

## **Применение реологии в разработке ресурсосберегающей технологии и оборудования для производства хлебобулочных и мучных кондитерских изделий**

Андреев А.Н. andreevanatoly@yandex.ru

Санкт-Петербургский государственный университет  
низкотемпературных и пищевых технологий

*Для разработки ресурсосберегающей технологии и оборудования для производства хлебобулочных и мучных кондитерских изделий необходима экономия материальных средств на всех этапах - при создании оборудования и производстве продукции. В решении этой проблемы большую роль играет реология, позволяющая создавать научно-обоснованные конструкции оборудования и рациональные технологии. В работе рассмотрены теоретические и практические вопросы, связанные с процессами механической обработки слоеного теста с учетом его реологических свойств.*

Ключевые слова: реология, ресурсосбережение, гидродинамическая теория течения, псевдопластические жидкости, энерго-силовые факторы процесса раскатки теста.

Одним из основных условий прироста национального дохода и продукции отраслей материального производства является необходимость рационального использования всех видов ресурсов. Затраты материальных средств для переработки продуктов питания характеризуются термином - ресурсоемкость продукции под которой понимают совокупность свойств продукции, характеризующих суммарные затраты ресурсов различного вида и назначения, применяемых для создания и использования изделия.

Для разработки ресурсосберегающей технологии и оборудования для производства хлебобулочных и мучных кондитерских изделий необходима экономия материальных средств на всех этапах - при создании оборудования (разработке, изготовлении, эксплуатации) и производстве продукции (потери сырья, полуфабрикатов, готовой продукции).

Основными задачами ресурсосбережения в производстве мучных изделий на стадиях разработки оборудования и технологии являются:

1. технологическая рациональность конструкции - совершенствование конструкции машины или аппарата на основе научно-обоснованного расчета процесса с учетом реологических свойств продукта и их изменений при обработке;
2. введение в конструкцию соответствующих расчетным нагрузкам экономических конфигураций и размеров рабочих органов и вспомогательных узлов;
3. снижение реального запаса прочности за счет приближения расчетных нагрузок (энерго-силовых параметров) к реальным;
4. повышение характеристик надежности;
5. снижение материалоемкости;
6. повышение удельной производительности машин;
7. разработка прогрессивной технологии; снижение потерь сырья, полуфабрикатов и готовой продукции;
8. снижение продолжительности процесса;
9. снижение трудозатрат;
10. выбор рациональных методов средств управления реологическими свойствами полуфабрикатов (теста, опары, закваски);
11. автоматизированный контроль сырья и полуфабрикатов; снижение трудозатрат;
12. улучшение санитарного состояния машин и аппаратов;
13. разработка комплексно-механизированной линии.

Реология и реологические методы получают широкое развитие при изучении структурно-механических свойств полуфабрикатов при их машинной обработке нагнетанием различными рабочими органами (шнеками, валками и др.), выпрессовыванием через отверстия матриц, штампованием для придания изделиям требуемой формы, смешением нескольких компонентов, резанием, дроблением и др [1-5].

Для создания нового эффективного оборудования и реализации на нем более совершенной технологии необходимо научное обоснование рабочих процессов, протекающих в машинах и аппаратах, в частности на стадиях разделки и формования тестовых заготовок. При проектировании валковых машин и шнековых прессов реологические характеристики учитываются недостаточно полно, что приводит к созданию (или использованию)

энергоемких конструкций, не обеспечивающих рациональные режимы их работы и заданное качество готовых изделий [6-8].

Практика эксплуатации и изучение работы валковых тестораскаточных и шнековых формующих машин показала, что при обработке тесто подвергается значительным механическим воздействиям, создаваемым рабочими органами, что ухудшает реологическое поведение и свойства тестовых заготовок, а в конечном итоге качество готовых изделий.

Недостаток данных о структурно-механических свойствах и реологическом поведении отдельных видов теста (слоеное, соломки и др.) при их течении в формующих каналах машин не позволяет научно - обоснованно рассчитать формующее оборудование и получать стабильное качество изделий.

Целью работы является разработка научно-обоснованных методик инженерного расчета процессов раскатки слоеного теста на валковой машине на базе реодинамики течения полуфабрикатов в зависимости от их реологических свойств, механических и технологических факторов.

В работе методами реологии установлена реологическая модель и изучены изменения реологических свойств пресного слоеного теста, на разных стадиях их приготовления, в зависимости от механических (давления, скорости формования на валковой машине) и технологических (рецептуры, температуры, влажности) факторов. Использовали методы ротационной вискозиметрии (прибор РВ-8 М.П. Воляровича), тангенциального смещения образца в плоско-параллельном зазоре (пластометр Б.А. Николаева) и пенетрации (конический пластометр «Лабор-365»).

В задачу исследования входило: выбор реологической модели, изучение влияние температуры, влажности, вида теста, сорта муки, механической обработки и продолжительности отлежки теста на реологические характеристики и определение оптимальных значений их, отвечающих хорошему качеству готовых изделий. Объектами исследования были: тесто после замеса, тесто слоеное на маргарине после I-ой, II-ой, III-ей и IV-ой раскаток, тесто слоеное без маргарина (после IV-ой раскатки) и тесто слоеное ложное.(тесто с маргарином, перемешанным равномерно по всей массе).

Кривые течения слоеного теста после замеса при различной влажности приведены на рис.1

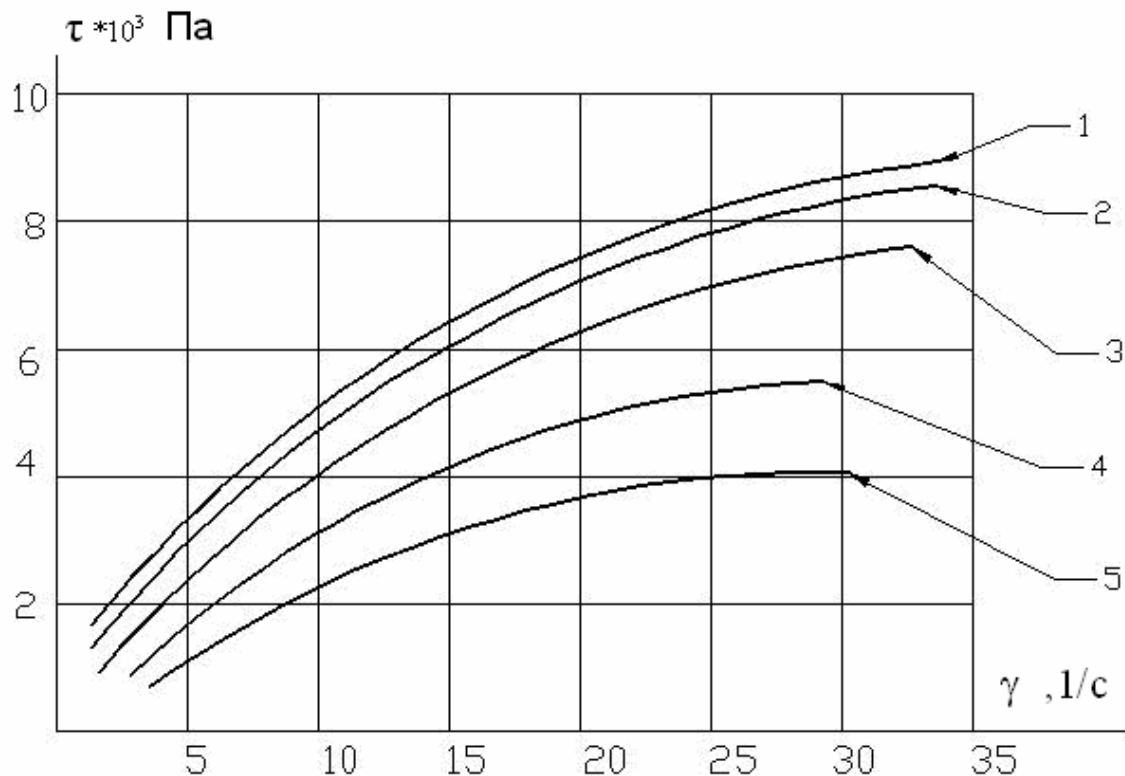


Рис. 1 Кривые течения теста после замеса при различной влажности:  
1 – 32,2%; 2 – 35%; 3- 36,4%; 4 – 38,3%; 5 – 40,3%.

Установлено, что слоеное тесто относится к неньютоновским псевдопластичным жидкостям и реологическая модель может быть описана степенным законом Оствальда де Вилье.

Реологические уравнения для исследуемых видов теста имеют вид:

- для теста после замеса:

$$\tau = 1,82 \cdot 10^3 * \dot{\gamma}^{0,3} \text{ Н/м}^2; \quad (1)$$

- для теста слоеного без маргарина:

$$\tau = 2,72 \cdot 10^3 * \dot{\gamma}^{0,36} \text{ Н/м}^2; \quad (2)$$

- для теста слоеного на маргарине:

$$\tau = 1,65 \cdot 10^3 * \dot{\gamma}^{0,26} \text{ Н/м}^2; \quad (3)$$

- для теста слоеного ложного:

$$\tau = 1,5 \cdot 10^3 * \dot{\gamma}^{0,24} \text{ Н/м}^2. \quad (4)$$

Влияние температуры на реологические константы теста  $\mu$  и  $m$  проводили в интервале температур от 16 до 20<sup>0</sup>С. Установлена применимость степенного закона при исследуемых температурах. Реологическая константа  $m$  остается постоянной, в тоже время константа  $\mu$  (следовательно вязкость) уменьшается,

что можно объяснить уменьшением внутримолекулярного и межмолекулярного взаимодействия частиц теста, а также размягчение и частичное разжижение жировой прослойки. Зависимость  $\mu = f(t)$  можно представить уравнением вида:

$$\mu = a - bt, \quad (5)$$

где  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты: для теста после замеса  $a = 5730$  н/м<sup>2</sup>,  $b = 208$  н/м<sup>2</sup>град.; для теста слоеного без маргарина  $a = 7830$  н/м<sup>2</sup>,  $b = 286$ .

Уравнения степенного закона с учетом температуры слоеного теста могут быть представлены в виде:

$$\tau = (a - b \cdot t) \cdot \gamma^m, \text{ Н/м}^2 \quad (6)$$

$$\eta = (a - b \cdot t) \cdot \gamma^{m-1}, \text{ Н*с/м}^2 \quad (7)$$

где  $t$  - температура;  $m$  – показатель степени, указывающий степень отклонения от ньютоновской жидкости;  $a$ ,  $b$  - коэффициенты

На основании выбора реологической модели, для описания процесса раскатки теста в зазоре между валками использовали гидродинамическую теорию каландрования псевдопластичной жидкости, которая позволяет установить количественные зависимости между геометрическими характеристиками рабочего пространства (зазора), свойствами материала и режимом обработки. Большое развитие эта теория получила в области переработки пластических масс, благодаря исследованиям Р.В. Торнера, Н.В. Тябина, В.Н. Красовского, Р.Г. Мирзоева, В.В. Богданова, В.А. Немыткова, Н.Г. Бекина, Д.М. Мак-Келви, У.Л. Уилкинсона и др.

Общая задача гидродинамики вязкой несжимаемой жидкости сводится к решению системы дифференциальных уравнений, в которую входят: уравнение неразрывности, уравнение движения, уравнение энергии, реологическое уравнение.

В работе [7-8]. рассмотрена задача о деформировании материалов, подчиняющихся степенному закону 1.3. между валками радиуса  $R$ , длиной  $L$ , вращающихся с одинаковой угловой скоростью  $\omega$ , (рис 2.1)

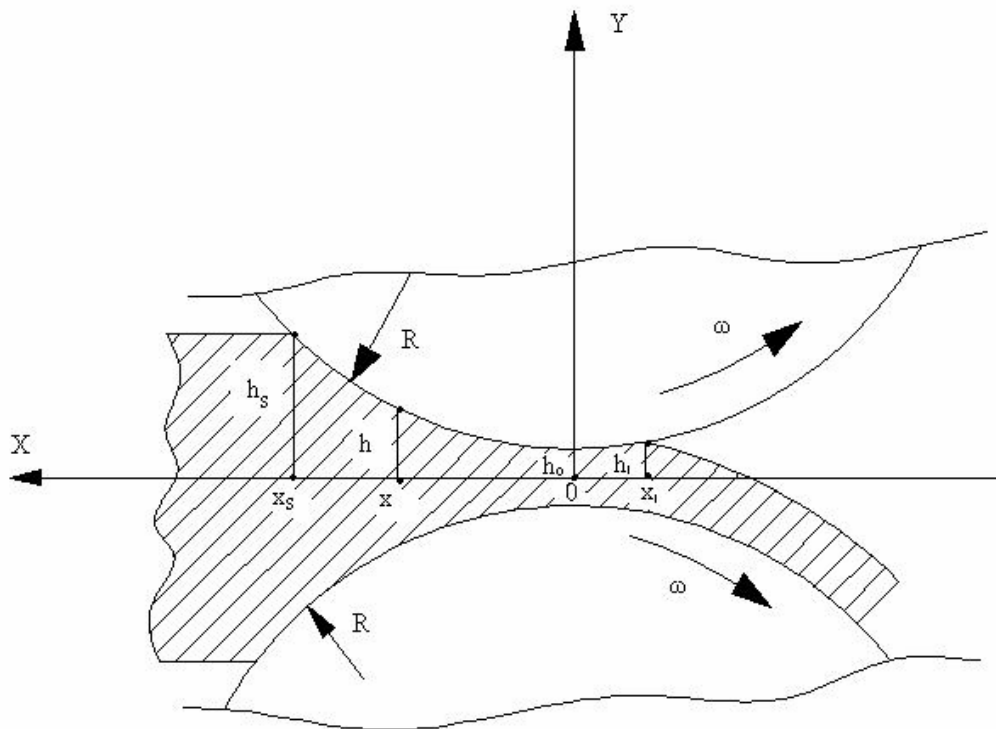


Рис. 1. Схема раскатки теста.

Условные обозначения:

$\mu$  и  $m$  – реологические константы материала;

$\omega$  – угловая скорость валков;

$R$  – радиус валка;

$h_1, h$  – половина зазора на выходе материала и переменного зазора;

$x_1, x$  – соответствующие абсциссы;

$x_s$  – абсцисса, характеризующая количество загруженного материала;

$L$  – рабочая длина валка.

$h_s$  – толщина пласта

$\Delta h$  – относительно обжатия теста в зазоре валков

$P_{\max}$  – давление теста на валок

$P$  – распорное усилия между валками

$M$  – крутящего момента

$N_{\text{пол}}$  – полезная мощности

$h_0$ , зазор между валками ,

$\Delta h$  – величина относительного обжатия теста между валками

Выражение для давления материала на валок:

$$P_{\max} = \mu * \left(\frac{2m+1}{m}\right)^m * \omega^m * R^m * \int_{-X_1}^{-X_1} \frac{(h_1 - h) * |h_1 - h|^{m-1}}{h^{2m+1}} dx \quad \text{Н/М}^2 \quad (8)$$

Выражение для распорного усилия:

$$P = \mu * \left(\frac{2m+1}{m}\right)^m * \omega^m * R^m * \int_{-X_1}^{X_s} \int_{-X_1}^{+X} \frac{(h_1 - h) * |h_1 - h|^{m-1}}{h^{2m+1}} dx * dx \quad \text{Н} \quad (9)$$

Суммарный полезный момент сопротивления:

$$M_{\text{пол}} = \mu * \left(\frac{2m+1}{m}\right)^m * \omega^m * R^m * L * \int_{-X_1}^{X_s} \frac{(h_1 - h) * |h_1 - h|^{m-1}}{h^{2m+1}} dx \quad , \text{Н} * \text{М} \quad (10)$$

Полезная мощность:

$$N_{\text{пол}} = M_{\text{пол}} * \omega \quad , \text{Вт} \quad (11)$$

Для расчета была составлена программа численного метода решения энергосиловых параметров с помощью ЭВМ и с учетом данных реологических исследований и режимов обработки слоеного теста, имеющие место в производственных условиях построены зависимости их от механических и технологических факторов.

В связи с тем, что процесс раскатки теста на валковых машинах обладает рядом особенностей, обусловленных как конструктивным исполнением рабочих органов, режимом обработки, так и свойствами теста проведена проверка используемых теоретических зависимостей на адекватность реальному процессу.

Для экспериментального определения энергосиловых параметров процесса раскатки слоеного теста создана экспериментальная установка на базе тестораскаточной машины модели МРТ-60М. Силовые параметры процесса  $P_{\max}$ ,  $P$  и  $M$  измеряли с помощью специально разработанных устройств с тензометрическими датчиками (рис.2).

В задачу исследования входило определение давления теста на валок  $P_{\max}$ , распорного усилия между валками  $P$ , крутящего момента  $M$  и полезной мощности  $N_{\text{пол}}$  в зависимости от следующих факторов: угловой скорости валков  $\omega$ , зазора между валками  $H_0$ , рабочей длины валков  $L$ , величины относительного обжатия теста между валками  $\Delta h$ , вида теста - слоеного на маргарине (сокр.СМ) и без маргарина (сокр.СБМ), температуры теста  $t$ , реологических характеристик теста  $\mu$  и  $m$ .

Установлено, что с уменьшением зазора  $H_0$  от  $20 * 10^{-3}$  до  $3 * 10^{-3}$  м распорное усилие  $P$  увеличивается: для слоеного теста на маргарине в 2 раза (от

6,8\*10<sup>2</sup> до 3,4\*10<sup>2</sup> н/м), а без маргарина в 1,8 раза (от 7\*10<sup>2</sup> до 12,6\*10<sup>2</sup> н/м)., что является следствием увеличения градиента скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  при уменьшении зазора  $H_0$  и ростом величины напряжения сдвига. Значение  $P$  для теста (СМ) меньше, чем (СБМ) (примерно в 1,8 раза), что связано с наличием жировой прослойки, снижающую вязкость теста, что можно судить по величине константы  $\mu$ , (ранее установлено для теста слоеного на маргарине  $\mu = 1,65 \cdot 10^3$  н.с/м<sup>2</sup>, а без маргарина  $\mu = 2,72 \cdot 10^3$  н.с/м<sup>2</sup>).

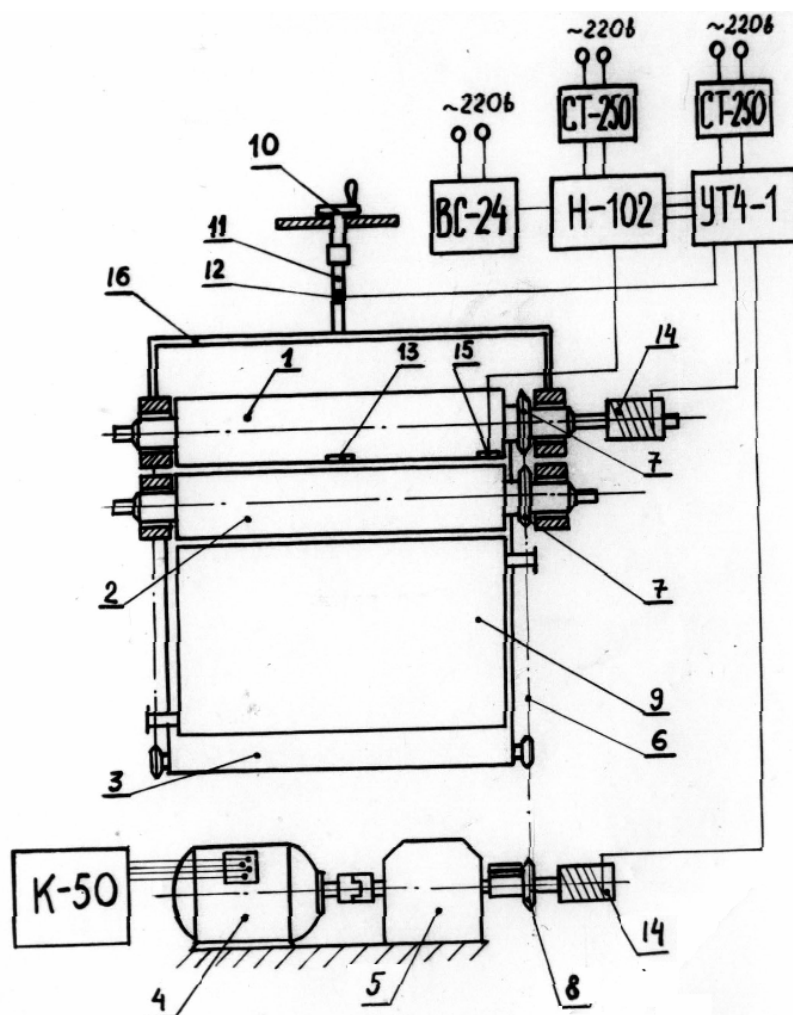


Рис. 2. Экспериментальная установка для исследования энерго-силовых параметров процесса раскатки слоеного теста: 1,2-валки, 3 – транспортер, 4 –электродвигатель, 5 –редуктор, 6-цепь, 7,8- звездочка, 9 – стол, 10-маховик, 11- тяга, 12- тензодатчик, 13,14,15- измерительная аппаратура, 16- рычаг

Анализ зависимости  $P$  от  $H_0$  позволил представить ее в виде уравнения:

$$P = \frac{a}{H_0^m}, \quad (12)$$

где  $a$  – коэффициент, зависящий от вида теста;  $m$  – индекс течения теста; для теста СМ  $m_1 = 0,26$ ,  $a_1 = 91,3$ , для теста СБМ без  $m_2 = 0,36$ ,  $a_2 = 169,2$ .



С повышением температуры теста значения силовых параметров снижаются: для теста СМ величина  $P$  уменьшается в 1,7 раза (от  $6,0 \cdot 10^2$  до  $3,4 \cdot 10^2$  н/м);  $P_{\max}$  в 1,5 раза (от  $0,18 \cdot 10^5$  до  $0,12 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>), что можно объяснить уменьшением реологической константы  $\mu$ . Величина «индекса течения»  $m$  в этом диапазоне температур практически не изменяется.

С увеличением угловой скорости валков  $\omega$  увеличивается скорость сдвига и напряжение сдвига  $\tau$ , что приводит к росту величин удельного давления  $P_{\max}$ , распорного усилия  $P$  и полезной мощности  $N_{\text{пол}}$ . Эти зависимости могут быть описаны следующими степенными уравнениями:

$$P = C_1 \cdot \omega^m, \quad (13)$$

$$P_{\max} = C_2 \cdot \omega^m, \quad (14)$$

$$N_{\text{пол}} = C_3 \cdot \omega^m, \quad (15)$$

где  $C_1, C_2, C_3$  – эмпирические коэффициенты: для теста слоеного на маргарине  $C_1=0,143, C_2=40,1, C_3=70,3$ ; теста слоеного без маргарина  $C_1=0,202, C_2=66,0, C_3=101,7$ .

С увеличением толщины пласта (величины относительно обжатия  $\Delta h$ ) имеет место увеличение  $P$  и  $N_{\text{пол}}$ , причем  $N_{\text{пол}}$  возрастает значительно резче, чем  $P$ , что можно объяснить дополнительным расходом мощности на преодоление сил вязкого трения в процессе раскатки (рис. 3).

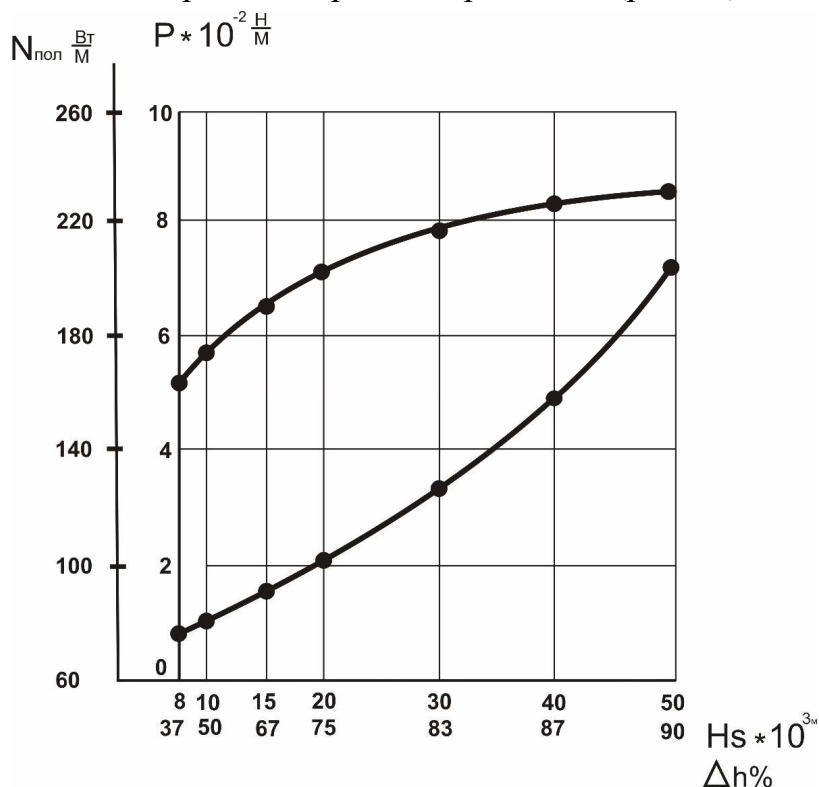


Рис. 3. Влияние толщины пласта  $H_s$  и относительно обжатия  $\Delta h$  на величину распорного усилия  $P$  и полезную мощность  $N_{\text{пол}}$ .

Зависимости  $P = f(\Delta h)$  и  $N_{\text{пол.}} = f(\Delta h)$  могут быть описаны следующими уравнениями:

$$P = 5,138 - 0,025 * \Delta h + 0,0006 * \Delta h^2, \quad (16)$$

$$N_{\text{пол.}} = 280,426 - 8,213 * \Delta h + 0,079 * \Delta h^2, \quad (17)$$

Проверка адекватности уравнений 6, 7, 8 реальному процессу показало, что расхождения между величинами  $P$  и  $P_{\text{max}}$ , рассчитанных по уравнениям 2.11 и 2.12 от экспериментальных значений составляет 15 %, а величинами  $N_{\text{пол.}}$ , рассчитанных по уравнению 10, составляет 18 %. Величина критерия  $Q_{\text{ад.}}$  для  $P_{\text{max}}$  составляет 0,24, для  $P$  – 0,53, для  $N_{\text{пол.}}$  – 0,83.

Предложена методика расчета энергосиловых параметров процесса раскатки теста. Данные охватывают большой диапазон типов размеров валковых машин, применяемых на предприятиях, а также учитывают различные режимы обработки и реологические свойства теста.. Для упрощения расчета, в результате вычислений, проделанных на электронно-вычислительной машине «Проминь М», были составлены таблицы пользуясь которыми можно достаточно легко произвести инженерный расчет энергосиловых параметров процесса раскатки теста на машине.

## Список литературы

1. Андреев А.Н. Роль реометрии в оценке качества зернопродуктов. [Текст] / А.Н. Андреев // III международный конгресс Зерно и хлеб России. СПб. 2007. С. 125-126.
2. Арет В.А., Андреев А.Н., Николаев Б.Л., Верболоз Е.И., Николаев Л.К. Реологические исследования процессов производства жиросодержащих молочных продуктов и хлебобулочных изделий. Управление реологическими свойствами пищевых продуктов. [Текст] / В.А. Арет В, А.Н. Андреев, Б.Л. Николаев, Е.И. Верболоз, Л.К. Николаев // Сб. материалов первой научно-практической конференции и выставки с международным участием – М.: МГУПП, 2008. – С.6-10.
3. Андреев А.Н., Арет В.А., Алексеев Г.В. Технологическое оборудование для получения зернопродуктов с повышенными структурно-механическими свойствами. [Текст] / А.Н. Андреев, В.А. Арет, Г.В. Алексеев // III международный конгресс. Зерно и хлеб России. СПб. 2007. С. 122-123.
4. Андреев А.Н. Использование реологических методов для оценки качества зернопродуктов. [Текст] / А.Н. Андреев // Международный конгресс. Зерно и хлеб России. СПб. 2006г. С. 104-105

5. Мачихин Ю.А., Мачихин С.А. Инженерная реология пищевых материалов. - М.: «Легкая и пищевая промышленность», - 1981. - 216 с.
6. Андреев А.Н. Влияние конструкции матрицы шнекового пресса на упруго-эластичное восстановление тестового жгута при формовании соломки. [Текст] / А.Н. Андреев // Партнер. Кондитер, Хлебопек. 14 (2)/08. С.38-41.
7. Андреев А.Н., Китиссу Поль. Реоферментографические и альвеографические исследования в технологии производства хлебобулочных изделий из замороженного теста. [Текст] / А.Н. Андреев, Поль Китиссу // III международный конгресс Зерно и хлеб России. СПб. 2008. С. 101-102.
8. Андреев А.Н. Влияние режима обварки на качество соломки. [Текст] / А.Н. Андреев // Партнер. Кондитер, Хлебопек. 13 (1)/08. С.30-32.
9. Мирзоев Р.Г., Касовский В.Н. Современные теории каландрирования полимерных материалов. [Текст] / Р.Г. Мирзоев, В.Н. Красовский. // Машины и технология переработки полимеров. Материалы к конференции. - Л.: ЛТИ им. Ленсовета. - 1967. - С. 111-24..
10. Розе Н.В., Красовский В.Н., Мирзоев Р.Г. Теория процессов каландрирования полимерных материалов, подчиняющихся степенному закону течения. [Текст] / Н.В. Розе., В.Н. Красовский., Р.Г. Мирзоев. // Машины и технология переработки полимеров. Материалы к конференции. - Л.: ЛТИ им. Ленсовета. - 1967. - С. 25-35.

# **Rheology applied to develop resource-saving technology and equipment for making bakery and pastry products**

Andreyev A.N. andreevanatoly@yandex.ru

Saint-Petersburg State University of Refrigeration  
and Food Engineering

*Resource-saving technology and equipment to manufacture bakery and pastry foods imply economizing material resources at every stage of production: when creating equipment and producing produce. To solve the problem rheology should be made use of, as it allows creating scientifically grounded equipment designs and rational technologies. The paper dwells on theoretical and practical issues connected with mechanical treatment of puff pastry, its rheological properties being taken into consideration.*

**Keywords:** Rheology, resource-saving, hydraulic theory of flow, pseudoplastic fluids, apparently viscous fluids, energy power factors of rolling.