

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗЕРНОВЫХ ЗАМЕСОВ В УСЛОВИЯХ НЕПРЕРЫВНОЙ ДЕФОРМАЦИИ СДВИГА

**З. В. Ловкис¹, А. А. Шепшелев¹, С. А. Арнаут¹,
Е. В. Коробко², С. В. Виланская², Н. А. Журавский²**

¹ Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию,
г. Минск, Беларусь, E-mail: info@belproduct.com

² Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси,
г. Минск, Беларусь, E-mail: vilan@hmti.ac.by

В пищевой промышленности Республики Беларусь с каждым годом увеличивается перечень и количество выпускаемых новых изделий. Производство многих продуктов в настоящее время механизировано, однако конструкции рабочих органов машин и элементов коммуникаций разрабатываются зачастую без учёта реологических свойств этих продуктов и их изменений при транспортировке, упаковке, хранении, что не позволяет получить оптимальные конечные результаты и ведет к неоправданным потерям энергоресурсов. В то же время процессы производства и конструктивные параметры рабочих органов машин и коммуникаций в значительной степени зависят от реологических свойств перерабатываемых пищевых масс, а сырьё и получаемые готовые продукты обладают различными физико-механическими и реологическими свойствами [1].

Сказанное выше, в частности, относится и к процессу производства этилового спирта. Основные направления развития предприятий, производящих этиловый спирт из пищевого сырья – повышение качества продукции и снижение ее себестоимости [2]. Одним из перспективных путей повышения эффективности спиртового производства является переработка высококонцентрированных заторов, что позволяет снизить расход энергетических ресурсов на производство и повысить кормовую ценность барды. В связи с этим 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 [3].

Приведены результаты впервые выполненного экспериментального 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.

Исследованные составы зернового замеса

Сухое вещество	Соотношение компонентов сухое вещество: 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

Реологические измерения выполнены на вискозиметре Rheotest 2.1 и реометре Physica MCR 301 фирмы Anton Paar. Использовались измерительные ячейки, состоящие из двух коаксиальных цилиндров. Задавалась скорость вращения внутреннего цилиндра, определяющая скорость сдвига в жидкости. Измерялся момент сил, действующий на цилиндр, по которому рассчитывалось напряжение сдвига.

Зерновой замес из ржи. Реологические измерения выполнены на вискозиметре Rheotest 2.1. В измерительной ячейке диаметр внутреннего цилиндра – 37.6 мм, внешнего – 40 мм, зазор между цилиндрами – 1.2 мм. Комплекс для измерения реологических характеристик пищевых продуктов с использованием вискозиметра Rheotest 2.1 представлен на рис. 1.



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

Кривые течения зернового замеса из ржи с концентрацией 33.3 % в диапазоне скоростей сдвига $\dot{\gamma}=3-437.4 \text{ c}^{-1}$ показаны на рис. 2. 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.

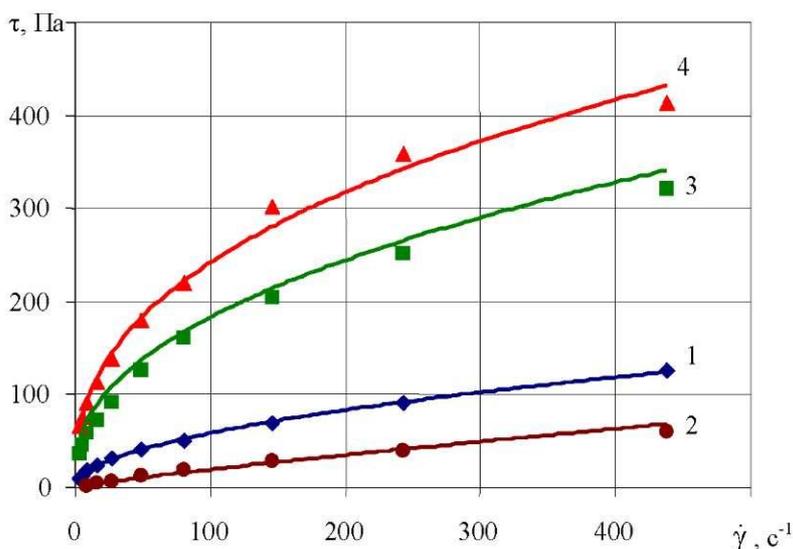


Рис. 2. Кривые течения зернового замеса из ржи с концентрацией 33.3 %: 1 – 30 °С; 2 – 40; 3 – 60; 4 – 80 (точки – эксперимент, кривые – расчет по модели (1))

Согласно результатам экспериментов реологическое поведение зернового замеса из ржи может быть описано моделью Гершеля – Балкли (Herschel – Bulkley) [4]

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

По результатам расчета определены диапазоны параметров модели Гершеля – Балкли в исследованных интервалах концентраций и температур: $\tau_0=0.003\text{--}60$ (Па), $K=0.1\text{--}97.38$ (Па·сⁿ), $n=0.36\text{--}0.9$.

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:

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

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:

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

Концентрационная зависимость напряжения сдвига при температуре 60 °С представлена на рис. 3. С уменьшением концентрации напряжение сдвига снижается.

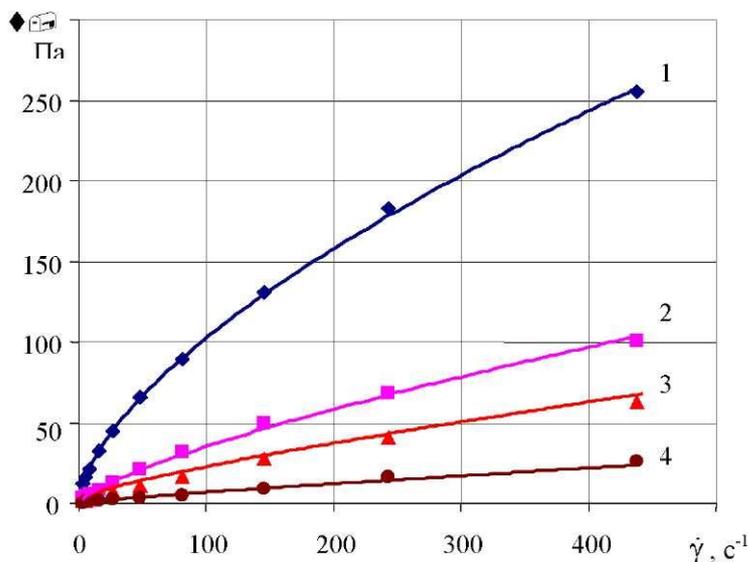


Рис. 3. Кривые течения зернового замеса из ржи различной концентрации при $t=60$ °С: 1 – 33.3%; 2 – 27.8; 3 – 25; 4 – 22.2 (точки – эксперимент, кривые – расчет по модели (1))

Изменения параметров модели Гершеля – Балкли для зернового замеса из ржи от концентрации при 60 °С можно аппроксимировать полиномом 2-ой степени (n – индекс течения при концентрации C)

$$\begin{aligned}\tau_0 &= 42.573C^2 - 20.533C + 2.4665 \\ K &= 586.33C^2 - 273.14C + 31.897 \\ n &= 8.6733C^2 - 7.2031C + 2.0632.\end{aligned}$$

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)

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

На рисунке 4 показана для примера кривая течения зернового замеса из пшеницы с концентрацией 22.2 % (1:3.5) при 20 °С. Фазовый переход при приближении к 80 °С происходит и у пшеничного замеса, напряжение сдвига и эффективная вязкость увеличиваются.

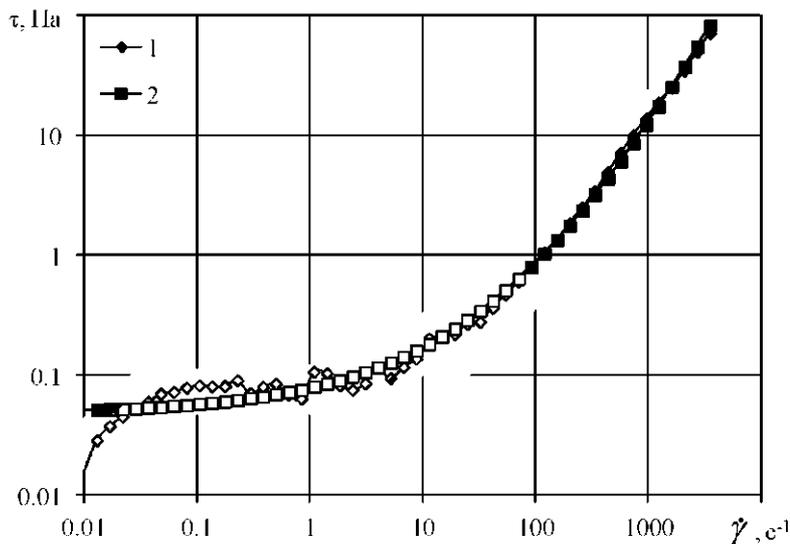


Рис. 4. Кривые течения зернового замеса из пшеницы 22.2% при 20 °С: 1 – экспериментальные результаты; 2 – расчет по формуле (2).

На рис. 5 приведена зависимость τ от температуры для различных концентраций и скоростей сдвига. Напряжение сдвига незначительно уменьшается в диапазоне 20–60 °С, затем увеличивается на 2 порядка при 80 °С.

Диапазоны параметров модели τ_0 , a , b , p в исследованных интервалах концентраций и температур: $\tau_0=0.014-420.1$ (Па); $a=2.4 \cdot 10^{-5}-13.55$ (с); $b=0.1-13.55$; $p=0.041-18.97$.

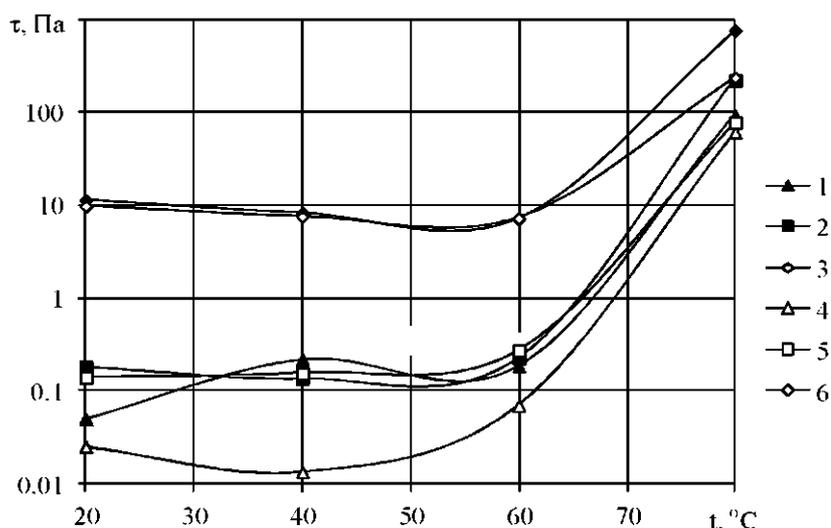


Рис. 5. Зависимость напряжения сдвига зернового замеса из пшеницы от температуры:
1–3 – концентрация 22.2 %, 4–6 – 25%; 1, 4 – скорость сдвига 0.1 с^{-1} ; 2, 5 – 11 с^{-1} ; 3, 6 – 950 с^{-1} .

Выводы. Приведены результаты впервые выполненного экспериментального исследования реологических свойств зерновых замесов (из ржи и пшеницы) различных концентраций в диапазоне температур $20\text{--}80 \text{ }^\circ\text{C}$. Установлено, что реологическое поведение зерновых замесов из ржи может быть описано моделью Гершеля–Балкли, а из пшеницы – моделью Каро–Галайтнера. Определены зависимости параметров моделей от температуры и концентрации твердых веществ.

Полученные зависимости могут быть использованы для расчета расходно-напорных характеристик течения продуктов в технологических трубопроводах и элементах аппаратов (спиральных теплообменниках, насосах, аппаратах гидродинамической и ферментативной обработки и др.) для определения оптимальных режимов транспортировки продуктов.

Обозначения

τ – напряжение сдвига, Па; τ_0 – предельное напряжение сдвига (динамический предел текучести), Па; K – коэффициент консистенции, $\text{Па} \cdot \text{с}^n$; n – индекс течения; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с^{-1} ; a – постоянная величина, c ; b , p – постоянные величины.

Литература

1. Малкин А. Я. Реология: концепции, методы, приложения / А.Я. Малкин, А.И. Исаев. СПб.: Профессия, 2007. 560 с.
2. Орехов А. И. Спиртовая промышленность Республики Беларусь: современное состояние и перспективы развития // Пищевая пром-сть: наука и технологии. 2011. №1 (11). С. 3–7.
3. Валентас К. Дж., Ротштейн Э., Сингх Р.П. Пищевая инженерия: справочник с примерами расчетов / Пер. с англ. под общ. науч. ред. А. Л. Ишевского. СПб: Профессия, 2004. 848 с.
4. Пономарев С. В., Мищенко С. В., Дивин А. Г., Вертоградский В. А., Чуриков А. А. Теоретические и практические основы теплофизических измерений / Под редакцией С. В. Пономарева. М.: Физматлит. 2008. 408 с.