

Профессор Е.И. Пономарева, ассистент Т.Н. Межова,
аспирант В.Ю. Кавешников,
(Воронеж. гос ун-т инж. технол.) кафедра технологии хлебопекарного, макаронного и
кондитерского производств, тел. (473) 255-38-51

доцент Ю.Н. Левин

(Воронеж. гос. пед. ун-т) кафедра прикладной физики, астрономии и технологии,
Тел. (473) 255-38-51

Математическое моделирование эффективной вязкости теста из муки цельносмолотого зерна пшеницы

Исследовано изменение реологических свойств теста из муки цельносмолотого зерна пшеницы в процессе брожения при внесении обогатителей. Получены математические зависимости, позволяющие прогнозировать и регулировать эффективную вязкость теста в процессе брожения.

Study on the change of rheological properties of whole minced wheat grain dough during fermentation with additives. Retrieving dependencies to predict and manage effective viscosity of dough fermentation.

Ключевые слова: мука из цельносмолотого зерна пшеницы, хлебобулочные изделия, обогатители, реологические свойства, эффективная вязкость теста.

Большое значение в пищевой промышленности имеет объективная оценка качества пищевых продуктов и полуфабрикатов. В связи с этим создание и применение методов для объективного контроля качества обеспечивает не только замену органолептического контроля, но и создает предпосылки для разработки автоматических систем управления технологическими процессами пищевого производства [1].

При оценке качества хлебобулочных изделий потребитель обращает особое внимание не только на цвет корки, её состояние и форму изделия, но и на показатели текстуры его мякиша. Учитывая тот факт, что мука из цельносмолотого зерна пшеницы является наиболее нестабильным сырьем, получение изделий с заданными показателями текстуры может быть обеспечено только за счет управления реологическими свойствами полуфабрикатов с учетом хлебопекарных свойств сырья и рецептуры изделий.

Вязкостные свойства являются основными характеристиками, определяющими протекание процесса на стадии формования. К ним относят эффективную вязкость для неньютоновских сред, градиент скорости и напряжение сдвига [1, 2].

Задача исследования – изучить изменение эффективной вязкости теста из муки цельносмолотого зерна пшеницы в процессе брожения и в зависимости от вносимых обогатителей.

Эффективная вязкость псевдопластических жидкостей определяется выражением [3]:

$$\eta = \frac{\sigma_0}{|\dot{\gamma}_0|} \left| \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right|^{n-1} = \eta_0 \left| \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right|^{n-1}, \quad (1)$$

где σ_0 - напряжение сдвига, не зависящее от индекса течения n , Па; $\eta_0, \dot{\gamma}_0$ – постоянные параметры, определяемые по точке пересечения прямых, построенных в спрямляющих координатах $\ln \eta = \ln \dot{\gamma}$ на основе экспериментальной зависимости η от $\dot{\gamma}$.

Можно сделать предположение, что фактор $(n-1)$ линейным образом зависит от дозировки вносимых в тесто обогатителей, а затем экспериментально подтвердить или опровергнуть это допущение. С учетом линейной зависимости фактора $(n-1)$ формула (1) может быть записана в следующем виде:

$$\eta_1 = \eta_0 \left| \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right|^{(n-1)_0 + \kappa_1 \tau_{ad} \dot{\gamma}}, \quad (2)$$

$$\eta_2 = \eta_0 \left| \frac{\gamma}{\gamma_0} \right|^{(n-1)_0 + \kappa_2 \tau_{\dot{\alpha}\delta 2}}, \quad (3)$$

$$\eta_3 = \eta_0 \left| \frac{\gamma}{\gamma_0} \right|^{(n-1)_0 + \kappa_3 \tau_{\dot{\alpha}\delta 3}}, \quad (4)$$

$$\eta_4 = \eta_0 \left| \frac{\gamma}{\gamma_0} \right|^{(n-1)_0 + \kappa_4 \tau_{\dot{\alpha}\delta 4}}, \quad (5)$$

где $(n-1)_0$ - безразмерный параметр, имеющий смысл составляющей части индекса течения, определяемый при помощи спрямления экспериментальных зависимостей, полученных подбором соответствующих координат; $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \kappa_4$ - константы, являющиеся тангенсом угла наклона прямых в координатах $\ln \eta = \ln \gamma$ для теста без обогатителей и с внесением порошка из яичной скорлупы, подсолнечного масла и порошка из подсолнечного жмыха; $\tau_{\dot{\alpha}\delta 1}, \tau_{\dot{\alpha}\delta 2}, \tau_{\dot{\alpha}\delta 3}, \tau_{\dot{\alpha}\delta 4}$ - продолжительность брожения теста без обогатителей и с внесением порошка из яичной скорлупы, подсолнечного масла и порошка из подсолнечного жмыха.

Из уравнений (1)–(5) получим:

$$(n-1)_1 = (n-1)_0 + \kappa_1 \tau_{\dot{\alpha}\delta 1},$$

$$(n-1)_2 = (n-1)_0 + \kappa_2 \tau_{\dot{\alpha}\delta 2}, \quad (6)$$

$$(n-1)_3 = (n-1)_0 + \kappa_3 \tau_{\dot{\alpha}\delta 3}, \quad (7)$$

$$(n-1)_4 = (n-1)_0 + \kappa_4 \tau_{\dot{\alpha}\delta 4}. \quad (8)$$

При изучении реологических свойств теста из муки цельнозернового зерна пшеницы в качестве контрольного выбран полуфабрикат, рецептура которого содержит 100 % муки, 5 % хлебопекарных прессованных дрожжей, 1,3 % поваренной пищевой соли и воду питьевую. Тесто влажностью 48 % готовили безопасным способом. Отдельно вносили обогатители в дозировке: порошок из яичной скорлупы – 2 %, порошок из подсолнечного жмыха – 5 %, подсолнечное масло – 5 %, и изучали изменение эффективной вязкости полуфабриката в процессе 90 мин брожения. Исследования проводили на приборе «Реотест-2» при скорости сдвига $\gamma = 0,33 - 3,0 \text{ c}^{-1}$.

По полученным экспериментальным данным построили кривые течения (рис. 1), из которых видно, что в процессе брожения вязкость теста без внесения обогатителей

снижается, что характерно для большинства тестовых масс.

Прологарифмировав и построив функцию вида $\ln \eta = \ln \gamma$, получили семейство прямых линий, точка пересечения которых соответствует таким значениям скорости сдвига и вязкости, при которых структура теста не меняется. Тангенс их угла наклона дал фактор $(n-1)$, зависящий от времени брожения теста (рис. 2, 3). Как видно, при снижении эффективной вязкости теста его значение уменьшается.

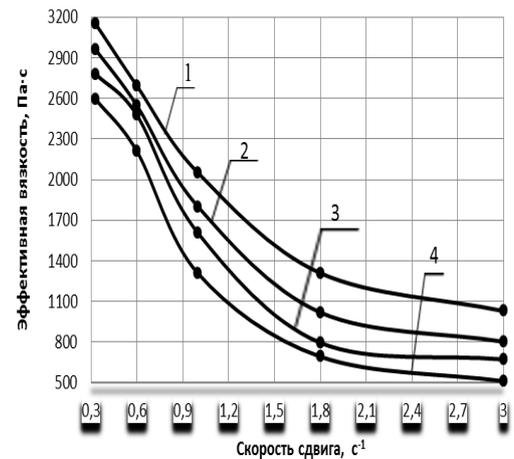


Рис. 1. Зависимость эффективной вязкости теста без обогатителей от скорости сдвига в процессе брожения, мин: 1 - 0; 2 - 30; 3 - 60; 4 - 90

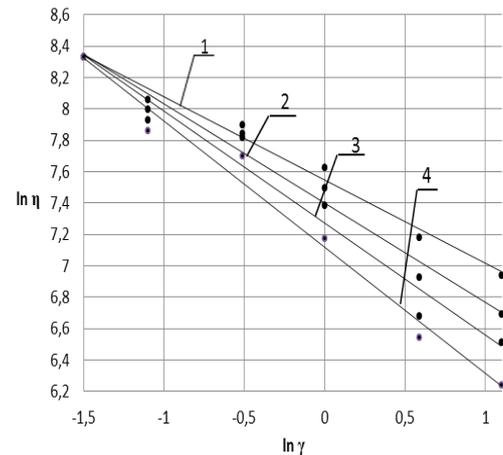


Рис. 2. Зависимость $\ln \eta$ от $\ln \gamma$ для теста без обогатителей в процессе брожения, мин: 1 - 0; 2 - 30; 3 - 60; 4 - 90

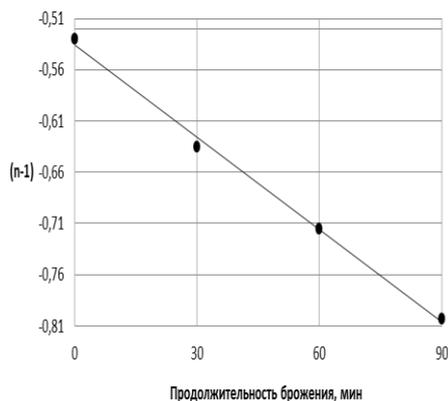


Рис. 3. Зависимость фактора $(n-1)$ от продолжительности брожения теста без обогащителей

Зависимость параметра индекса течения от продолжительности брожения можно представить уравнением:

$$\gamma = -0,003x - 0,5358. \quad (9)$$

С учетом (6) уравнение (10) примет вид

$$(n-1)_1 = -0,5358 - \frac{\tau_{\dot{\alpha}d1}}{333,3}. \quad (10)$$

Аналогичным образом обрабатывали результаты опытов исследования эффективной вязкости полуфабриката с внесением обогащителей.

Установлено, что при внесении в полуфабрикат порошка из яичной скорлупы эффективная вязкость теста увеличивается в процессе брожения (рис. 4).

Воспользовавшись методом спрямляющих координат, получили линии, пересекающиеся в одной точке. Далее было установлено значение фактора $(n-1)$ и характер его изменения при брожении полуфабриката (рис. 5, 6). Как видно, он имеет тенденцию к снижению, что характерно для теста, структура которого в процессе брожения укрепляется.

Уравнение линейной зависимости параметра индекса течения от продолжительности брожения можно записать в следующем виде:

$$\gamma = -0,0012x - 0,4528.$$

С учетом (7) уравнение (11) примет вид:

$$(n-1)_2 = -0,4528 - \frac{\tau_{\dot{\alpha}d2}}{833,3}. \quad (11)$$

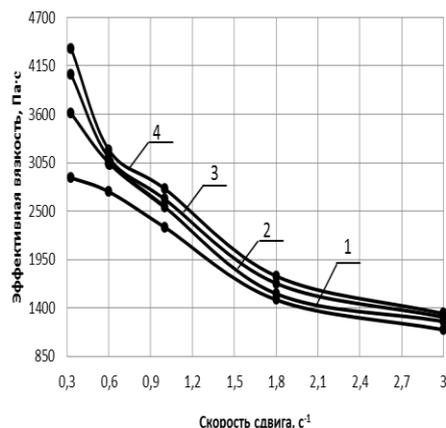


Рис. 4. Зависимость эффективной вязкости теста с внесением яичной скорлупы от скорости сдвига в процессе брожения, мин: 1 - 0; 2 - 30; 3 - 60; 4 - 90

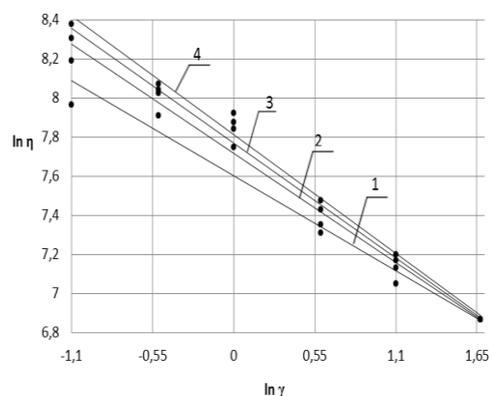


Рис. 5. Зависимость $\ln \eta$ от $\ln \gamma$ для теста с добавлением яичной скорлупы в процессе брожения, мин: 1 - 0; 2 - 30; 3 - 60; 4 - 90

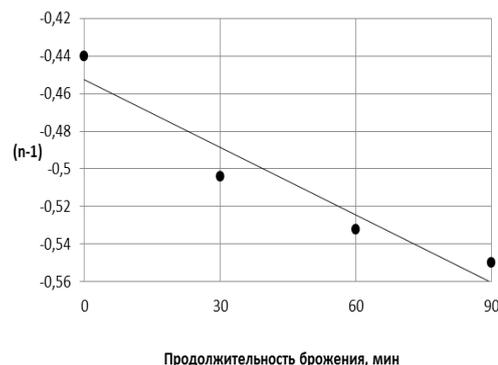


Рис. 6. Зависимость фактора $(n-1)$ от продолжительности брожения теста с внесением порошка из яичной скорлупы

Выявлено, что внесение в тесто из цельнозлакового зерна пшеницы масла подсолнечного уменьшало значение эффективной вязкости в процессе брожения (рис. 7).

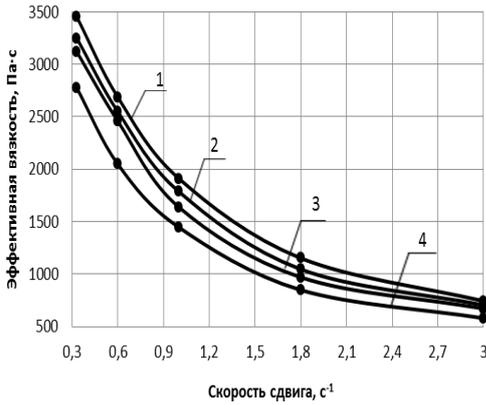


Рис. 7. Зависимость эффективной вязкости теста с внесением подсолнечного масла от скорости сдвига в процессе брожения, мин: 1 - 0; 2 - 30; 3 - 60; 4 - 90

Прологарифмировав значения эффективной вязкости и скорости сдвига, построили прямые, по которым затем рассчитали параметр индекса течения полуфабриката с внесением подсолнечного масла и выявили его линейную зависимость от продолжительности брожения (рис. 8, 9).

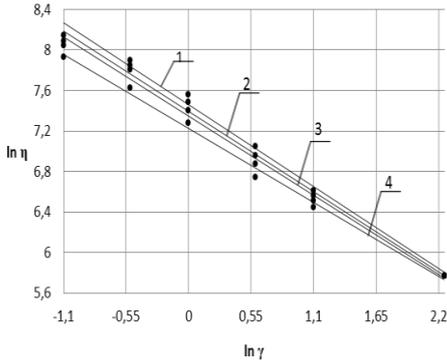


Рис. 8. Зависимость $\ln \eta$ от $\ln \gamma$ для теста с внесением подсолнечного масла в процессе брожения, мин: 1 - 0; 2 - 30; 3 - 60; 4 - 90

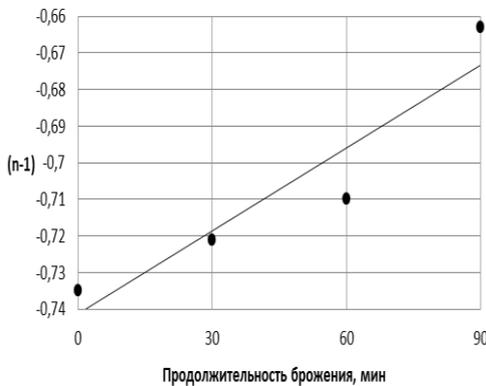


Рис. 9. Зависимость фактора $(n-1)$ от продолжительности брожения теста с внесением подсолнечного масла

Уравнение прямой из рис. 9 можно записать следующим образом:

$$\gamma = -0,0007x - 0,7407$$

С учетом уравнения (8) данное выражение примет вид

$$(n-1)_3 = -0,7407 + \frac{\tau_{\text{адз}}}{1428,6} \quad (12)$$

Внесение в тесто порошка из подсолнечного жмыха вызывает увеличение значений эффективной вязкости теста, обусловленное довольно высоким содержанием в данном сырье пищевых волокон (рис. 10).

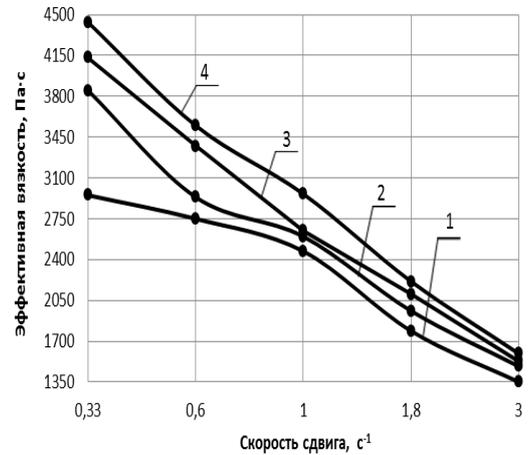


Рис. 10. Зависимость эффективной вязкости теста с внесением порошка из подсолнечного жмыха от скорости сдвига в процессе брожения, мин: 1 - 0; 2 - 30; 3 - 60; 4 - 90

Выполнив операции логарифмирования и нахождения точки пересечения прямых, рассчитали параметр индекса течения $(n-1)$ и его преобразование в ходе брожения, доказывающее укрепляющее влияние порошка из подсолнечного жмыха на структуру теста (рис. 11, 12).

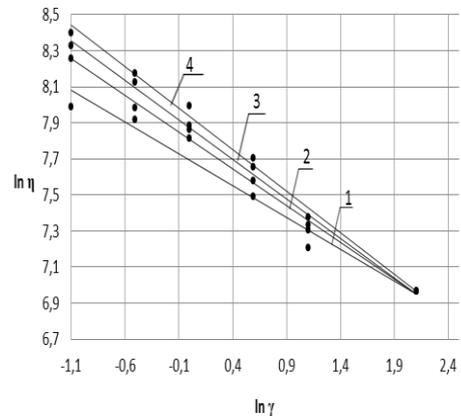


Рис. 11. Зависимость $\ln \eta$ от $\ln \gamma$ для теста с внесением порошка из подсолнечного жмыха в процессе брожения, мин: 1 - 0; 2 - 30; 3 - 60; 4 - 90

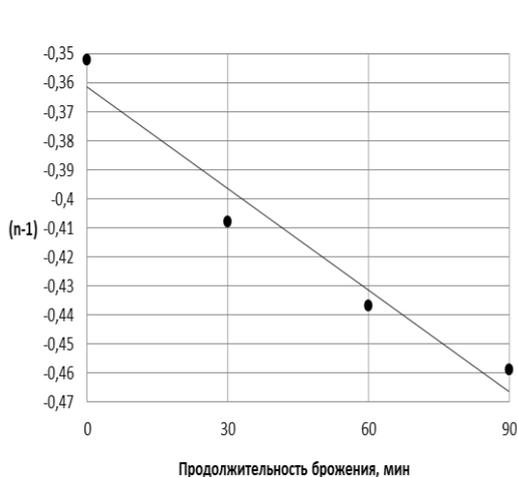


Рис. 12. Зависимость фактора (n-1) от продолжительности брожения теста с внесением порошка из подсолнечного жмыха

Уравнение линейной зависимости параметра индекса течения от продолжительности брожения можно выразить следующей формулой:

$$\gamma = -0,0012x - 0,3615 .$$

С учетом этого преобразуем уравнение (9):

$$(n-1)_4 = -0,3615 + \frac{\tau_{\text{а} \delta 4}}{833,3} . \quad (13)$$

Таким образом, учитывая выражения (10)-(13), уравнения (2)–(5) принимают следующий вид:

$$\eta_1 = A_0 \cdot \eta_0 \left| \frac{\gamma}{\gamma_0} \right|^{-0,5358 - \frac{\tau_{\text{а} \delta 1}}{333,3}} , \quad (14)$$

$$\eta_2 = A_0 \cdot \eta_0 \left| \frac{\gamma}{\gamma_0} \right|^{-0,4528 - \frac{\tau_{\text{а} \delta 2}}{833,3}} , \quad (15)$$

$$\eta_3 = A_0 \cdot \eta_0 \left| \frac{\gamma}{\gamma_0} \right|^{-0,7407 + \frac{\tau_{\text{а} \delta 3}}{1428,6}} , \quad (16)$$

$$\eta_4 = A_0 \cdot \eta_0 \left| \frac{\gamma}{\gamma_0} \right|^{-0,3615 - \frac{\tau_{\text{а} \delta 4}}{833,3}} . \quad (17)$$

Методом последовательного приближения установлено, что фактические значения эффективной вязкости совпадают со значениями, полученными по формулам (14)-(17), с поправками на влияние скорости.

Таким образом, управление качеством пищевых продуктов может осуществляться на основе управления реологическими свойствами полуфабрикатов. Полученные математические модели изменения эффективной вязкости теста из муки цельнозернового зерна пшеницы с внесением порошка из яичной скорлупы, порошка из подсолнечного жмыха, подсолнечного масла позволяют моделировать, прогнозировать и регулировать структурно-механические свойства полуфабриката. Данный подход обеспечит разработку автоматизированных систем управления технологическими процессами и регулирование вязкости в производственных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов, О. А. Реология пищевых масс [Текст] / О.А. Кузнецов, Е.В. Волошин, Р.Ф. Сагитов. – Оренбург, 2005. – 106 с.
2. Пономарева, Е.И. Моделирование структурно-механических свойств теста из биоактивированного зерна пшеницы [Текст] / Е.И. Пономарева, Н.Н. Алехина, А.А. Журавлев // Хранение и переработка сельхозсырья. - 2009.- № 4. – С. 68-70.
3. Максимов, А. С. Лабораторный практикум по реологии сырья, полуфабрикатов и готовых изделий хлебопекарного, макаронного и кондитерского производств [Текст] / А.С. Максимов, В.Я. Черных. – М.: Издательский комплекс МГУПП, 2004. – 163 с.