

Приведены результаты экспериментального исследования реологических характеристик образцов послеспиртовой зерновой барды из ржи и зерновых замесов из ржи и пшеницы различных концентраций в режимах непрерывного сдвига и крутильных деформаций. Установлена температурная зависимость этих реологических характеристик в диапазоне температур 20 — 80 °С. Определено, что реологическое поведение образцов послеспиртовой зерновой барды из ржи и зерновых замесов из ржи различных концентраций в режиме непрерывного течения может быть описано моделью Гершеля — Балкли, а образцов зерновых замесов из пшеницы — моделью Каро—Галайтнера. Определены зависимости параметров моделей от температуры и концентрации твердых веществ. Эффективная вязкость и компоненты комплексного модуля сдвига снижаются в диапазоне температур 20 — 70 °С, при дальнейшем увеличении температуры наблюдается их возрастание, вызванное фазовым переходом.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОСЛЕСПИРТОВОЙ ЗЕРНОВОЙ БАРДЫ И ЗЕРНОВЫХ ЗАМЕСОВ В УСЛОВИЯХ НЕПРЕРЫВНОГО СДВИГА И КРУТИЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ**

**РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию», г. Минск, Республика Беларусь**

*З. В. Ловкис, заслуженный деятель науки Республики Беларусь, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, генеральный директор;*

*А. А. Шепшелев, кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научной работе;*

*С. А. Арнаут, кандидат технических наук, старший научный сотрудник — заведующий отраслевой научно-исследовательской лабораторией*

**Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь**

*Е. В. Коробко, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией реофизики и макрокинетики;*

*С. В. Виланская, научный сотрудник лаборатории реофизики и макрокинетики;*

*Н. А. Журавский, кандидат физико-математических наук; старший научный сотрудник лаборатории реофизики и макрокинетики*

В современных условиях при постоянном росте цен на сырье и энергоресурсы, ввиду необходимости снижения себестоимости выпускаемой продукции, стоит задача по созданию новых ресурсосберегающих технологий, позволяющих более эффективно использовать сырье и отходы производства, улучшить экологическую обстановку [1, 2].

В системе агропромышленного комплекса наибольшее воздействие на окружающую среду оказывают предприятия спиртовой отрасли промышленности. Высокий уровень водопотребления обуславливает и большой объем жидких отходов спиртового производства, в первую очередь, послеспиртовой барды. Так на 1 декалитр этилового спирта образуется от 0,12 до 0,15 м<sup>3</sup> послеспиртовой барды [3].

Спиртовые предприятия как Республики Беларусь, так и Российской Федерации по удельным затратам и себестоимости спирта и кормовых продуктов уступают зарубежным, так как практически все технологии и схемы производства спирта являются однопродуктовыми. При этом

используется эффективно только крахмалистая часть зерна. В то же время комплексная переработка зерна с получением спирта и кормопродуктов позволяет значительно повысить рентабельность конечного продукта — этилового спирта [4].

По своему составу послеспиртовая барда является хорошей питательной средой для выращивания микроорганизмов. Состав барды зависит от состава перерабатываемого сырья, глубины выбраживания суслу, особенностей метаболизма и в целом биохимии продуцентов этилового спирта, параметров технологического процесса, применяемых комплексов ферментных препаратов, аппаратурного оснащения производства и т. д. [5, 6].

В свежей барде содержатся белки, клетчатка, гемицеллюлозы, зольные вещества, жиры, моно- и дисахариды, карбоновые кислоты, спирты, аминокислоты, органические и неорганические азотистые соединения, соли калия, магния, железа, микроэлементы и витамины, что позволяет использовать барду в качестве жидкой кормовой добавки. По кормовым достоинствам 1 декалитр зерновой барды эквивалентен 0,8 — 0,9 кормовым единицам [7 — 9].

На подавляющем большинстве спиртовых заводов применяются устаревшие однопродуктовые технологии, обеспечивающие переработку крахмала, содержащегося в зерне в количестве 50,0 — 57,0 %, в этиловый спирт пищевого качества. При этом образующаяся жидкая барда обладает высокой питательной ценностью — в ней весь белок зерна остается практически в неизменном виде. Барда содержит в своем составе от 5,0 до 9,0 % сухих веществ, состоящих из нерастворимых частиц сырья и дрожжей, растворимых компонентов, из которых около половины составляют углеводы: пентозы и полисахариды (декстрины, крахмал, гемицеллюлоза, целлюлоза). Среди усваиваемых микроорганизмами форм углеводов в наибольшем количестве в барде присутствуют карбоновые кислоты и редуцирующие вещества [10]. Она содержит различные источники углерода: сбраживаемые углеводы 0,15 — 0,5 %, несбраживаемых углеводов 2,0 — 3,5 % (пентозы, пентозаны, клетчатка) [6]. Сухое вещество барды содержит примерно 28 % сырого протеина, в котором до 40 % особо ценных для скота байпасных белков [2], около 12,5 % клетчатки, 35 % безазотистых экстрактивных веществ, 4,9 % сырого жира, 2,0 % зольных элементов [11]. Состав грубого фильтрата барды приведен в таблице 1 [12]. Поэтому после охлаждения барда быстро обсеменяется посторонней микрофлорой и становится непригодной для использования в кормовых целях.

1.

| Показатель                      | Единица измерения     | Количественное значение показателя |
|---------------------------------|-----------------------|------------------------------------|
| Массовая доля сухих веществ     | %                     | 4,5–6,5                            |
| Массовая доля сырого протеина   | %                     | 1,5–2,5                            |
| Массовая доля белка             | %                     | 1,0–1,4                            |
| Массовая доля клетчатки         | %                     | 0,2–0,3                            |
| Массовая доля золы              | %                     | 0,4–0,6                            |
| Массовая доля жира              | %                     | 0,1–0,2                            |
| Массовая доля ОРВ               | %                     | 0,6–1,2                            |
| Массовая доля глицерина         | %                     | 0,2–0,5                            |
| Содержание органических кислот  | г/100 см <sup>3</sup> | 1,2–2,9                            |
| Плотность при температуре 20 °С | г/см <sup>3</sup>     | 1,02–1,04                          |
| Активная кислотность (рН)       | ед.                   | 4,3–4,8                            |

Учитывая состав барды, решение проблемы ее утилизации следует направить на получение коммерчески привлекательных продуктов с высокими потребительскими свойствами, предназначенными для конкретных потребителей.

Первым шагом в повышении рентабельности производства является переработка послеспиртовой барды в белковые и белково-углеводные кормопродукты в виде кормовых дрожжей или сухой концентрированной барды. При этом снимется экологическая нагрузка вблизи спиртового завода в летнее время, когда часть барды не находит потребления и сбрасывается в отходы.

В этой связи зерновая барда является в России и Беларуси в настоящее время одним из основных сырьевых ресурсов для получения микробиологического белка.

Внедрение технологии, обеспечивающей получение высококачественного продукта с параллельной переработкой барды, — реальный и перспективный путь модернизации спиртовых заводов, способный обеспечить повышение их рентабельности и конкурентоспособности на рынке.

В этой связи знание реологических свойств исходного сырья, промежуточных продуктов производства, а также отходов необходимо для проектирования нового и модернизации существующего оборудования, разработки методов контроля и автоматизации процессов производства и транспортировки, а также организации эффективного и объективного контроля и управления технологическим циклом производства.

С этой целью проведены реологические исследования образцов отжатой послеспиртовой зерновой барды из ржи, полученной на Бобруйском гидролизном заводе (Беларусь), и ее четырех состава разных концентраций. Массовая концентрация сухого вещества (рожь) составляла 18, 20, 22 и 27 %. Фотография исследованных образцов представлена на рис. 1.



Рис. 1. Образцы отжатой послеспиртовой зерновой барды из ржи и исследованных составов:  
1 — 27 %, 2 — 22 %, 3 — 20 %, 4 — 18 %

Также приведены результаты исследования реологических свойств зернового замеса — исходного сырья для производства спирта. Исследованы составы зернового замеса из ржи и пшеницы с разными концентрациями сухого вещества в диапазоне температур 20 — 80 °С. Список изученных составов приведен в таблице 2.

2.

| Сухое вещество | Соотношение компонентов сухое вещество:<br>вода | Массовая концентрация сухого вещества, % |
|----------------|---|--|
| Рожь           | 1:2   | 33,3                                     |
| Рожь           | 1:2.6   | 27,8                                     |
| Рожь           | 1:3   | 25                                       |
| Рожь           | 1:3.5   | 22,2                                     |
| Пшеница        | 1:2   | 33,3                                     |
| Пшеница        | 1:2.6   | 27,8                                     |
| Пшеница        | 1:3   | 25                                       |
| Пшеница        | 1:3.5   | 22,2                                     |

**Исследование реологических свойств образцов в условиях непрерывной деформации сдвига.** Реологические измерения в условиях непрерывной деформации сдвига выполнены на вискози-

метре Rheotest 2.1 в диапазоне температур  $t=20 - 80$  °С и диапазоне скоростей сдвига  $\dot{\gamma}=3 - 437,4$  с<sup>-1</sup>. Использовалась измерительная ячейка, состоящая из двух коаксиальных цилиндров: диаметр внутреннего цилиндра — 37,6 мм, внешнего — 40 мм, зазор между цилиндрами — 1,2 мм. Задавалась скорость вращения внутреннего цилиндра, определяющая скорость сдвига в жидкости. Измерялся момент сил, действующий на цилиндр, по которому рассчитывалось напряжение сдвига. Комплекс для измерения реологических характеристик пищевых продуктов с использованием вискозиметра Rheotest 2.1 представлен на рис. 2.



Рис. 2. Комплекс для определения реологических характеристик пищевых продуктов: 1 — вискозиметр Rheotest 2.1, 2 — термостат Huber CC1, 3 — вытяжной шкаф

Согласно результатам экспериментов реологическое поведение образцов послеспиртовой зерновой барды из ржи и зерновых замесов из ржи может быть описано моделью Гершеля–Балкли (Herschel–Bulkley) [13]:

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n, \quad (1)$$

где  $\tau$  — напряжение сдвига, Па;  $\tau_0$  — предельное напряжение сдвига (динамический предел текучести), Па;  $\dot{\gamma}$  — скорость сдвига, с<sup>-1</sup>;  $K$  — показатель консистенции, Па·с <sup>$n$</sup> ;  $n$  — индекс течения.

**Послеспиртовая зерновая барда.** Зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига для послеспиртовой зерновой барды с концентрацией 27 % при разных температурах показаны на рис. 3.

Видно, что в диапазоне 20 — 70 °С происходит снижение значений  $\tau$ ; при дальнейшем возрастании температуры происходит его увеличение, что обусловлено фазовым переходом.

Изменения параметров модели Гершеля–Балкли образцов послеспиртовой зерновой барды из ржи с концентрацией 27 % в зависимости от температуры в диапазоне температур 20 — 80 °С могут быть аппроксимированы полиномами 4-ой степени:

$$\begin{aligned} \tau_0 &= 2 \cdot 10^{-6} t^4 - 0.0004 t^3 + 0.0354 t^2 - 1.2896 t + 17.627 \text{ (Па)}, \\ K &= 3 \cdot 10^{-6} t^4 - 0.0007 t^3 + 0.0578 t^2 - 2.1376 t + 32.006 \text{ (Па} \cdot \text{с}^n), \\ n &= -2 \cdot 10^{-7} t^4 + 4 \cdot 10^{-5} t^3 - 0.0026 t^2 + 0.0792 t - 0.5376. \end{aligned}$$

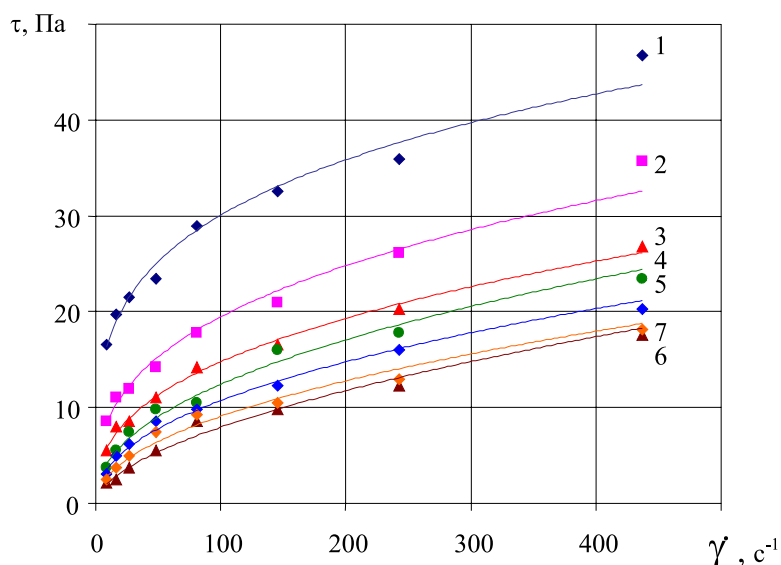


Рис. 3. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига образцов послеспиртовой зерновой барды из ржи с концентрацией 27 % в диапазоне температур 20–80 °С: 1 — 20 °С; 2 — 30; 3 — 40; 4 — 50; 5 — 60; 6 — 70; 7 — 80 (точки — эксперимент, кривые — расчет по модели (1))

Диапазоны параметров модели Гершеля–Балкли для послеспиртовой зерновой барды из ржи с концентрацией 27 % в диапазоне температур 20 — 80 °С составляют:

$$\tau_0 = 0.04 - 2.92 \text{ (Па)}, K = 0.58 - 7.27 \text{ (Па} \cdot \text{с}^n), n = 0.29 - 0.57.$$

Зависимость напряжения сдвига от концентрации при температуре 20 °С в диапазоне концентраций 18 — 27 % является возрастающей, что показано на рис. 4.

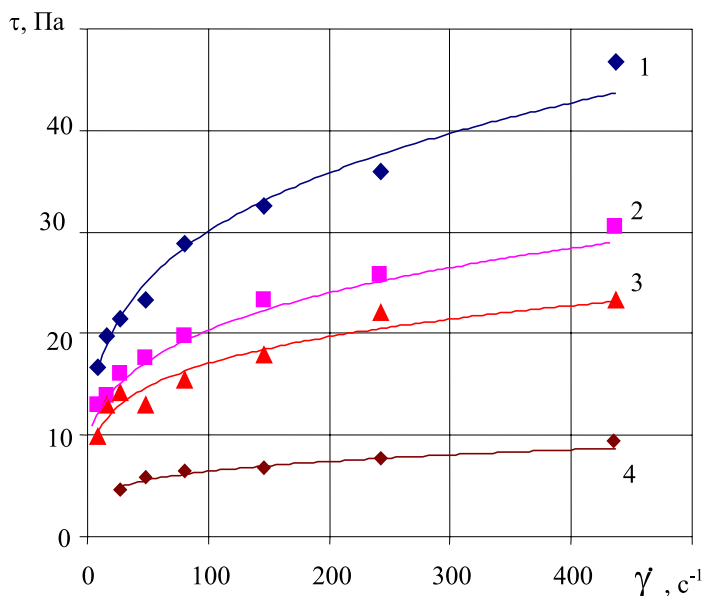


Рис. 4. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига образцов послеспиртовой зерновой барды из ржи различных концентраций при 20 °С: 1 — 27%, 2 — 22, 3 — 20, 4 — 18 (точки — эксперимент, кривые — расчет по модели (1)).

Изменение параметров модели Гершеля–Балкли для послеспиртовой зерновой барды из ржи в зависимости от концентрации в этих условиях можно аппроксимировать полиномами 2-ой степени:

$$\tau_0 = -445.05C^2 + 220.02C - 24.072 \text{ (Па)}, K = -752.26C^2 + 397.41C - 45.226 \text{ (Па} \cdot \text{с}^n),$$

$$n = -1.5946C^2 + 1.1994C + 0.0779,$$

Диазоны параметров модели Гершеля–Балкли для послеспиртовой зерновой барды из ржи при температуре 20 °С в диапазоне концентраций 18 — 27 % составляют:

$$\tau_0 = 0.96 - 2.92 \text{ (Па)}, K = 1.77 - 7.27 \text{ (Па}\cdot\text{с}^n), n = 0.24 - 0.29.$$

**Зерновой замес из ржи.** Кривые течения зернового замеса из ржи с концентрацией 33,3 % в диапазоне скоростей сдвига  $\dot{\gamma} = 3 - 437,4 \text{ с}^{-1}$  показаны на рис. 5.

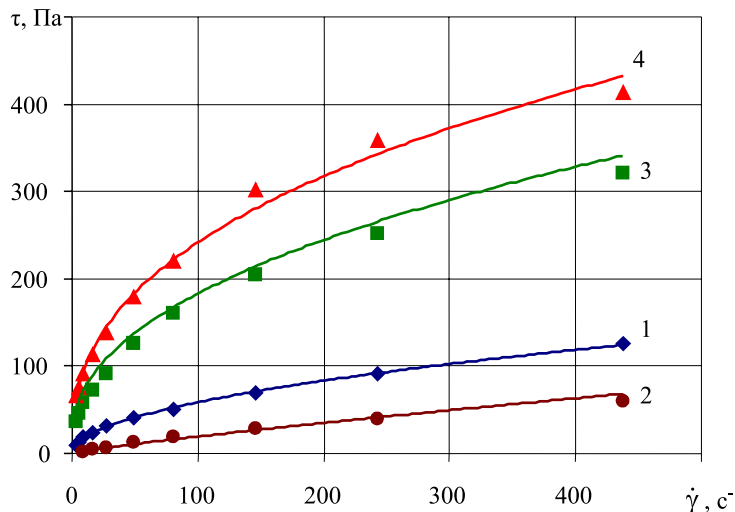


Рис. 5. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига образцов зернового замеса из ржи с концентрацией 33,3 % в диапазоне температур 30–80 °С: 1 — 30 °С; 2 — 40; 3 — 60; 4 — 80 (точки — эксперимент, кривые — расчет по модели (1))

В диапазоне 20 — 40 °С отмечено снижение вязкости зернового замеса. При более высоких температурах вязкость увеличивается, при приближении к 80 °С происходит фазовый переход, суспензия превращается в пастообразную массу, напряжение сдвига и эффективная вязкость при 80 °С увеличиваются на порядок по сравнению с величинами, полученными при 40 °С. При этом зерновой замес приобретает вязкопластичные свойства, появляется предел текучести.

По результатам расчета определены диапазоны параметров модели Гершеля–Балкли в исследованных интервалах концентраций и температур:  $\tau_0 = 0.003 - 60 \text{ (Па)}$ ,  $K = 0,1 - 97,38 \text{ (Па}\cdot\text{с}^n)$ ,  $n = 0,36 - 0,9$ .

Следует отметить, что для вышележащих кривых течения индекс течения меньше, т. е. более прочные конгломераты разрушаются интенсивнее с увеличением скорости сдвига.

Изменения параметров модели Гершеля–Балкли для зернового замеса из ржи с концентрацией 33,3 % в зависимости от температуры в диапазоне температур 20 — 80 °С могут быть аппроксимированы полиномом 3-ей степени:

$$\begin{aligned} \tau_0 &= 2 \cdot 10^{-5} t^3 - 0.0018 t^2 + 0.0365 t - 0.09 \text{ (Па)}; \\ K &= -0.0003 t^3 + 0.047 t^2 - 2.11 t + 27.62 \text{ (Па}\cdot\text{с}^n); \\ n &= 10^{-5} t^3 - 0.0022 t^2 + 0.1034 t - 0.66. \end{aligned}$$

Изменения параметров модели Гершеля–Балкли для зернового замеса из ржи с концентрацией 27,8 % в зависимости от температуры в диапазоне температур 30 — 60 °С: могут быть аппроксимированы полиномом 2-ой степени:

$$\begin{aligned} \tau_0 &= 0.0008 t^2 - 0.0592 t + 1.055 \text{ (Па)}; \\ K &= 0.0107 t^2 - 0.7827 t + 14.475 \text{ (Па}\cdot\text{с}^n); \\ n &= -0.0008 t^2 + 0.063 t - 0.4668. \end{aligned}$$

Концентрационная зависимость напряжения сдвига при температуре 60 °С представлена на рис. 6. С уменьшением концентрации напряжение сдвига снижается.

Изменения параметров модели Гершеля–Балкли для зернового замеса из ржи от концентрации при 60 °С можно аппроксимировать полиномом 2-ой степени.

$$\tau_0 = 42.573 C^2 - 20.533 C + 2.4665$$

$$K = 586.33C^2 - 273.14C + 31.897$$

$$n = 8.6733C^2 - 7.2031C + 2.0632.$$

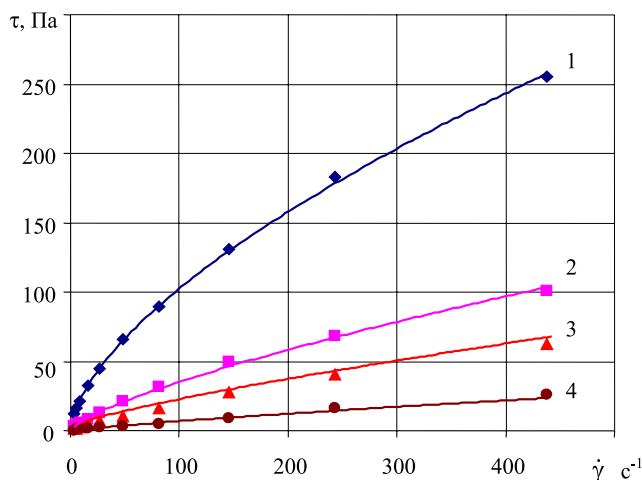


Рис. 6. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига образцов зернового замеса из ржи различных концентраций при  $t=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ : 1 — 33.3%; 2 — 27.8; 3 — 25; 4 — 22.2 (точки — эксперимент, кривые — расчет по модели (1))

**Зерновой замес из пшеницы.** Реологические измерения выполнены на реометре Physica MCR 301 фирмы Anton Paar. В измерительной ячейке диаметр внутреннего цилиндра — 26,7 мм, внешнего — 28,9 мм, зазор между цилиндрами — 1,13 мм.

Пшеничный замес показывает более низкие значения напряжений сдвига и эффективной вязкости по сравнению с ржаным. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига описывается уравнением Каро–Галайтнера (Carreau–Gahleitner)

$$\tau = \tau_0 (1 + (a\dot{\gamma})^b)^p, \quad (2)$$

где  $a, c, b, p$  — постоянные величины.

На рис. 7 показана для примера кривая течения зернового замеса из пшеницы с концентрацией 22,2 % (1:3.5) при 20 °С.

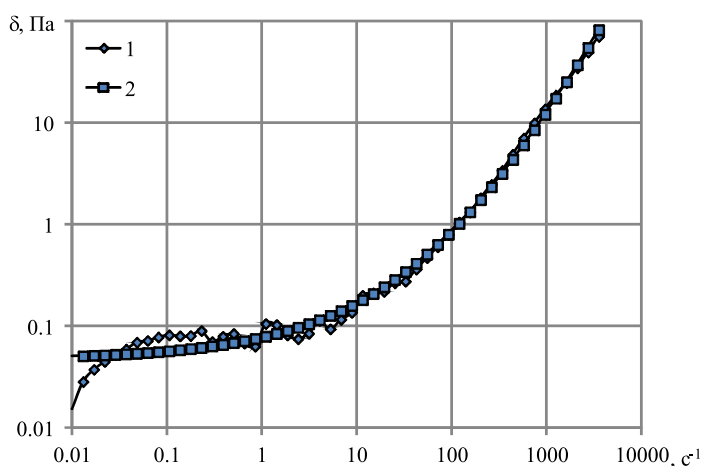


Рис. 7. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига образцов зернового замеса из пшеницы 22.2% при 20 °С: 1 — эксперимент; 2 — расчет по формуле (2)

Фазовый переход при приближении к 80 °С происходит и у пшеничного замеса, напряжение сдвига и эффективная вязкость увеличиваются.

На рис. 8 приведена зависимость  $\tau$  от температуры для различных концентраций и скоростей сдвига.

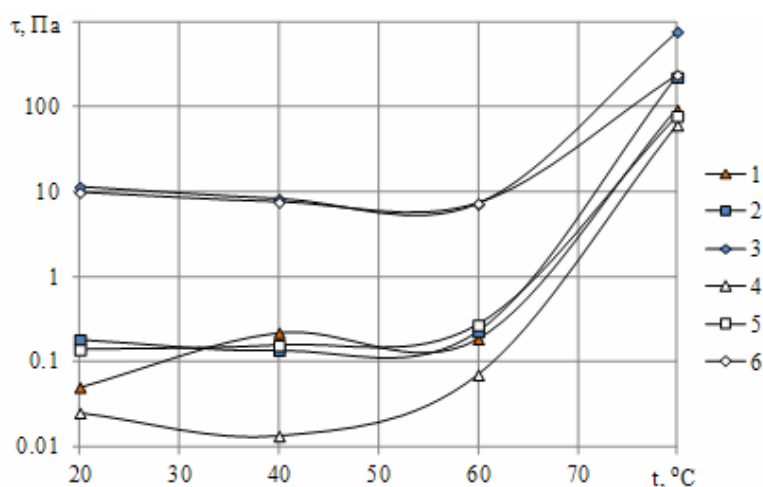


Рис. 8. Зависимость напряжения сдвига зернового замеса из пшеницы от температуры: 1–3 — концентрация 22.2 %, 4–6 — 25%; 1, 4 — скорость сдвига 0.1 с<sup>-1</sup>; 2, 5–11 с<sup>-1</sup>; 3, 6 — 950 с<sup>-1</sup>

Напряжение сдвига незначительно уменьшается в диапазоне 20 — 60 °С, затем увеличивается на 2 порядка при 80 °С.

Диапазоны параметров модели  $\tau_0$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $p$  в исследованных интервалах концентраций и температур:

$$\tau_0=0,014-420,1 \text{ (Па)}; a=2,4 \cdot 10^{-5}-13,55 \text{ (с)}; b=0,1-13,55; p=0,041-18,97.$$

**Исследование реологических свойств образцов отжатый послеспиртовой зерновой барды в режиме крутильных деформаций.** Компоненты комплексного модуля сдвига (модуль накопления  $G'$  и модуль потерь  $G''$ ) отжатый послеспиртовой барды определены при гармонических механических воздействиях с амплитудной разверткой на реометре Physica MCR 301 фирмы Anton Paar с использованием измерительной ячейки типа пластина — пластина с диаметром пластин 50 мм в диапазоне температур 20 — 80 °С.

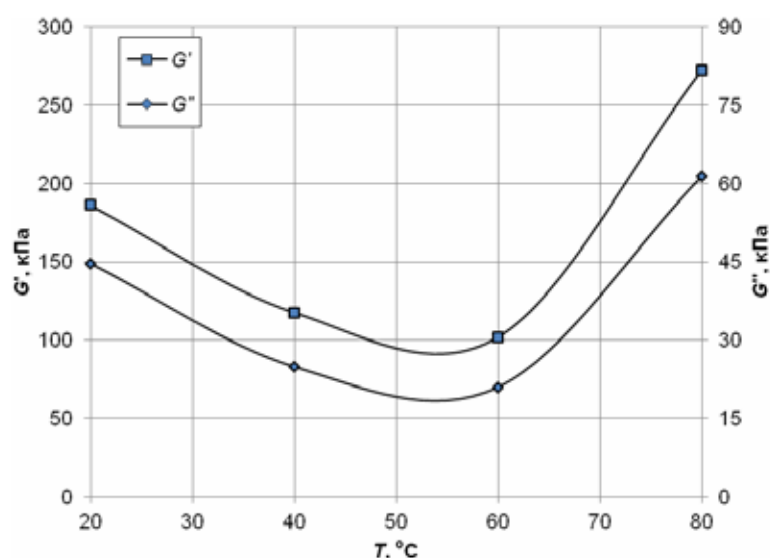


Рис. 9. Зависимость компонент комплексного модуля сдвига отжатый послеспиртовой барды от температуры



Установлено, что отжатая послеспиртовая барда проявляет упругие свойства в области амплитуд деформаций до 1 — 2 %. Величина модуля накопления составляет 180 — 280 кПа, модуля потерь — 40 — 65 кПа. При больших деформациях  $G'$  начинает снижаться, что означает разрушение структуры и переход в вязкотекучее состояние.

Зависимость компонент комплексного модуля сдвига отжатой спиртовой барды от температуры показана на рис. 9.

В диапазоне 20 — 60 °С наблюдается уменьшение  $G'$  и  $G''$  примерно в 2 раза. При более высоких температурах происходит фазовый переход, в диапазоне 60 — 80 °С  $G'$  и  $G''$  увеличиваются в 3 раза, что согласуется с результатами измерений в режиме непрерывного сдвига.

Полученные зависимости могут быть использованы для расчета расходно-напорных характеристик течения барды в технологических трубопроводах и элементах аппаратов для определения оптимальных режимов транспортировки, разработки научно обоснованных рекомендаций по расчету рабочих параметров процессов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Солодовникова Н. В., Симонова Н. Н., Герасимов М. К. Некоторые пути повышения эффективности спиртового производства // Тезисы доклада на научно-практической конференции «Современные ресурсо- и энергосберегающие технологии в спиртовой и ликеро-водочной промышленности». — Казань, 2000. — С. 22.
2. Арсеньев Д. В., Ежков А. А. Технология этилового спирта на основе сопряжения процессов брожения и дистилляции // 5 Международная Научно-практическая конференция ПКФ «Спирт» «О состоянии и направлениях развития производства спирта этилового из пищевого сырья и ликероводочной продукции». — М.: Пищевая промышленность, 2005. — С. 77–101.
3. Дворецкий С. И., Гриднева Л. Т., Иванов О. О. Утилизация мелласной послеспиртовой барды с использованием вермикюльтивирования // «Биотехнология: состояние и перспективы развития»: материалы Третьего Московского международного конгресса. — М.: ЗАО «Экспобиохим-технологии», РХТУ им Д. И. Менделеева, 2005. Ч. 2. — С. 324.
4. Поляков В. А., Леденев В. П. Технология комплексной переработки зернового сырья на спирт и концентрированные продукты // Тезисы доклада на научно-практической конференции «Современные ресурсо- и энергосберегающие технологии в спиртовой и ликеро-водочной промышленности». — Казань, 2000. — С. 13.
5. Кухаренко, А. А., Винаров А. Ю. Безотходная биотехнология этилового спирта. — М.: Энергоатомиздат, 2001. — 272 с.
6. Янчевский, В. К. Утилизация и использование отходов спиртовых заводов в промышленности и сельском хозяйстве / В. К. Янчевский, М. И. Кошель, Ю. А. Каратов, А. А. Дудник // III Международная научно-практическая конференция «Научно-технический прогресс в спиртовой и ликероводочной отрасли». Тезисы докладов. — М.: Пищевая промышленность, 2001. — С. 166 — 174.
7. Лиепиньш Г. К., Дунце М. Э. Сырье и питательные субстраты для промышленной биотехнологии. — Рига: Зинатне, 1986. — 158 с.
8. Калинина О. А., Леденев В. П. Комплексная переработка зерна — эффективный путь повышения рентабельности спиртового производства // Третья Международная научно-практическая конференция «Научно-технический прогресс в спиртовой и ликероводочной отрасли промышленности» Тезисы докладов. — М.: Пищевая промышленность, 2001. — С. 53 — 62.
9. Гут, Б. М., Мельников, В. Г. Откорм крупного рогатого скота на барде. — Л.: Колос, 1984. — С. 11–21.
10. Агишина, Г. Алхимикам и не снилось... ПО «Татспиртпром» готово превращать отходы в доходы // Вид. — 1999. 30 июля.
11. Бондарь М. В., Востриков С. В., Ефимов Ю. В. Исследование физико-химического состава спиртовой дробины, ее кормовой и биологической плотности // III Международная научно-

- практическая конференция «Научно-технический прогресс в спиртовой и ликероводочной отрасли». Тезисы докладов. — М.: Пищевая промышленность, 2001. — С. 99–105.
12. *Мухачев С. Г.* Переработка спиртовой барды смешанной культурой дрожжей / С. Г. Мухачев, Р. Т. Валеева, Р. Р. Шайхутдинов, В. М. Емельянов [и др.] // 1-я Всероссийская научная конференция «Ресурсосберегающие, водо- и почвоохраняющие биотехнологии, основанные на использовании живых экосистем». — Казань. 2006. — С. 208–212.
13. *Пономарев С. В., Мищенко С. В., Дивин А. Г., Вертоградский В. А., Чуриков А. А.* Теоретические и практические основы теплофизических измерений / Под ред. С. В. Пономарева. — М.: Физматлит, 2008. — 408 с.

*Рукопись статьи поступила в редакцию 29.07.2013*

**Z.V. Lovkis, A.A. Shepshelev, S.A. Arnaut, E.V. Korobko,  
S.V. Vilanskaya, M.A. Zhurauski**

### **INVESTIGATION OF RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF DISTILLERY DREGS AND GRAIN MIXINGS UNDER CONTINUOUS SHEAR AND TORSIONAL DEFORMATION**

The results of experimental investigation of rheological characteristics of samples of distillery dregs from rye and grain mixings from rye and wheat with different concentrations under continuous shear and torsional deformation are presented. The temperature dependence of the rheological characteristics in the temperature range 20–80°C is determined. It is found that the rheological behavior of samples of distillery dregs and grain mixings from rye with different concentrations in continuous flow can be described by the Herschel-Bulkley model and grain mixings samples from wheat by the Karo-Galaytnera model. The dependences of model parameters on the temperature and concentration of solid substances are determined. Effective viscosity and components of the complex shear modulus decrease in the temperature range 20–70°C; as temperature increases an increase of these quantities caused by the phase transition is observed.

УДК 621.929:664.7

*В статье изучен вопрос струйного перемешивания жидкотекучих пищевых продуктов в цилиндрических аппаратах. Разработана технология струйного перемешивания жидкотекучих пищевых сред, расчетным и экспериментальным путем установлены основные оптимальные параметры струйного смесителя. Получены экспериментальные данные, которые позволили разработать методику инженерного расчета цилиндрических аппаратов со струйными мешалками.*

### **ТЕХНОЛОГИЯ СТРУЙНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ И МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА АППАРАТА СО СТРУЙНОЙ МЕШАЛКОЙ**

**РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси  
по продовольствию», г. Минск, Беларусь**

*З. В. Ловкис, заслуженный деятель науки Республики Беларусь, член-корреспондент  
Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор;  
А. А. Садовский, младший научный сотрудник отраслевой научно-исследовательской  
лаборатории*

Технологиями производства пищевой продукции предусматриваются такие приемы как смешивание различных компонентов, перемешивание с целью достижения однородной консистенции смеси. Авторами предложен эффективный способ перемешивания жидкотекучих пи-