

УДК 664.71

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОРОЩЕННОГО ЗЕРНА

Н.Н. Курилович, В.А. Шуляк, А.В. Евдокимов

Приведены новые экспериментальные данные по структурно-механическим свойствам пророщенного зерна различных злаковых культур. Получены кривые деформирования, зависимости разрушающих напряжений и модуля упругости от влажности зерна, кривые ползучести при различных температурах окружающего воздуха. В результате математической обработки опытных данных получены уравнения описывающие изменение отношения напряжений от величины накопленной вязкопластической деформации, а также зависимости скорости ползучести от времени.

Введение

В настоящее время широкое применение находят пищевые добавки, полученные из пророщенного зерна различных злаковых культур. Обладая высокой биологической ценностью и значительным содержанием витаминов, макро- и микроэлементов, пророщенное зерно используется в продуктах питания как традиционного, так и лечебного назначения. В связи с этим возникает вопрос качественной переработки данного продукта без потери биологически ценных веществ. При длительном воздействии высоких температур разрушаются витамины, нарушается структура вещества. Использование сушилок взвешенного слоя с малым временем пребывания в зоне термообработки позволяет вести сушку при более высоких температурах без потери качества готового продукта.

Результаты исследований и их обсуждение

Для получения тонкодисперсных пищевых порошков из высоковлажного сырья нами разработана экспериментальная установка, позволяющая одновременно проводить сушку и измельчение обрабатываемых материалов. Сушка и в особенности механическая обработка пищевых материалов невозможна без знания их структурно-механических свойств. В доступных литературных источниках [1,2] приведены исследования структурно-механических свойств зерна влажностью до 20%, в то время как свойства пророщенного зерна влажностью 35–45% до настоящего времени не изучены.

Под структурно-механическими свойствами зерна принято понимать способность его к деформированию и разрушению под воздействием внешних силовых и температурных факторов. При этом в материале происходит накопление упруго-пластических деформаций. По результатам таких испытаний строят кривые деформирования в координатах: внешние силовые факторы – деформации.

Для проведения испытаний использовались пророщенные зерна ржи, пшеницы следующих сортов: рожь озимая сорта «Верасень» урожая 2007г., пшеница яровая сорта «Мунк» урожая 2007 г.

Зерна выбирали одинаковыми по ширине, длине и толщине и из них подготавливали образцы для проведения испытаний. Для этого вырезали из них цилиндры длиной 6,0–6,5 мм и диаметром 3,2–3,3 мм. В ходе подготовки с поверхности зерна удалялась внешняя оболочка. На три образца, установленных по треугольнику, помещали тонкую пластину незначительного веса с вертикально впаянной иглой. На пластину помещали грузы, вплоть до разрушения образцов. О деформациях образцов судили по перемещению кончика иглы. Величину деформаций измеряли с помощью оптического катетометра В-630, точность измерения которого составляет 0,001 мм.

Эксперимент проводили при одноосном сжатии. Предельное состояние влечет появление трещин и отделения одной части зерна от другой, а также появление значительных остаточных деформаций.

Кривые деформирования пророщенного зерна ржи и пшеницы различной влажности при температуре окружающего воздуха равной 23°C представлены на рисунках 1,2.

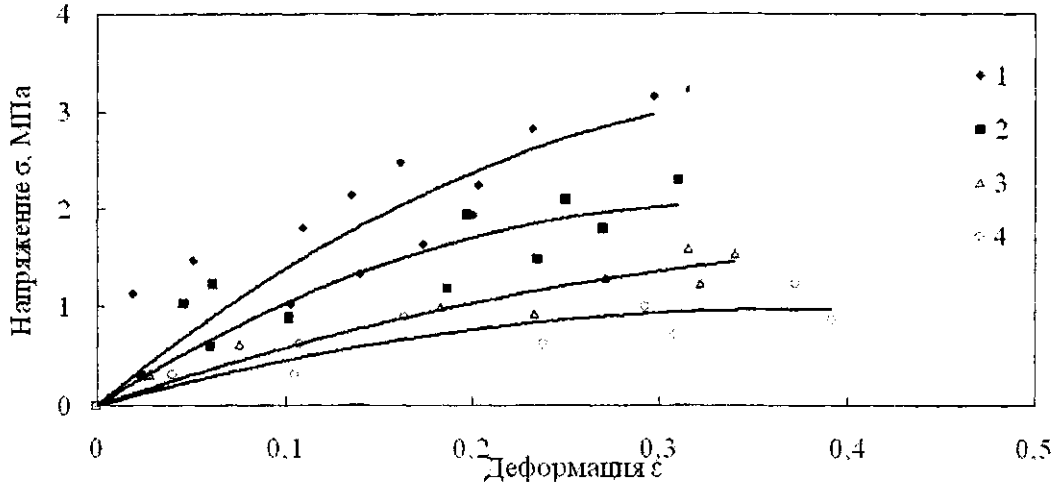


Рисунок 1 – Кривые деформирования пророщенного зерна ржи различной влажности:
1 – влажность 34,3%; 2 – 38,5%; 3 – 40,3%; 4 – 43,4%

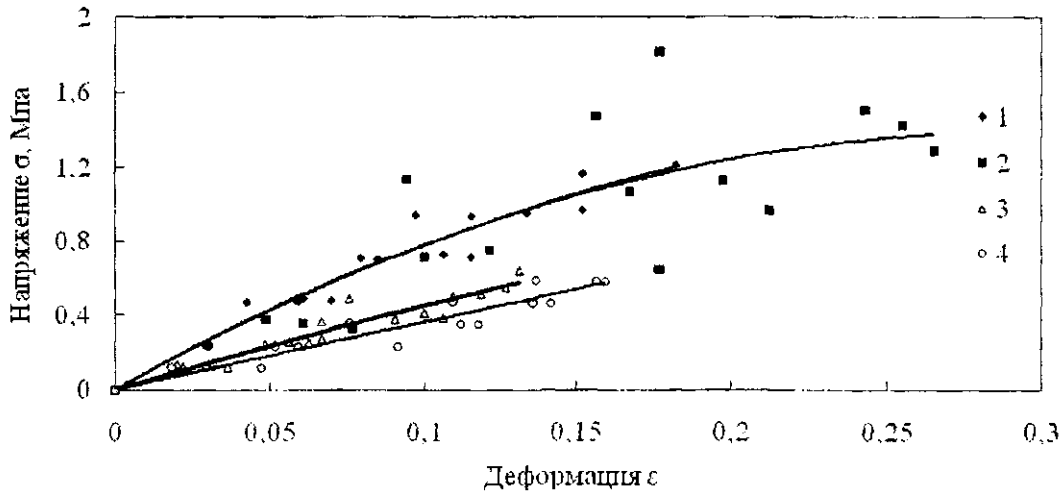


Рисунок 2 – Кривые деформирования пророщенного зерна пшеницы различной влажности:
1 – влажность 36,2%; 2 – 33,8%; 3 – 39,5%; 4 – 38,1%

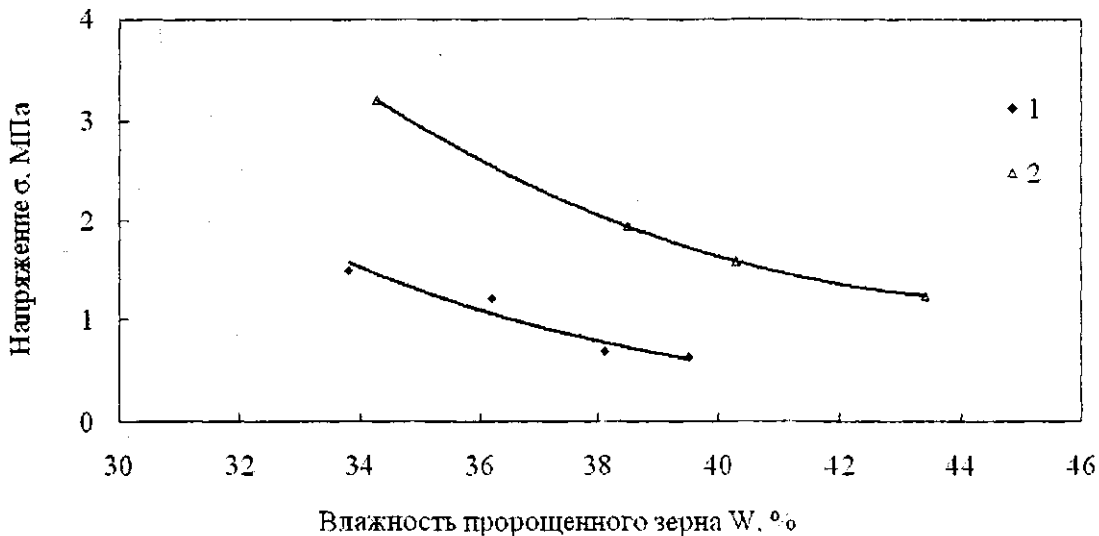


Рисунок 3 – Разрушающие напряжения от влажности пророщенного зерна:
1 – пшеница; 2 – рожь

На данных кривых вначале наблюдается линейная зависимость между нагрузкой и деформацией, то есть соблюдается закон упругого деформирования Гука. Далее идет рост остаточных деформаций без заметного появления площадок текучести. Характер диаграммы деформирования в значительной мере зависит от влажности и стекловидности зерна. Предельное напряжение, соответствующее разрушению материала, отмечено правой крайней точкой на графике деформаций. На диаграммах отчетливо видно, что большей прочностью обладает зерно с меньшей влажностью. С увеличением влажности кривые располагаются с большим наклоном к горизонтальной оси, что свидетельствует о повышении пластичности зерна. В предельном состоянии зерно растрескивается или сплющивается с образованием глубоких продольных трещин. Поэтому для оценки предельного состояния зерна может быть использована теория наибольших относительных деформаций.

Наибольшей прочностью обладает пророщенное зерно ржи (рисунок 1), у которого разрушающее напряжение при влажности $W=34,3\%$ составляет 4,2 МПа, относительная деформация $\epsilon=0,40$, а при влажности $W=43,4\%$ разрушающее напряжение равно 1,6 МПа, относительная деформация $\epsilon=0,42$.

Наименьшей прочностью обладает пророщенное зерно пшеницы (рисунок 2). При влажности 33,8% предел прочности равен 1,38 МПа, а при влажности 39,5% – 0,55 МПа. При влажности 33,8% предельная относительная деформация составляет 0,27, а при влажности 39,5% всего 0,13.

Зависимость пределов прочности от влажности при температуре окружающей среды равной 23°C представлена на рисунке 3.

Предельная относительная деформация при разрушении для ржи строго не зависит от влажности, а для пшеницы с увеличением влажности уменьшается.

Линейный характер кривых деформирования на начальной стадии нагружения позволяет определить модуль упругости E_0 по известной формуле

$$E_0 = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}, \quad (1)$$

где $\Delta\sigma$ – приращение напряжения на участке $\Delta\epsilon$.

Экспериментальные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Модуль продольной упругости E_0 от влажности пророщенного зерна

Рожь (E_0 , МПа)			Пшеница (E_0 , МПа)		
$W=34,3\%$	$W=40,3\%$	$W=43,4\%$	$W=33,8\%$	$W=36,2\%$	$W=39,5\%$
12	8	5	4,5	4	3

Под кривой мгновенного деформирования понимают такую кривую, которая получена в течение малого промежутка времени (сотых долей секунды).

На практике осуществить такой эксперимент очень трудно. Имеющиеся в известной литературе сведения о кривых деформирования получены в течение нескольких секунд. Легко заметить, что это обстоятельство дает основание предположить наличие всех четырех видов деформаций: мгновенноупругой $\epsilon^{м\upsilon}$, мгновеннопластической $\epsilon^{м\pi}$, вязкоупругой $\epsilon^{в\upsilon}$ и вязкопластической $\epsilon^{в\pi}$.

Для определения вязкоупругих деформаций нагружали образцы до различных уровней напряжений, измерив при этом полную деформацию, затем быстро снимали нагрузку, определяя при этом наличие вязкоупругой деформации. Обнаружить наличие вязкоупругих деформаций не удалось.

Эксперименты на ползучесть проводили на таких же образцах, что и для получения кривой деформирования. Образцы нагружали до некоторого уровня напряжений, выдерживали материалы при этом уровне напряжений и измеряли величины вязкопластических деформаций. У всех образцов из пророщенного зерна наблюдалось вязкопластическое течение. Деформации ползучести имели достаточно заметное значение.

Графическая зависимость модуля продольной упругости от влажности для всех видов пророщенных зерен представлена на рисунке 4.

На рисунке 5 показаны кривые ползучести для пророщенного зерна пшеницы при постоянном напряжении $\sigma_0=0,27$ МПа, различной влажности и температуре окружающей среды $T=23^\circ\text{C}$. На рисунке 6 приведены кривые ползучести для пророщенного зерна ржи различной влажности при постоянном напряжении $\sigma_0=0,9$ МПа и температуре окружающей среды $T=23^\circ\text{C}$. Кривые ползучести для пророщенного зерна ржи, пшеницы имеют два участка. Первый участок неустановившейся ползучести, время деформирования для которого составляет 5–10 секунд. На этом участке зависимость накопившейся вязкопластической деформации при постоянном напряжении σ_0 имеет нелинейный характер. Второй участок квазипластической деформации, вплоть до затухания процесса ползучести.

Время накопления вязкопластической деформации до затухания составляет у пророщенного зерна пшеницы 30–40 секунд, у зерна ржи 140–150 секунд. Максимальная деформация ползучести у пророщенного зерна ржи составляла $\varepsilon=0,1$, что соответствует 30–40% от полной деформации, накопившейся при быстром нагружении и влажности $W=33,8\%$ и $W=36,2\%$.

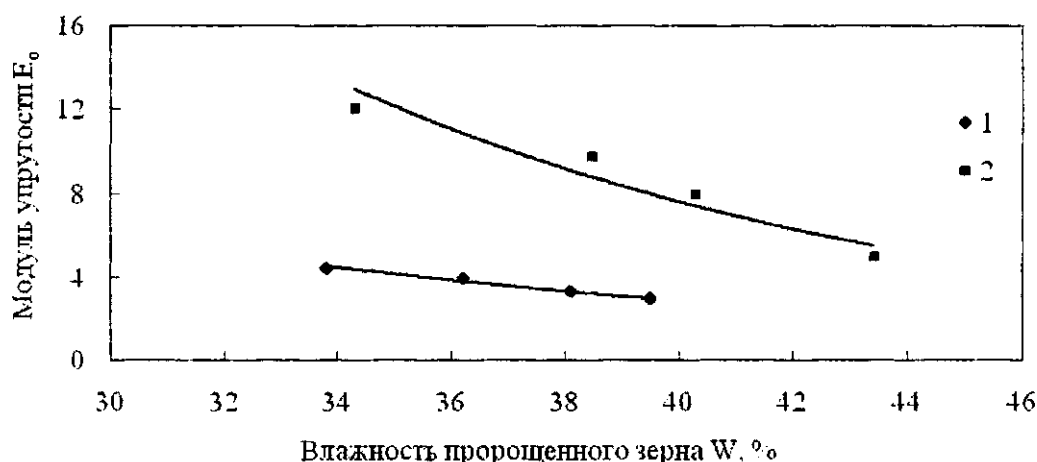


Рисунок 4 – Модуль продольной упругости от влажности пророщенного зерна: 1 – пшеница; 2 – рожь

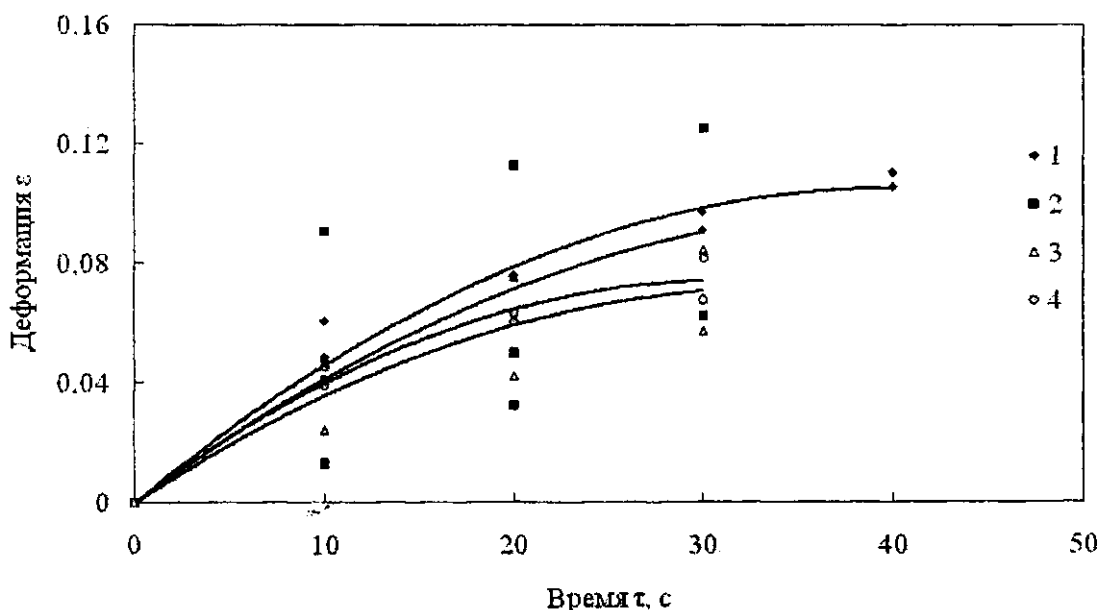


Рисунок 5 – Кривые ползучести для пророщенного зерна пшеницы различной влажности: 1 – влажность 33,8%; 2 – 36,2%; 3 – 38,1%; 4 – 39,5%

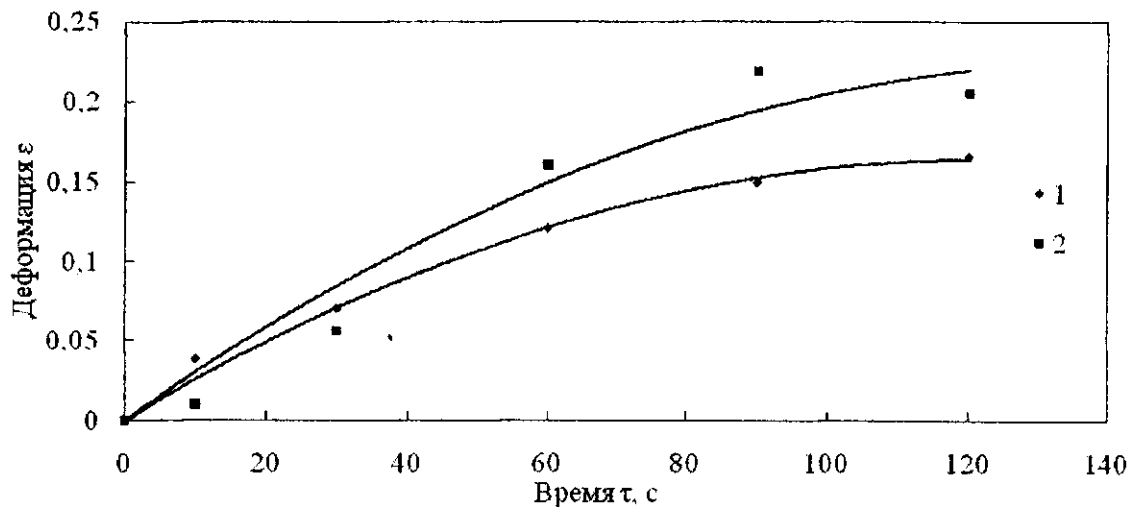


Рисунок 6 – Кривые ползучести для пророщенного зерна ржи различной влажности: 1 – влажность 37%; 2 – 40,3%

У пророщенного зерна ржи максимальная деформация ползучести составляла $\varepsilon=0,20$, что соответствует 40–45% от полной деформации, накопившейся при быстром нагружении. С возрастанием уровня напряжений скорость вязкопластического течения увеличивается, однако доля данных деформаций по-прежнему составляет 30–45% для всех видов зерна. Следовательно, суммарная доля мгновеннопластической и мгновенноупругой деформаций на кривых деформирования, представленных на рисунках 1–2, составляет 55 – 70%. Полная деформация может быть определена по формуле [3]:

$$\varepsilon = \varepsilon^{MY} + \varepsilon^{MP} + \varepsilon^{BN}. \quad (2)$$

В процессе мгновенного нагружения полная деформация определяется [3]:

$$\varepsilon = \varepsilon^{MY} + \varepsilon^{MP}. \quad (3)$$

Что касается нелинейного закона деформирования, то он оказывает незначительное влияние на модуль упругости E_0 , определяемый на линейном участке деформирования. На участке квазипластического деформирования наблюдается некоторое его уменьшение и, в принципе, может быть определен по формуле [3]:

$$E(\sigma) = E_0 \times \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma^*}\right), \quad (4)$$

где σ – текущее напряжение, σ^* – постоянная для данного вида пророщенного зерна. Для зерна ржи $\sigma^*=40$ МПа, для зерна пшеницы $\sigma^*=15$ МПа, что определяется из графиков, представленных на рисунках 1–2.

Обратимся к определению вязкопластической деформации в уравнении механических состояний (2).

Скорость вязкопластической деформации может быть определена с помощью реологического уравнения, описывающего гипотетическую среду Максвелла [3]:

$$\dot{\varepsilon}^{BN} = f(\sigma) \varepsilon_{en}(\tau), \quad (5)$$

где $\dot{\varepsilon}^{BN}$ – скорость вязкопластической деформации при фиксированном напряжении σ^* ; $\varepsilon_{en}(\tau)$ – убывающая функция времени.

Для исследования скорости вязкопластической деформации были построены экспериментальные кривые ползучести для пророщенного зерна ржи и пшеницы при различных уровнях напряжений. Данные кривые показаны на рисунках 7 и 8.

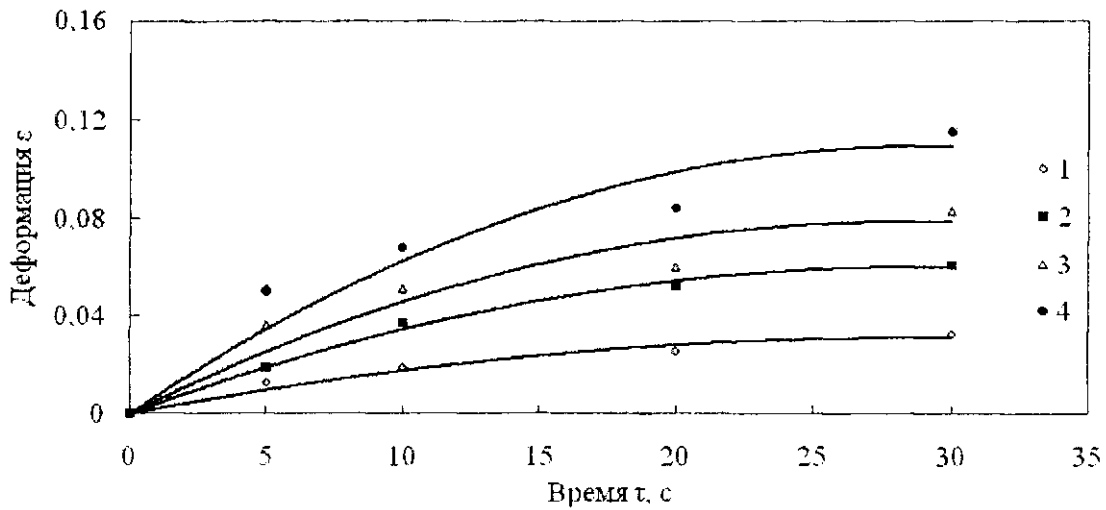


Рисунок 7 – Кривые ползучести для пророщенного зерна ржи влажностью $W=34\%$:
 1 – напряжение $\sigma_0=0,38$ МПа, 2 – $\sigma_0=0,48$ МПа, 3 – $\sigma_0=0,53$ МПа, 4 – $\sigma_0=0,67$ МПа

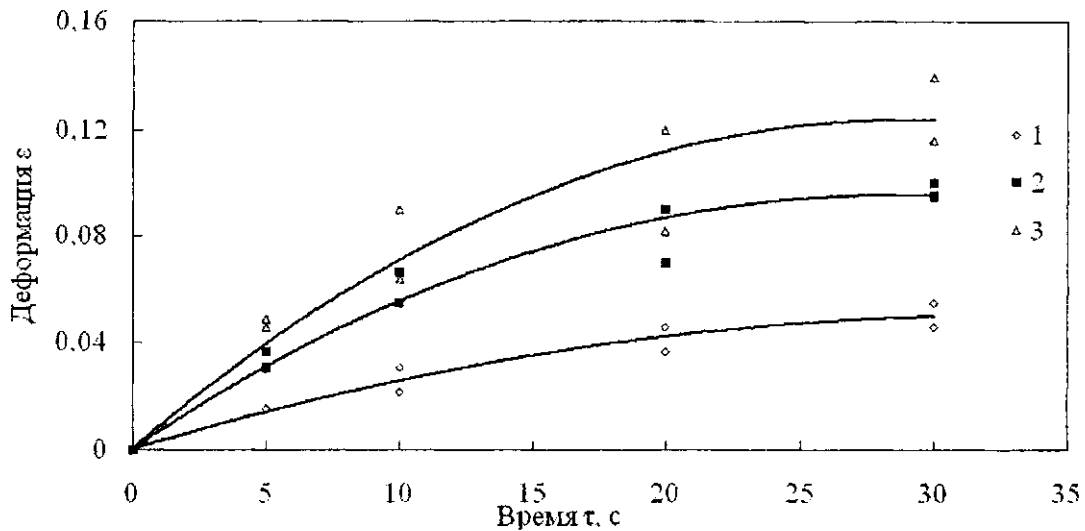


Рисунок 8 – Кривые ползучести для пророщенного зерна пшеницы влажностью $W=33\%$:
 1 – напряжение $\sigma_0=0,2$ МПа, 2 – $\sigma_0=0,3$ МПа, 3 – $\sigma_0=0,4$ МПа

Функцию напряжений можно представить как [3]

$$f(\sigma) = f\left(\frac{\sigma}{\sigma^{**}}\right)^m \tag{6}$$

Для пророщенного зерна ржи $\sigma^{**}=0,38$ МПа, для зерна пшеницы $\sigma^{**}=0,2$ МПа. Для определения $f\left(\frac{\sigma}{\sigma^{**}}\right)$ строится график зависимости вязкопластической деформации от уровня напряжений при любом фиксированном времени τ^{**} . Для пророщенного зерна ржи и пшеницы принимали время $\tau^{**}=5$ секунд при температуре окружающей среды 15°C . Данные кривые зависимости $\epsilon^{вп}$ от $f\left(\frac{\sigma}{\sigma^{**}}\right)^m$ показаны для ржи на рисунке 9, а для пшеницы на рисунке 10.

Функция $\epsilon_{вп}(\tau)$ определяется графическим дифференцированием любой экспериментальной кривой ползучести, принятой за фиксированную. Для пророщенного зерна ржи за фиксированную кривую принимаем кривую при $\sigma_0=0,38$ МПа, для зерна пшеницы при

$\sigma_0=0,2$ МПа. Такие зависимости скорости ползучести от времени выдержки под нагрузкой для пророщенного зерна ржи показаны на рисунке 11, а для зерна пшеницы на рисунке 12.

Функции $f\left(\frac{\sigma}{\sigma^{**}}\right)^m$ аппроксимированы для пророщенного зерна ржи

$$f\left(\frac{\sigma}{\sigma^{**}}\right)^m=0,017\times\left(\frac{\sigma}{\sigma^{**}}\right)^{1,89}, \quad (7)$$

- для пшеницы

$$f\left(\frac{\sigma}{\sigma^{**}}\right)^m=0,023\times\left(\frac{\sigma}{\sigma^{**}}\right). \quad (8)$$

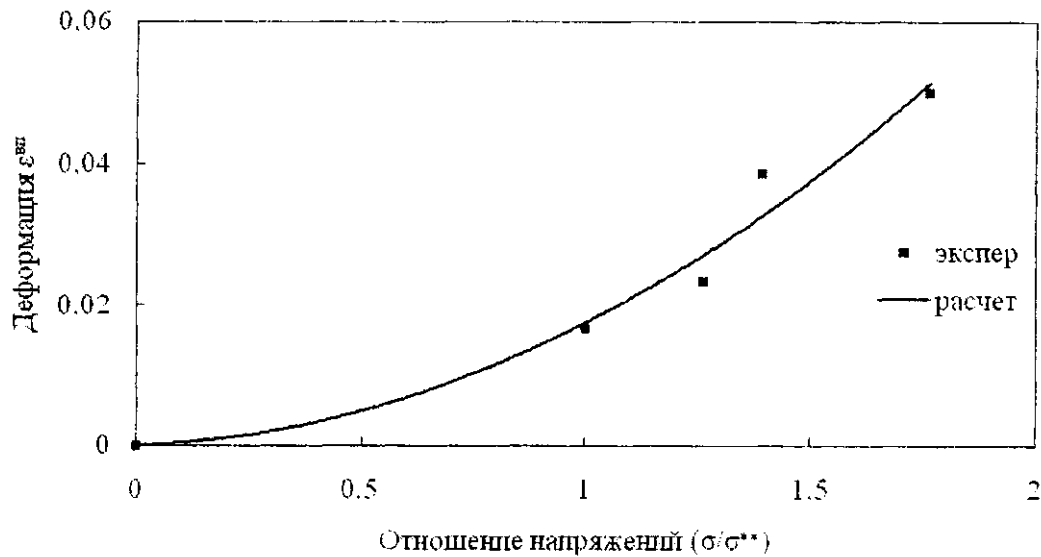


Рисунок 9 – Отношение напряжений от величины накопленной вязкопластической деформации для пророщенного зерна ржи

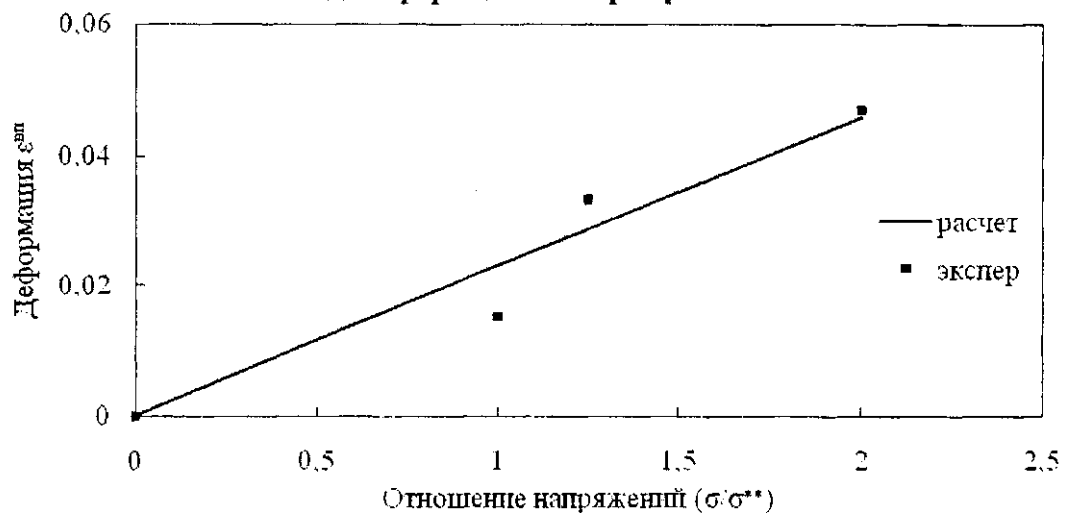


Рисунок 10 – Отношение напряжений от величины накопленной вязкопластической деформации для пророщенного зерна пшеницы

Функция $\varepsilon^{вп}(\tau)$ аппроксимирована для пророщенного зерна ржи:

$$\dot{\varepsilon}^{вп}(\tau)=A_1 \times \exp^{-\tau/\alpha}, \quad (9)$$

где A_1 и α – постоянные ($A_1=0,0027$, $\alpha=30$ с).

- для пшеницы

$$\dot{\varepsilon}^{вп}(\tau)=A_2 \times \exp^{-\tau/\alpha} \quad (10)$$

$$A_1=0,0037, \alpha=30 \text{ с.}$$

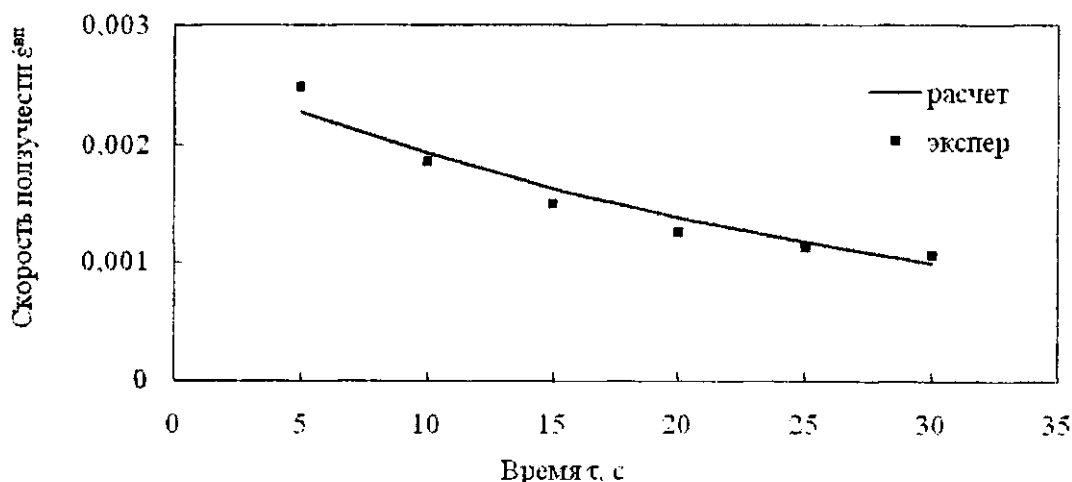


Рисунок 11 – Скорость ползучести от времени для пророщенного зерна ржи при влажности W=34%

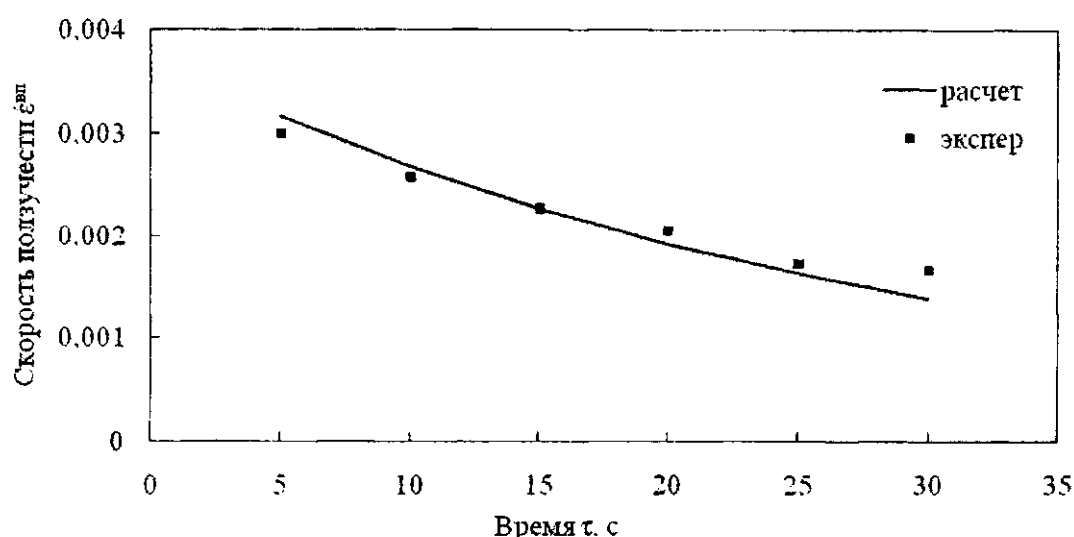


Рисунок 12 – Скорость ползучести от времени для пророщенного зерна пшеницы при влажности W=33%

Процесс вязкопластического течения может быть определен как

$$\epsilon^{вп} = 0,017 \times \left(\frac{\sigma}{\sigma_{эксп}}\right)^{1,89} \int_0^{\tau} 0,0027 \exp^{-\frac{\tau}{30}} d\tau \quad (11)$$

$$\epsilon^{вп} = 0,023 \times \left(\frac{\sigma}{\sigma_{эксп}}\right) \int_0^{\tau} 0,0037 \exp^{-\frac{\tau}{30}} d\tau \quad (12)$$

Обратимся к оценке мгновеннопластического деформирования, показанного на рисунках 1,2. Для описания мгновеннопластической деформации можно использовать выражение [4]

$$\epsilon^{мп} = \gamma \left[\exp^{m \left(\frac{\sigma}{\sigma_{эксп}}\right)} - 1 \right] \quad (13)$$

Данное выражение впервые было использовано при описании реологических свойств макаронного теста.

В выражении (13) γ , m , $\sigma_{эксп}$ – постоянные для данного вида материала. Деформация име-

ет место при условии $\exp^{m\left(\frac{\sigma}{\sigma_{\text{эксп.}}}\right)} > 1$.

В проведенных экспериментах постоянные были равны:

- для пророщенного зерна ржи влажностью $W=34,3\%$

$\gamma=0,4 \cdot 10^{-1}$, $m=2,0$, $\sigma_{\text{эксп.}}=3,5$ МПа;

- пророщенное зерно пшеницы влажностью $W=33,8\%$

$\gamma=0,5 \cdot 10^{-1}$, $m=2,0$, $\sigma_{\text{эксп.}}=2,0$ МПа.

Таким образом, процесс упруго-пластического деформирования может быть описан с помощью уравнения [4]:

$$\varepsilon^{\text{полная}} = \frac{\sigma}{E_c \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_c}\right)} + \gamma \left[\exp^{m\left(\frac{\sigma}{\sigma_{\text{эксп.}}}\right)} - 1 \right] \quad (14)$$

Данное выражение достаточно точно описывает поведение зерна на стадии упруго-пластического деформирования.

Проведенные исследования позволят выбрать оптимальные режимы механической и термической обработки пророщенного зерна в сушилке-диспергаторе и проектировать более эффективные технологические аппараты.

Заключение

Изучены структурно-механические свойства пророщенного зерна ржи, пшеницы при статической нагрузке. Получены новые данные по прочностным свойствам пророщенного зерна различной влажности. Исследованы реологические свойства пророщенного зерна: скорость ползучести, величина вязкопластической, упруго-пластической и полной деформации. Получена аналитическая зависимость, описывающая реологические свойства зерна на стадии упруго-пластического деформирования.

Литература

1. Наумов, И.А. Совершенствование кондиционирования и измельчения пшеницы и ржи / И.А. Наумов. – М.: «Колос», 1975. – 175 с.
2. Егоров, Г.А. Технология переработки зерна / Г.А. Егоров и др. 2-е изд., доп. и перераб. – М.: «Колос», 1977. – 366 с.
3. Курилович, Н.Н. Сопротивление материалов: Конспект лекций для студентов механических специальностей / Н.Н. Курилович. – Могилев: МГУП, 2003. – 271 с.
4. Курилович, Н.Н. Физические свойства уплотненного макаронного теста, изготовленного с использованием ржаной муки / Курилович Н.Н., Тихонович Е.Ф. Сборник научных трудов к 30-летию Могилевского государственного университета продовольствия; редкол.: Т.С. Хасаншин [и др.]. – Издательский центр БГУ, Минск, 2003. – С. 110–115.

Поступила в редакцию 11.10.2008