 | 2530 | 0,215 | 4236 |
| | | 40 | 159,8 | 1598 | 0,312 | 1389 |
| уменьшение | 40 | 17 | 124,4 | 1245 | 0,400 | 1010 |
| уменьшение | 60 | 17 | 92,5 | 925 | 0,410 | 712 |
| | | 40 | 88,3 | 883 | 0,381 | 640 |

ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

С использованием полученных зависимостей были рассчитаны значения коэффициента динамической вязкости соевой пасты в зависимости от температуры для скорости сдвига, характерной для роторно-пульсационного аппарата типа БГТ, которая равна $\dot{\gamma}=10^4 \text{ c}^{-1}$. Как видно из рис. 5, данная зависимость имеет линейный характер $\mu = -0,0088T + 0,727$ (μ имеет размерность Па·с, а $T - ^\circ\text{C}$). Ее можно использовать для расчета значений вязкости пасты при решении задачи теплообмена в РПА.

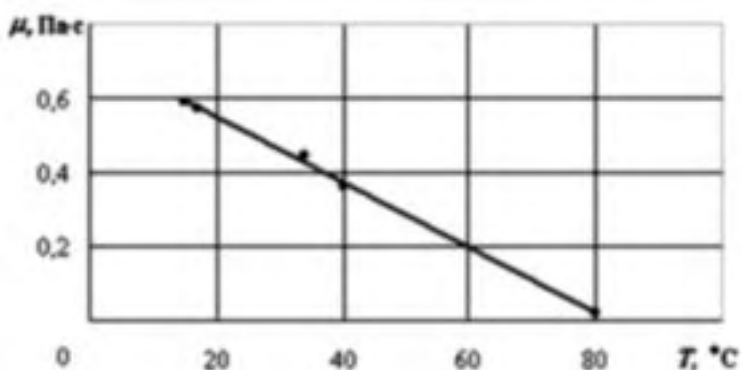
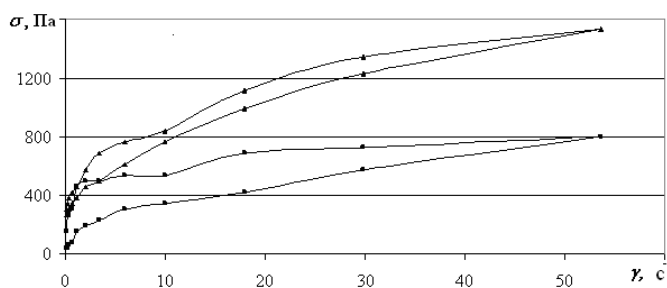


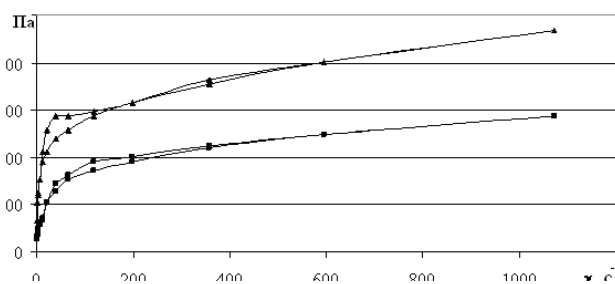
Рис. 5. График зависимости $\mu=f(T)$ для соевой пасты.

В пластичных дисперсных системах наблюдается изменение структуры при длительном нагружении, что может приводить к необратимому изменению реологических свойств, а также проявлению гистерезисных явлений [7, 8]. В процессе исследования вязкости соевой пасты при измерении сдвиговых напряжений при возрастающей и при уменьшающейся скорости сдвига было установлено, что реологические свойства обладают гистерезисом. На рис. 6 приведены экспериментальные данные для диапазона изменения скорости сдвига $\dot{\gamma}=0,123...54 \text{ c}^{-1}$ (рис. 6 б), а также – $\dot{\gamma}=0,245...1073 \text{ c}^{-1}$ (рис. 6 а). При достаточно быстром циклическом нарастании, а затем убывании скорости сдвига, на графике проявляется характерная гистерезисная кривая, указывающая на запаздывание структурных изменений по сравнению с изменением нагрузки, что позволяет ее отнести к тиксотропным системам [7, 8], для которых характерно интенсивное обратимое разрушение структуры при отклонениях от

механического равновесия и восстановление структуры при снятии нагрузки. Эта особенность структурных изменений тиксотропных свойств при сдвиге должна влиять и на другие теплофизические процессы.



а)



б)

Рис. 6. Явления гистерезиса коэффициента вязкости пасты при температуре $17 \text{ }^\circ\text{C}$ в диапазонах скоростей сдвига: а – $0,123...54 \text{ c}^{-1}$, б – $0,245...1073 \text{ c}^{-1}$. ■ – влажность $W=65 \%$, ▲ – влажность $W=70 \%$.

Второй характерной особенностью реологических свойств соевой пасты, кроме гистерезиса, является наличие релаксационных явлений в структуре. Данную особенность необходимо знать для установления времени выхода на установившийся режим. Результаты экспериментальных исследований, представленные на рис. 7, свидетельствуют, что указанные релаксационные процессы протекают медленно. Время релаксации нераз-

бавленной соевой пасты при комнатной температуре исчисляется десятками минут, в то время, как разбавленной пасты – десятками секунд.

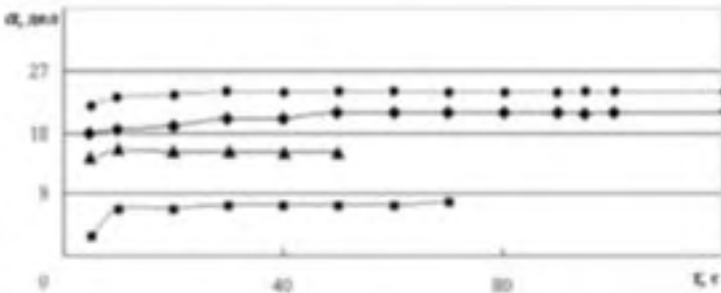


Рис. 7. Релаксационные явления в соевой пасте влажностью $W=70\%$ при различных значениях скорости сдвига при $T=17\text{ }^\circ\text{C}$: (■) – $7,36\text{ c}^{-1}$; (▲) – $22,08\text{ c}^{-1}$; (◆) – $66,2\text{ c}^{-1}$; (●) – 1073 c^{-1} .

Данные свидетельствуют о том, что в диапазоне изменения скорости сдвига $\dot{\gamma}=0,127...156\text{ c}^{-1}$ при всех их значениях время выхода на установившийся режим занимает в среднем 10 с.

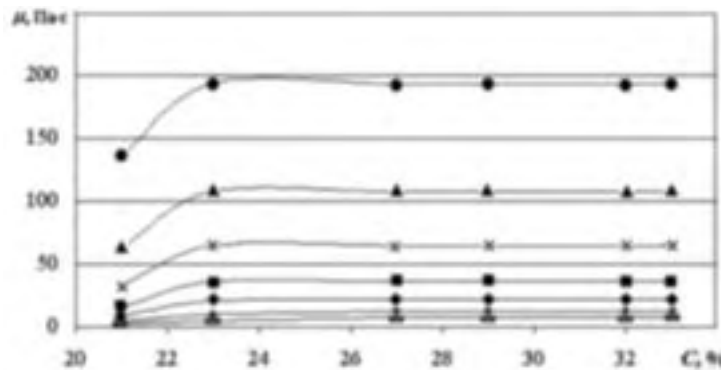


Рис. 8. Изменение вязкости от концентрации сухих веществ в пасте при постоянной скорости сдвига: (●) – $1,4\text{ c}^{-1}$; (▲) – $2,5\text{ c}^{-1}$; (×) – $4,1\text{ c}^{-1}$; (■) – $7,5\text{ c}^{-1}$; (◆) – 12 c^{-1} ; (+) – $22,1\text{ c}^{-1}$; (≡) – $37,1\text{ c}^{-1}$.

Для подтверждения достоверности измерений вязкости неразбавленной соевой пасты влажностью $W=65\%$ в зависимости от скорости сдвига проводился параллельно весь комплекс исследований с добавлением в пасту водной фазы различной концентрации: 5, 10, 20, 30, 60 %. На рис. 8 пред-

ставлены результаты изменения вязкости соевой пасты с различной концентрацией сухих веществ при постоянных скоростях сдвига.

Как видно из рисунка, с увеличением концентрации сухих веществ, а следовательно, с уменьшением добавляемой водной фазы, вязкость уменьшается. Однако наиболее интенсивное увеличение вязкости наблюдается при $C=21...24\%$, после чего изменение вязкости происходит незначительно.

Выводы

1. Проведенные исследования свидетельствуют о том, что соевая паста – сложная вязкопластичная система, обладающая структурным гистерезисом и относящаяся к тиксотропным средам со временем релаксации до 10 с.

2. Представленные результаты могут быть использованы для расчета конструктивных и режимных параметров технологического оборудования, предназначенного для производства соевой пасты и пищевых продуктов на ее основе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басок Б., Гартвіг А., Коба А., Горячев О., Піроженко І. Енергоресурсоощадне устаткування для обробки гетерогенних рідинних середовищ // Вісник Національного університету "Львівська політехніка", –Л.: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка". – 2002. № 452.– С. 119 – 122.
2. Басок Б.И., Шаркова Н.А., Піроженко І.А., Авдеева Л.Ю. Анализ показателей качества соевой пасты // Тези доповідей міжнародної науково-методичної конференції. – Харьков. – 2002.– С.75 –78.
3. Басок Б.И., Піроженко І.А., Булавка А.В. Дисперсный анализ соевой пасты, полученной при роторно-пульсационной гомогенизации // Промышленная теплотехника. – 2003.– Т. 26. – № 4. – С. 88–92.
4. "Реотест 2.1" –цилиндрический и конуспластиночный ротационный вискозиметр.

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА СУШКИ

- Инструкция по эксплуатации. – MLW, 1981. – 20 с.
5. Реофизика и реодинамика текучих систем / Под ред. Лыкова А.В., Шульмана З.П. – Минск: Изд. „Наука и техника”, 1970. – 172 с.
 6. Белкин И.М. Ротационные приборы. Измерение вязкости и физико-механических характеристик материалов. – М.: Машиностроение, 1967. – 272 с.
 7. Лыков А.В., Берковский Б.М. Тепло и массообмен в неньютоновских жидкостях. Законы переноса в неньютоновских жидкостях. – М.: Энергия, 1968. – С. 5–14.
 8. Кутателадзе С.С., Хабахпашева Е.М., Лемберский В.Б. Некоторые вопросы гидродинамики и теплообмена структурно-вязких сред. Законы переноса в неньютоновских жидкостях. – М.: Энергия, 1968. – С. 5–14.

Получено 15.01.2009 г.

УДК 66.047

Атаманюк В.М., Гумницький Я.М.

Національний університет «Львівська політехніка»

ВНУТРІШНЬОДИFUZІЙНЕ МАСОПЕРЕНЕСЕННЯ ПІД ЧАС СУШІННЯ КАМ'ЯНОГО ВУГІЛЛЯ

Запропоновано фізичну модель розподілу вологи в одинарній частинці під час її сушіння у другому періоді. Математично описано процес внутрішньодифузійного масо перенесення та визначено вплив зовнішньої гідродинаміки на величину масового потоку.

Предложена физическая модель распределения влаги в одиночной частице при её сушке во втором периоде. Математически описан процесс внутривязионного массопереноса и определено влияние внешней гидродинамики на величину массового потока влаги.

We propose a physical model of moisture distribution in an individual particle during its drying at the second period. We give a mathematical description of process of intra diffusion mass transfer and determine formal influence of external hydrodynamics on the value of mass moisture flux

D_w – коефіцієнт внутрішньої дифузії;
 d – діаметр частинки;
 j_w – масовий потік вологи;
 r_0 – радіус на границі розподілу фаз;
 r – поточний радіус;
 R – радіус частинки;
 t – температура теплового агента;
 T – температура частинки вугілля;
 v – швидкість теплового агента;
 w – вологовміст матеріалу;
 x – вологовміст теплового агента;

α – коефіцієнт тепловіддачі, кут нахилу прямої до осі абсцис;
 ε – пористість;
 η – коефіцієнт, що характеризує ступінь досконалості процесу;
 μ – динамічний коефіцієнт в'язкості;
 ρ – густина повітря, води;
 τ – час;
 $Fo = \frac{D_w \tau}{R^2}$ – число Фур'є;