

УДК 664.692.5

## Исследование разбухания макаронных прядей в процессе прессования в поле ультразвука

Д-р техн. наук **Верболоз Е.И.**<sup>1</sup>; канд. воен. наук **Пальчиков А.Н.**<sup>2</sup>,  
канд. техн. наук **Антуфьев В.Т.**<sup>3</sup>, аспирант **Кобыда Е.В.**<sup>4</sup>

<sup>1</sup>elenaverboloz@mail.ru; <sup>2</sup>palchikov\_anatoliy@mail.ru; <sup>3</sup>antufjew2010@yandex.ru; <sup>4</sup>elenakobyda@yandex.ru

Университет ИТМО

Институт холода и биотехнологий

921002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

*В представленной работе рассмотрены вопросы прессования макаронного теста с наложением ультразвуковых колебаний. Релаксация накопленных в процессе прессования напряжений влияет на качество макаронных изделий и проявляется в виде разбухания, происходящего под действием нормальных напряжений - перпендикулярных направлению движения массы прядей из теста. Выявлено, что коэффициент разбухания макаронного теста зависит от параметров ультразвуковых колебаний, реологических свойств теста, а также от режимов деформирования тестовой массы, определяющих степень накопления и релаксации высокоэластичных деформаций. Определена аналитическая зависимость для расчета рекомендуемой мощности ультразвуковых колебаний, поглощаемых тестом в фильерах при изготовлении макарон. В результате воздействия ультразвука на тесто значительно улучшается качество готовых изделий и увеличивается массовый расход макаронного теста в процессе прессования.*

**Ключевые слова:** прессование, разбухание, макаронное тесто, ультразвуковые колебания.

---

## Study on the swelling pasta strands under the influence of ultrasonic vibrations in the process of pressing.

*D.Sc* **Verboloz E.I.**, *Ph. D* **Palchikov A.N.**, *Ph. D* **Antufjev V.T.**, **Kobyda E.V.**

University ITMO

Institute of Refrigeration and Biotechnologies

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

*In the present work the issues pressing the macaroni dough with ultrasonic vibrations. Relaxation of the pressing stress affects the quality of the pasta and manifests itself in the form of swelling that occurs under the influence of normal stress perpendicular to the direction of traffic mass of strands of dough. Revealed that the rate of swelling Pasta dough depends on the parameters of ultrasonic vibrations, the rheological properties of dough, as well as the modes of deformation of the test masses defining the degree of accumulation and relaxation of high elastic deformations. Analytical dependence is defined to calculate the recommended power ultrasonic vibrations, absorption of the test in fil'erah when making pasta. As a result of the effects of ultrasound on the dough considerably improves the quality of finished products and increased mass flow test in the process of pressing the macaroni.*

**Key words:** compaction, swelling, pasta dough, ultrasonic vibrations.

---

Известно большое количество исследовательских работ, связанных с влиянием вибраций и ультразвука в пищевой промышленности на скорость технологических процессов и качество продукции [1-3]. Имеются работы по обоснованию эффективности прессования макаронных изделий в поле ультразвука [4]. В практике выработки макарон явление разбухания прессуемого через матрицу макаронного теста хорошо известно, как и влия-

ние его на размерные и прочностные параметры высококачественных изделий. Разбухание теста на выходе из фильер матрицы происходит прежде всего из-за перестройки профиля скоростей с параболического на стержнеобразный. Это приводит к локальным растяжениям и сжатиям теста и, следовательно, искажению его поперечного сечения. Кроме того, происходит релаксация обратимых деформаций, накопленных материалом при течении и связанных с проявлением вязкоупругости. Эти накопленные деформации вызваны действием напряжений сдвига [5,6,8,9].

В ряде работ по переработке пластических масс и органических волокнистых материалов дана количественная оценка этого процесса [10-11,12]. Использование упрощенных моделей дает, как правило, приблизительное решение, недостаточно адекватное экспериментальным данным, а более сложные модели достаточно громоздки при практическом применении [12]. В указанных моделях не рассматривается одна из важнейших эксплуатационных и технологических характеристик – «разбухание» выпрессованных изделий сложного профиля, получаемых в условиях воздействия ультразвуковых колебаний. Обычно, описание явления «разбухания» ограничивается, как правило, образцами в виде прутка круглого поперечного сечения или плоского листа, хотя макаронные изделия имеют значительно более развитые формы в сечении [13].

Поэтому интерес представляет математическая зависимость, позволяющая количественно определить эффект «разбухания» при прессовании макаронного теста через каналы любого сложного сечения при использовании интенсивных ультразвуковых вибраций.

На величину «разбухания» макаронного теста оказывают влияние, в первую очередь, молекулярные характеристики и физические свойства материала, технологические условия переработки (температура, скорость, напряжение сдвига), а также геометрические размеры формующих фильер матрицы. Так явление повышения вязкости теста характерно только для малых скоростей сдвига [10]. При повышенных скоростях деформации, например, во время прессования под действием высокочастотного знакопеременного давления ультразвука в фильерах матрицы происходит разрыв связей между молекулами компонентов теста. Молекулярно-кинетические явления, наблюдающиеся при деформации без ультразвука, переходят в возбужденное состояние и в тесте начинается «лавинообразный» процесс нарушения и перестройки связей между молекулами компонентов теста. В частности, с увеличением скорости деформации (частоты ультразвука) происходит разрыв связей с большей скоростью, что подтверждает уменьшение значений эффективной вязкости [7-8].

При моделировании эффекта «разбухания» теста, будем считать, что при течении его через канал длинномерные цепи белков и крахмала подвергаются сдвиговой деформации, удлиняются, а после выхода из канала фильеры за счет релаксации несколько сокращаются и расширяются, при этом растяжение и сокращение частиц носит частично упругий характер.

Таким образом, в выражении (1), описывающим математически коэффициент «раз-

бухания»  $K$ , обязательно следует учитывать длину канала  $L$  и его площадь  $S$ , [11]. Помимо этих величин существенно влияют давление  $P$  при прессовании макаронного теста, эффективная вязкость  $\eta_{эф}$ , градиент скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  и параметр  $\theta$ , учитывающий эластичные свойства макаронного теста,

$$K = A \cdot \dot{\gamma}^{n_1} \cdot \theta^{n_2} \cdot P^{n_3} \cdot \eta_{эф}^{n_4} \cdot L^{n_5} \cdot S_K^{n_6}, \quad (1)$$

где  $A$  - безразмерный коэффициент, учитывающий природу макаронного теста,  $n_1 - n_6$  - показатели степеней.

Использование  $\pi$  - теоремы [6] позволило получить зависимость для определения коэффициента «разбухания» тестовых прядей при выходе из каналов фильер пресса.

$$K = A \cdot (\dot{\gamma} \cdot \theta)^{n_1} \cdot \left( \frac{\eta_{эф}}{P \cdot \theta} \right)^{n_2} \cdot \left( \frac{L}{\sqrt{S_K}} \right)^{n_3} \quad (2)$$

Показатели степеней  $n_1 - n_6$ , как и постоянная  $A$  определяются экспериментально (табл. 1). Для фильер сложной формы необходимо в выражение (2) ввести коэффициенты формы канала  $a$  и  $b$ , также определяемые экспериментально [6,14].

$$K = A \cdot a^{m_1} \cdot b^{m_2} \cdot (\dot{\gamma} \cdot \theta)^{n_1} \cdot \left( \frac{\eta_{эф}}{P \cdot \theta} \right)^{n_2} \cdot \left( \frac{L}{\sqrt{S_K}} \right)^{n_3} \quad (3)$$

где  $m_1, m_2$  - показатели степеней (таблица 1).

Взаимодействие ультразвука на выпрессовываемые пряди макаронных изделий сопровождается существенным снижением коэффициента «разбухания». В первую очередь за счет снижения эффективной вязкости теста с  $\eta_{эф}$  до некоторого значения, зависящего от частоты ультразвука  $\eta_f$ , определяемого из уравнения [5].

$$\eta_\omega = \frac{\eta_{эф}}{1 + f^2 \cdot r^2} \quad (4)$$

где  $f$  - угловая частота ультразвуковых колебаний,  $c^{-1}$ ;

$r$  - время релаксации, характеризующее скорость падения напряжения, с.

$$r = \frac{\eta_{эф}}{E} \quad (5)$$

где  $E$  - модуль упругости макаронного теста, Па.

Таблица 1.

**Значения экспериментальных физических величин и постоянных коэффициентов для теста на пределе денатурации белка и клейстеризации крахмала.**

Параметры	Температура в фильтре, К	$\dot{\gamma}$ , 1/с	$\theta$ , с	$\eta_f$ , Па·с	$n_1$	$n_2$	$n_3$	A	$m_1$	$m_2$
Макаронное тесто	323	3,40	0,1	1280	0,090	-0,012	-0,14	2,3	-0,018	-0,015
Тесто из муки пшеничной хлебопекарной высшего сорта	338	3,41	0,1	800	0,090	-0,012	-0,14	2,3	-0,018	-0,015

Вводим в уравнение (3) вместо  $\eta_{эф}$  параметр  $\eta_f$ , характеризующий влияние ультразвука на степень «разбухания» макаронного теста.

$$K = A \cdot a^{m_1} \cdot b^{m_2} \cdot (\dot{\gamma} \cdot \theta)^{n_1} \cdot \left( \frac{\eta_f}{P \cdot \theta} \right)^{n_2} \cdot \left( \frac{L}{\sqrt{S_K}} \right)^{n_3} \quad (6)$$

Таким образом, уравнение (6) представляет математическую модель, учитывающую не только влияние наложения ультразвуковых колебаний на «разбухание» при прессовании макаронного теста, но и размерные показатели фильтров сложной формы.

Проведенные экспериментальные исследования по оценке коэффициента «разбухания» в зависимости от геометрии фильтров, параметров процесса прессования, физических свойств используемого типа теста, а также от характеристик ультразвуковых колебаний в целом подтвердили адекватность теоретических исследований.

Для проведения экспериментов использовалась лабораторная установка [4], включающая в себя шнековый пресс с загрузочным бункером. Для создания ультразвуковых колебаний к матрице пресса хомутом из нержавеющей стали был присоединен пьезоэлектрический преобразователь, связанный с генератором ультразвуковых колебаний. Изменение подводимых характеристик ультразвука производилось на самом генераторе. Экспериментальные данные снимались для макаронных изделий из муки хлебопекарной пшеничной высшего сорта в интервале температур 323 - 338 К, давлении прессования до 4 МПа и амплитуде ультразвука 30, 40 и 50 мкм. Диапазон температур прессования принят из соображений минимального изменения белков и углеводов макаронного теста.

Анализом экспериментальных и расчетных значений коэффициента «разбухания» K выявлены следующие особенности:

1) для макаронного теста, подвергнутого исследованиям, характерно уменьшение коэффициента «разбухания» с ростом длины канала (на специально изготовленной утолщенной матрице с 7мм до 12мм.). Это является существенным фактором при конструировании формующего канала;

2) снижение коэффициента «разбухания» макаронного теста при воздействии ультразвука на 15-18% наблюдалось для всех исследуемых форм каналов в фильерах. Расхождение между расчётными и экспериментальными данными составляет порядка 12%;

3) амплитуда ультразвуковых колебаний влияет на производительность матрицы и массовый расход макаронного теста. При этом наилучшие результаты (рост производительности пресса на 20%) получены при амплитуде ультразвука 30мкм;

4) наибольшее положительное воздействие ультразвука обнаружено для каналов фильер сложной формы (звездочка). Видимо в этих каналах имеется больше застойных зон, но при воздействии ультразвука прилипание и задиры (так называемый эффект «акульей кожи» - разрывы и трещины) теста при выходе из матрицы существенно уменьшаются;

5) ультразвук, увеличивая температуру прессования, по известным законам [18] повышает и производительность пресса. При этом коэффициент «разбухания» также растёт, видимо, за счет малого времени нахождения теста в фильерах.

Таким образом, полученные результаты по оценке коэффициента «разбухания»  $K$ , могут быть использованы при расчете фильер матриц с учетом влияния ультразвуковых воздействий на размерные параметры высококачественных макаронных изделий.

### Список литературы

1. *Иванова М.А.* Воздействие ультразвука на выпечку мелкоштучных хлебобулочных изделий. //Иванова М.А., Антуфьев В.Т. //Журнал Хлебопродукты. 2011-№5 С.50-51
2. *Антуфьев В.Т., Иванова М.А.* Влияние ультразвука на показатели готового мелкоштучного хлебобулочного изделия // Процессы и аппараты пищевых производств. 2011. № 2.
3. *Арет В.А., Иминов Р.В., Антуфьев В.Т., Громцев С.А.* Исследование ресурсосберегающего процесса нарезки хлеба // Процессы и аппараты пищевых производств. 2012. № 1. С. 60-67.
4. *Кобыда Е.В., Антуфьев В.Т., Верболоз Е.И.* Обоснование эффективности прессования макаронных изделий в поле ультразвука // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств» - 2013.- № 2.
5. *Киселева О.Ф., Панов А.К.* Особенности проектирования формующего инструмента для изготовления полимерных изделий сложного профиля с использованием ультразвука//Сборник тр. респ. науч.-техн. конф. Уфа: «Гилем», 2001. С. 172-175.
6. *Панов А.К., Анасов А.Р.* Гидродинамика потоков аномально-вязких полимерных

систем в формующих каналах. Уфа: изд-во Уфим. нефт. ин-т, 1994. 260 с.

7. *Титунин А.А.* Научные основы получения конкурентоспособных строительных материалов из низкосортной древесины и древесных отходов: дис. ... докт. техн. наук / А.А. Титунин. – Иваново: ИГАСУ, 2012. – 385 с.

8. *Азаров Б. М., Арет В. А.* Инженерная реология пищевых производств. — М.: МТИПП, 1978. —112 с.

9. *Арет В.А., Николаев Б.Л., Забровский Г.П., Николаев Л.К.* Реологические основы расчета оборудования производства жиросодержащих пищевых продуктов. Учебное пособие. - 2-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург, СПбГУНиПТ, 2006. - 435 с.

10. *Арет В.А., Николаев Б.Л., Николаев Л.К.* Физико-механические свойства сырья и готовой продукции. Учебное пособие. СПбГУНиПТ, ГИОРД 2009, - 448 с.

11. *Абакачева Е.М., Шулаев Н.С., Фахразов А.Р.* Исследование разбухания полимерных материалов в условиях воздействия ультразвуковых колебаний в процессе вальцевания. // Нефтегазовое дело.2013. № 3. С. 291-296.

12. *Бердышев Б.В., Дергачев М. В., Мостов М.Б.* Установившиеся изотермические течения расплавов аномально-вязких полимеров в цилиндрических каналах с произвольной геометрией их поперечного сечения. // Пластические массы.2008. №3 С. 42-44.

13. ГОСТ Р 51865-2002 Изделия макаронные. Общие технические условия М.: ИПК Издательство стандартов, 2002.

14. *Косой, В.Д.* Инженерная реология биотехнологических сред [Текст] / В.Д. Косой, Я.И. Виноградов, А.Д. Малышев. - СПб.: ГИОРД, 2005. - 648 с.

15. РЖ 06.08-19А.20К Технология макаронных изделий. Общие вопросы химии. Физическая химия (Строение молекул). 2006. № 8.

16. Стабилизация реологических свойств макаронных изделий после сушки//Артемяева Е.В., Черных В.Я., Зиневский А.И. // Хлебопечение России. 2012. № 5. С. 28-29.

17. Производство макарон: проблемы и задачи // Ткачёв А.В. Хлебопродукты. 2012. № 10. С. 16-17

18. *Арет В.А., Щербаков А.С.* Изменение реологических свойств пшенично-кукурузного теста при различных скоростях сдвига и температуры продуктам // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 3.