

УДК 65.33

## О потери устойчивости потока разно зернового теста

*Д-р техн. наук* Арет В. А. [valdurtera@rambler.ru](mailto:valdurtera@rambler.ru)

Щербаков А. С. [alex.scherba@mail.ru](mailto:alex.scherba@mail.ru)

Байченко Л.А.

*Санкт – Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО*

*Институт холода и биотехнологий*

*191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

*Одним из факторов, ограничивающих предельные скорости экструзии вязкоупругого теста из разнозерновой муки является потеря устойчивости потока. Во многих теоретических задачах механики проблема потери устойчивости равновесия математически решается точно с помощью критерия Лагранжа-Дирихле или теории Ляпунова, однако более сложные вязкоупругие материалы требуют экспериментальных реодинамических исследований.*

**Ключевые слова:** реология, тесто, потеря устойчивости.

---

## About the loss of stability of the various grain dough flow

*D.Sc.* Aret V. A., Scherbakov A. S., Baychenko L.A.

*Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics.*

*Institute of Refrigeration and Biotechnology*

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

*One of the factors limiting the speed of the extrusion of a viscoelastic flour dough is a loss of stability of the flow. In many theoretical problems of the mechanics the problem of stability loss of equilibrium mathematically solved exactly by using the criterion of the Lagrange - Dirichlet or Lyapunov's theory, but more complex viscoelastic materials require experimental rheodynamical studies.*

**Keywords:** rheology, the dough, the loss of stability.

---

В пищевой промышленности распространены процессы экструзии. Предельная устойчивость потока и максимальная производительность выдавливания качественных

изделий лимитируется переходом ламинарного потока в турбулентный. Вообще теория устойчивости находит отражение в работах выдающихся механиков, начиная с теоремы Лагранжа-Дирихле об устойчивости консервативной механической системы и устойчивости по Ляпунову, работ Ландау Л.Д. и Лифшица Е.М. [1], Колмогорова А.Н. с учениками [2,3], заканчивая современными исследованиями Климонтовича Ю.Л. [4], Фейгенбаума М. [5] и многих других исследователей. Особый круг проблем возникает в вопросах переработки высокополимеров, как показали, в частности, работы Рейнера М. [6], Метцнера А. и Рида Дж. [7], Леонова А.И. и Прокунина А.Н. [8].

Качественно на возбуждение турбулентности влияют увеличение скорости потока, уменьшение вязкости, увеличение плотности и температуры, характер нагрузки, (например, хаотичность или ударность внешних сил), особые свойства границы потока, вдув газа в поток жидкости (работы профессора Тишина В.Б. с учениками [9]), химические и биохимические реакции в потоке. Очевидна сложность процесса перехода ламинарного режима в турбулентный, тем более таких реологически сложных пищевых биополимеров как мучное тесто. Это обуславливает широкое использование в этой области механики именно экспериментальных исследований, теории подобия и анализа размерности.

Количественно для многих инженерных расчетов при течении воды, молока и других ньютоновских жидкостей достаточно точные результаты дает критерий Рейнольдса, величина которого при потери устойчивости потока равняется примерно 2300. Эксперименты показывают, что зона перехода ламинарного потока в турбулентный в окрестностях этого значения критерия Рейнольдса имеет очевидно вероятностную природу и приводит к использованию методов стохастической механики.

В нашей работе экспериментально [10,11] было показано, что течение мучного теста можно описать сравнительно простым уравнением степенной жидкости, содержащим две реологические константы – индекс течения и коэффициент консистенции:

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

Многие пищевые среды подчиняются уравнению Шведова –Бингама:

$$\tau = \tau_0 + \mu_{nl}\dot{\gamma} \quad (2)$$

Формулу расхода среды при ламинарном течении в горизонтальной трубе в общем виде дает выражение вида:

$$Q = - \frac{\pi R^3}{\tau_w} \int_0^{\tau_w} \tau^2 \dot{\gamma}(\tau) d\tau \quad (3)$$

Тогда для ньютоновской и названных неньютоновских сред (формулы (1) и (2)) получим следующие формулы расхода :

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8L\mu}; Q = \frac{n\pi R^{\frac{3n+1}{n}}}{3n+1} \left( \frac{\Delta p}{2Lk} \right)^{\frac{1}{n}}; \quad (4)$$

$$Q = \frac{\pi R^4}{8L\mu_{nl}} \left[ \Delta p - \frac{4}{3} \left( \frac{\tau_0 2L}{R} \right) + \frac{1}{3(\Delta p)^3} \left( \frac{\tau_0 2L}{R} \right)^4 \right]$$

Сопоставив формулы (4) с формулой Дарси-Вейсбаха и игнорируя слагаемое

$\frac{1}{3(\Delta p)^3} \left( \frac{\tau_0 2L}{R} \right)^4$  в силу малости, можно получить три выражения для критериев

Рейнольдса [12] :

1. Ньютоновской жидкости

$$Re_1 = \frac{v^2 d \rho}{\mu}; \quad (5)$$

2. Степенной жидкости

$$Re_2 = \frac{64n^n v^{2-n} d^n \rho}{(3n+1)^n 2^{n+3} k}; \quad (6)$$

3. Среды Шведова-Бингама

$$Re_3 = \frac{6v^2 d \rho}{\mu(6 + Sen)}, \quad (7)$$

где  $Sen$  — критерий Сен-Венана

$$Sen = \frac{\tau_0 d}{\mu_{nl} v} \quad (8)$$

Опыты проводили на установке конструкции Щербакова А.С. (рис.1)

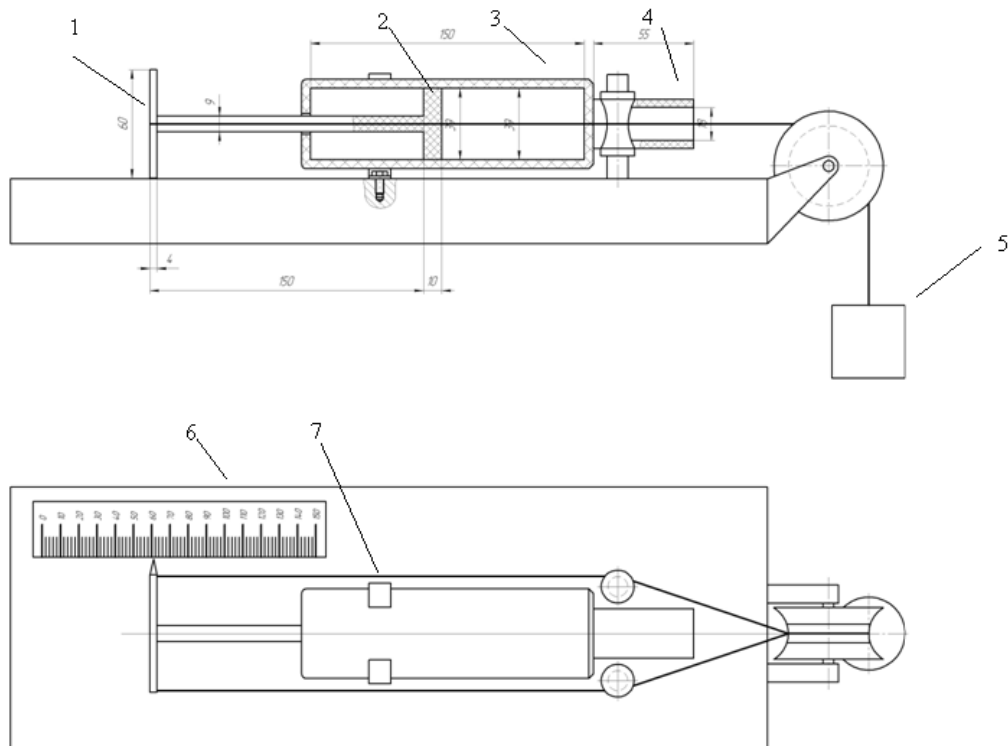


Рис. 1 Схема установки для исследования турбулентности степенной жидкости.

В рабочем цилиндре 3 диаметром 39 мм и длиной 150 мм находится поршень 1 того же диаметра. Шток поршня 2, соответственно, имеет длину 150 мм и диаметр 39 мм. Объем цилиндра 150 мл. С одной стороны в цилиндре имеется отверстие для трубки 4, которая герметично запаена с цилиндром. Количество заменяемых цилиндров на стенде равно четырем, с выходящими трубками различного диаметра и длины. Длина герметично запаенной трубки 50 мм. Внутренние диаметры трубок 8 и 12 мм. Длину хода поршня можно контролировать с помощью линейки 6, а изменение объема продукта в цилиндре - по нанесенной шкале на корпусе цилиндра. Цилиндр закреплен с помощью специального крепления 7. Ход поршня обеспечивается за счет приложенного на него давления  $P$ , которое вызвано весом установленного груза. Конструкция создана с учетом

цели исследования - моделирование предельно интенсивного процесса экструзии, что важно в практическом отношении

Момент перехода ламинарного потока в турбулентный фиксировался видеосъемкой по началу образования явления разбиения потока и появления пульсаций. Критерий  $Re_2$  при этом достигал  $2100 \pm 50$ . Исследования необходимо продолжить, поскольку недостаточно выяснена в данных опытах роль местных потерь давления в процессе возбуждения турбулентности в потоке степенной жидкости.

Обозначения:

$\tau$  - напряжение сдвига;  $\dot{\gamma}$  - скорость сдвига;  $k, n$  - коэффициент консистенции и индекс течения;  $\tau_0$  - предельное напряжение сдвига;  $\mu_{пл}$  - коэффициент пластической вязкости;  $Q$  - объемный расход;  $R$  - радиус трубы;  $\tau_w$  - напряжение сдвига на стенке трубы;  $\Delta p$  - перепад давлений;  $Re_1, Re_2, Re_3$  - критерии Рейнольдса, соответственно, для ньютоновской жидкости, степенной жидкости и среды Шведова-Бингама;  $V$  - средняя скорость течения;  $Sen$  - критерий Сен-Венана.

Список литературы:

1. Ландау Л.Д., Лифшиц В.М. Гидродинамика. - М.: Наука, 1988.- 733 с.
2. Колмогоров А.Н. Уточнение представлений о локальной структуре турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при больших числах Рейнольдса // *Mechanique de la turbulence: Colloq.Intern CNRS, Marseille, 1962*, p. 447-458
3. Монин А.С, Яглом А.М. Статистическая гидромеханика, т.1. СПб.:Гидрометеиздат, 1990- с.694; т.2, СПб, 1996.-742 с.
4. Климонтович Ю.Л. Статистическая теория открытых систем, М.:Тоо Янус, 1995.- 624 с.
5. Фейгенбаум М. Успехи Физических наук, 1983,т. 141. с. 343. [перевод Los Alamos Science,1980,v.1, p. 4]
6. Reiner M. Selected papers on rheology, , Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 1975, 463 pp.
7. Metzner A.B. Reed J.C. A. I. Ch. Journ., 1, 434, 1955/
8. Leonov A.I., Prokunin A.N. Non-linear Phenomena in Flows of Viscoelastic Polymer Fluids, Chapman and Hall, London, 1994, 475 pp.

9. Тишин В.Б. и др. Тепло-и массообмен между клеткой и культуральной средой при аэробном культивировании хлебопекарных дрожжей/ В.Б. Тишин, В.Г. Оганнисян, А.В. Леонов// Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств», 2012. - №2. [Электронный ресурс]: <http://www.processes.ihbt.ifmo.ru>

10. Щербаков А.С. Вискозиметрия пшеничного теста. / А.С. Щербаков // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств», 2012. - №2. [Электронный ресурс]: <http://www.processes.ihbt.ifmo.ru>

11. Арет В.А. и др. Использование результатов ротационной вискозиметрии пшеничного теста в расчетах трубопроводов // В.А. Арет, Л.А. Байченко, А.Ф. Денисенко, Л.К. Николаев, А.С. Щербаков // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств», 2012. - №2. [Электронный ресурс]: <http://www.processes.ihbt.ifmo.ru>

12. <http://hydraulic-drive.ru/>