

УДК 664.6/7

ББК 36.83

А-80

**Арет Вальдур Аулисович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой техники мясных и молочных производств Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Институт холода и Биотехнологий, e-mail: [valdurtera@rambler.ru](mailto:valdurtera@rambler.ru); тел.: (812)3153015;

**Байченко Анна**, бакалавр Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Институт холода и Биотехнологий, тел.: (812)3153015;

**Байченко Лариса Афанасьевна**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры техники мясных и молочных производств Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Институт холода и Биотехнологий, e-mail: [larabaychenko@yandex.ru](mailto:larabaychenko@yandex.ru);

**Головинская Оксана Владимировна**, инженер кафедры пищевой биотехнологии продуктов и растительного сырья Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Институт холода и Биотехнологий, тел.: (812)3142803;

**Кузнецов Алексей Владимирович**, аспирант кафедры техники мясных и молочных производств Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Институт холода и Биотехнологий, e-mail: [kuznetsov.alexey@mail.ru](mailto:kuznetsov.alexey@mail.ru);

**Щербakov Александр Сергеевич**, аспирант кафедры техники мясных и молочных производств Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Институт холода и Биотехнологий, e-mail: [alex.scherba@mail.ru](mailto:alex.scherba@mail.ru), тел.: 8(904)6035741.

**СРАВНЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПШЕНИЧНО-КУКУРУЗНОЙ ТЕСТОВОЙ МАССЫ, ИССЛЕДУЕМОЙ  
НА РОТАЦИОННОМ И КАПИЛЛЯРНОМ ВИСКОЗИМЕТРЕ**  
(рецензирована)

В условиях современного рынка большое развитие получили частные минипекарни, которые не имеют своих производственно-технических испытательных лабораторий, но в тоже время нуждаются в проведении ряда исследований сырья и полуфабрикатов для обеспечения стабильного качества выпускаемой продукции. Так как в литературе имеются данные об инвариантности результатов капиллярной и ротационной вискозиметрии по сравнительному критерию инвариантности, актуальным является использование в лабораториях минипекарен капиллярного вискозиметра, разработанного на кафедре ТММП, вместо дорогостоящего ротационного вискозиметра.

Ключевые слова: реология, тесто, капиллярный вискозиметр, ротационный вискозиметр.

**Aret Valdur Aulisovich**, Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department of Technology of Meat and Dairy Industries of St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics. Institute of Refrigeration and Biotechnology, e-mail: [valdurtera@rambler.ru](mailto:valdurtera@rambler.ru); tel.: (812) 3153015;

**Baichenko Anna**, Bachelor of St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics. Institute of Refrigeration and Biotechnology, tel.: (812) 3153015;

**Baichenko Larisa Afanasyevna**, Candidate of Technical Sciences, senior lecturer of the Department of Technology of Meat and Dairy Industries of St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics. Institute of Refrigeration and Biotechnology, e-mail: [larabaychenko@yandex.ru](mailto:larabaychenko@yandex.ru);

**Golovinskaya Oksana Vladimirovna**, engineer of the Department of Food Biotechnology of Food Products and Raw Materials of St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics. Institute of Refrigeration and Biotechnology, tel.: (812) 3142803;

**Kuznetsov Alexei Vladimirovich**, post graduate student of the Department of Technology of Meat and Dairy Industries of St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics. Institute of Refrigeration and Biotechnology, e-mail: [kuznetsov.alexey@mail.ru](mailto:kuznetsov.alexey@mail.ru);

**Shcherbakov Alexander Sergeevich**, post graduate student of the Department of Technology of Meat and Dairy Industries of St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics. Institute of Refrigeration and Biotechnology, e-mail: [alex.scherba@mail.ru](mailto:alex.scherba@mail.ru), tel.: 8 (904) 6035741.

## COMPARISON OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF WHEAT – CORN DOUGH MASS TESTED ON ROTATIONAL AND CAPILLARY VISCOMETER

(Reviewed)

*In contemporary market private mini bakeries that do not have their own production - technical testing laboratories have made great progress, but at the same time they need a number of studies of raw materials and semi-finished products to be conducted to ensure the consistent quality of manufactured products. Since the literature data are available on the invariance of the results of the capillary and rotational viscometry in comparative criterion of invariance the use of capillary viscometer developed at the Department of TMDP instead of expensive rotational viscometer in minibakeries laboratories is actual.*

*Keywords: rheology, dough, capillary viscometer, rotational viscometer.*

В условиях современного рынка важнейшей ежедневной задачей, стоящей перед небольшими хлебопекарнями является получение готовой продукции требуемого качества. Одними из главных направлений в решении данных задач являются: анализ свойств сырья согласно установленной рецептуре, а также контроль и управление реологическими свойствами теста. Немногие минипекарни обладают достаточной исследовательской базой для проведения анализа сырья и полуфабрикатов и не способны влиять на качество готовой продукции на стадии приготовления теста.

В литературных источниках имеются данные об инвариантности результатов капиллярной и ротационной вискозиметрии по сравнительному критерию инвариантности [1, 2]. Кузнецов В.В. и Шереметьев С.В. [3, 4] исследовал на капиллярном вискозиметре типа Убеллоде – Гольда и на немецком ротационном вискозиметре «Реотест» свойства высококонцентрированных растворов желатина до 25%. Следует отметить, что сравнительная реометрия на вышеуказанных вискозиметрах дала совпадение результатов в пределах 5-15%.

Несмотря на успехи теории вязкости жидкостей [5], для большинства пищевых сред не удаются теоретически рассчитать реологические свойства этих материалов. Кроме того, растворы желатина существенно отличаются от теста, поэтому была поставлена актуальная задача разработать капиллярный вискозиметр собственной конструкции, провести на нем серию опытов и сопоставить полученные результаты с результатами, полученными на современном ротационном вискозиметре.

Исследования вязкостных свойств кукурузно-пшеничной тестовой массы проводили на ротационном вискозиметре Rheotest-Medingen GmbH Rn4.1 немецкого производства и на капиллярном вискозиметре конструкции Щербакова А.С., изготовленном на кафедре Техники мясных и молочных производств Института Холода и Биотехнологий НИУ ИТМО.

Перед началом исследований проводили тщательный замес тестовой массы в течение 12 минут, а затем ее термостатирование в течение 20 минут. Экспериментальные исследования проводили параллельно на капиллярном и ротационном вискозиметре при температуре 20°C.

Вискозиметр Rheotest-Medingen GmbH Rn4.1 и измерительный стенд представлены на рисунке 1. Применяется данный реометр в химической и пищевой промышленности, при производстве смазочных материалов, красок, лаков, а также при выпуске косметики и фармацевтики.

Вискозиметр позволяет проводить фундаментальные исследования продукта в процессе производства, а также решать комплексные задачи контроля качества.

Основные характеристики прибора:

Диапазон вязкости:  $1 \dots 3 \times 10^9$ , мПас;

Диапазон скоростей сдвига:  $0,04 \dots 2 \times 10^4$ , с<sup>-1</sup>;

Диапазон напряжений сдвига:  $1,3 \dots 3,5 \times 10^5$ , Па;

Температурный диапазон: -60 ... +200, °C

Крутящий момент: 0,1 ... 150, мНм

Диапазон скоростей: 0,1 ... 1000 Число оборотов в минуту

Угловой диапазон: -50 ... 300°

Угловое разрешение: 0,001°

Частотный диапазон: 0,001 ... 10 Гц.

Тесто готовили на специальном препараторском столе (рис. 2) по рецептуре, приведенном в таблице 1.



Рис. 1. Ротационный вискозиметр Rheotest-Medingen GmbH Rn4.1

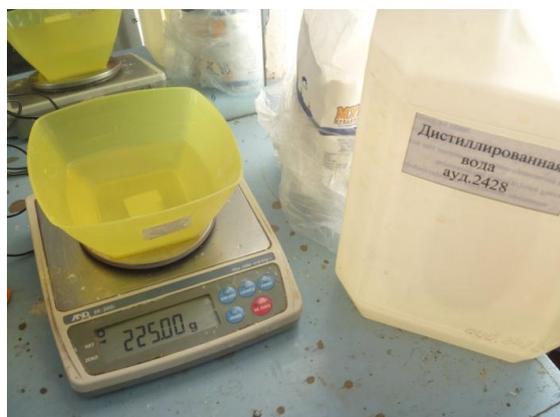
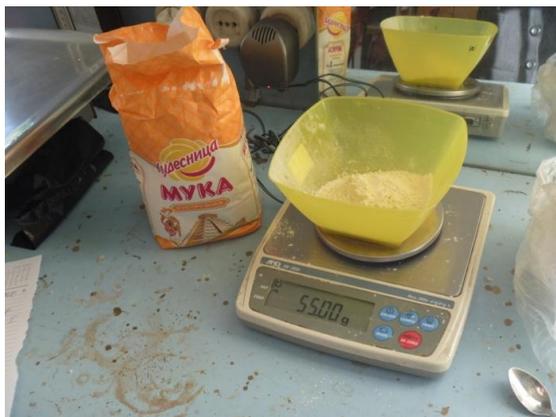
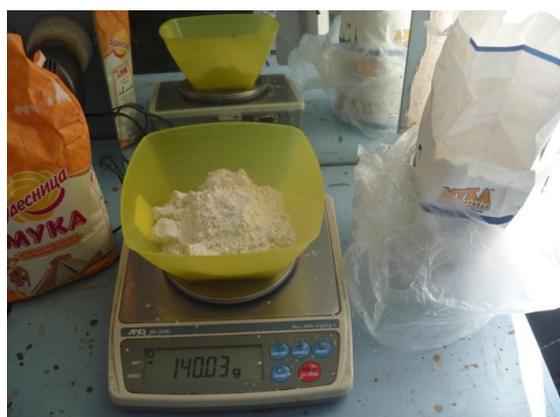


Рис. 2. Подготовка кукурузно-пшеничной тестовой массы

Таблица 1 - Рецепттура исследуемой тестовой массы

№ п/п	Наименование сырья	Нормативный документ	Количество сырья на 420 г теста, г
1	Мука пшеничная хлебопекарная высшего сорта	ГОСТ Р 52189-2003 Мука пшеничная. Общие технические условия.	140
2	Мука кукурузная	ГОСТ 14176-69 Мука кукурузная.	55
3	Вода дистиллированная	ГОСТ 6709-72	225

Реометрировали тесто с использованием цилиндра Н1, значения скоростей сдвига и напряжений сдвига по показателям прибора приведены в таблице 2. Основой расчета скоростей сдвига в Реотесте является формула Маргулеса, которая справедлива для ньютоновских жидкостей [6].

Таблица 2 - Показания ротационного вискозиметра

Скорость сдвига, $\dot{\gamma}, c^{-1}$	Напряжение сдвига, $\tau, Па$
16,55	56,84
55,64	126,6
105,5	199,8
155,4	262,2
195,9	305,5
235,8	344,5
265,6	371,7
295,5	396,4

Для построения графика зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига полученные данные перенесены в программу CurveExpert 1.3 (рисунок 3.)



Рис. 3. Связь между скоростями сдвига и касательным напряжением на поверхности цилиндра

Таким образом, связь между скоростями сдвига и касательным напряжением на поверхности цилиндра по данным ротационного вискозиметра имеет вид:

$$\tau = 8,7 \dot{\gamma}^{0,67} \quad (1)$$

Экспериментальные исследования на капиллярном вискозиметре [7, 8, 9] проведены на установке, представленной на рисунке. 4, позволяющей определить потери давления при движении жидкости.

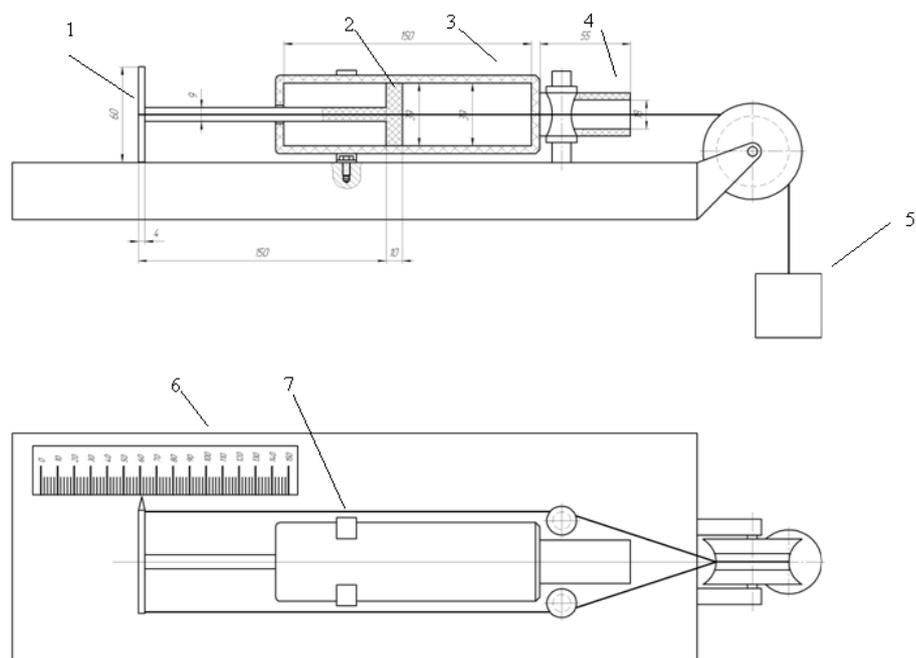


Рис. 4. Схема установки для определения потерь давления при движении неньютоновской жидкости

Установка имеет следующие конструктивные особенности. 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 двум, с выходящими трубками одинакового диаметра  $d = 8$  мм и различной длины  $L_1 = 50$  мм и  $L_2 = 200$  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.

В первой серии опытов моделировалось движение жидкости в цилиндре, имеющем на выходе прямой капилляр длиной  $L_1 = 50$ , во второй – длиной  $L_2 = 200$  мм. Грузы с учетом груза  $m = 0,25$  кг, компенсирующего силу сухого трения, использовали в диапазоне от 4-х кг до 8-ти кг. Таблицы №3 и №4

Таблица 3 - Время перемещения поршня при длине капилляра  $L = 50$  мм и диаметре капилляра  $d = 8$  мм в зависимости от массы груза

Масса груза, кг	Время перемещения поршня внутри цилиндра, с
4	210
5	141
6	107
7	80
8	66

Данные времени перемещения поршня в зависимости от установленного груза для трубки длиной  $L = 200$  мм приведены в таблице 4

Таблица 4 - Время перемещения поршня при длине капилляра  $L = 200$  мм и диаметре капилляра  $d = 8$  мм в зависимости от массы груза

Масса груза, кг	Время перемещения поршня внутри цилиндра, с
4	280
5	175
6	120
7	103
8	83

Благодаря полученным данным, можно вычислить объемный или весовой расход протекающей среды и перепад давлений при известной длине и диаметре капилляра.

Для определения зависимости объемного расхода от давления без учета потерь на входе воспользовались программой Mathcad. Построены графики зависимости объемного расхода от давления для опытов, проделанных с капилляром длиной  $L_1 = 50 \text{ мм}$  и для опытов с капилляром длиной  $L_2 = 200 \text{ мм}$  в единой системе координат расход – перепад давлений (рис. 5).

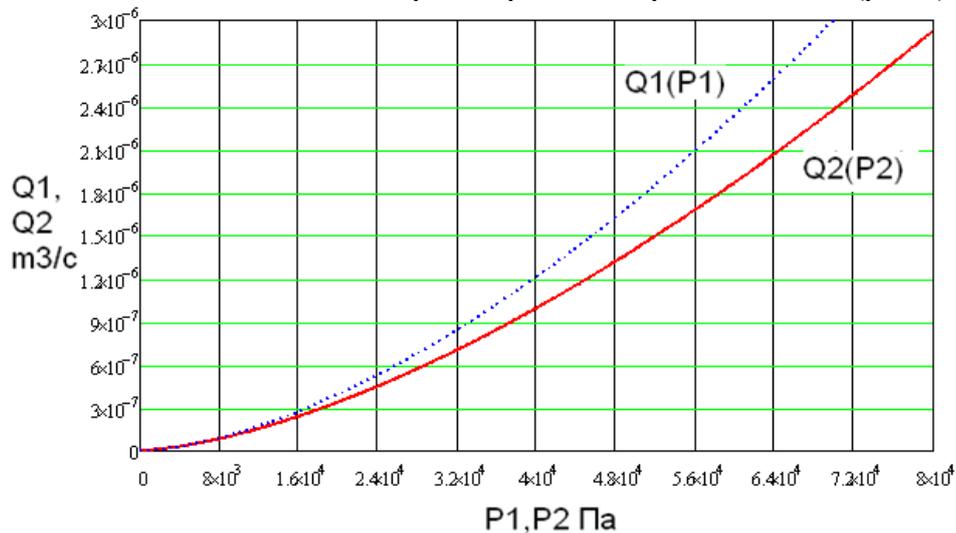


Рис. 5. График зависимости объемных расходов от давлений

Для  $d = 8 \text{ мм}$  используемый в первой серии опытов капиллярный вискозиметр отличается от капиллярного вискозиметра, используемого во второй серии опытов только длиной капилляра. Благодаря этому, можно определить потери давления на входе в капилляр. Воспользуемся программой Mathcad для определения зависимости объемного расхода без учета потерь давления на входе и построения данного графика. Для определения коэффициентов  $n$  и  $k$  составим систему из двух уравнения. При одном и том же объемном расходе подставим в формулу разность давлений  $\Delta P = P_2 - P_1$  и разность длин капилляров  $\Delta L = L_2 - L_1$ . Выбрав в указанном на графике диапазоне значений объемного расхода две точки, определим, соответствующие им разности давлений. Система уравнений примет следующий вид:

$$0,6 \cdot 10^{-6} = \frac{n \cdot \pi \cdot 0,004^3}{3 \cdot n + 1} \left( 0,004 \cdot \frac{29000 - 26000}{2} \cdot (0,2 - 0,05) \cdot k \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

$$2,4 \cdot 10^{-6} = \frac{n \cdot \pi \cdot 0,004^3}{3 \cdot n + 1} \left( 0,004 \cdot \frac{70000 - 61000}{2} \cdot (0,2 - 0,05) \cdot k \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

Решением данной системы уравнений являются следующие значения  $n$  и  $k$ :

$$n = 0,792 \quad k = 5,329.$$

Зависимость объемного расхода от давления без учета входных потерь имеет тогда вид:

$$Q_{\Delta P} = \frac{0,792 \cdot \pi \cdot 0,004^3}{3 \cdot 0,792 + 1} \left( 0,004 \cdot \frac{\Delta P}{2} \cdot 0,15 \cdot 5,329 \right)^{\frac{1}{0,792}} \quad (4)$$

На рисунке 6 показаны графики в исходной системе координат.

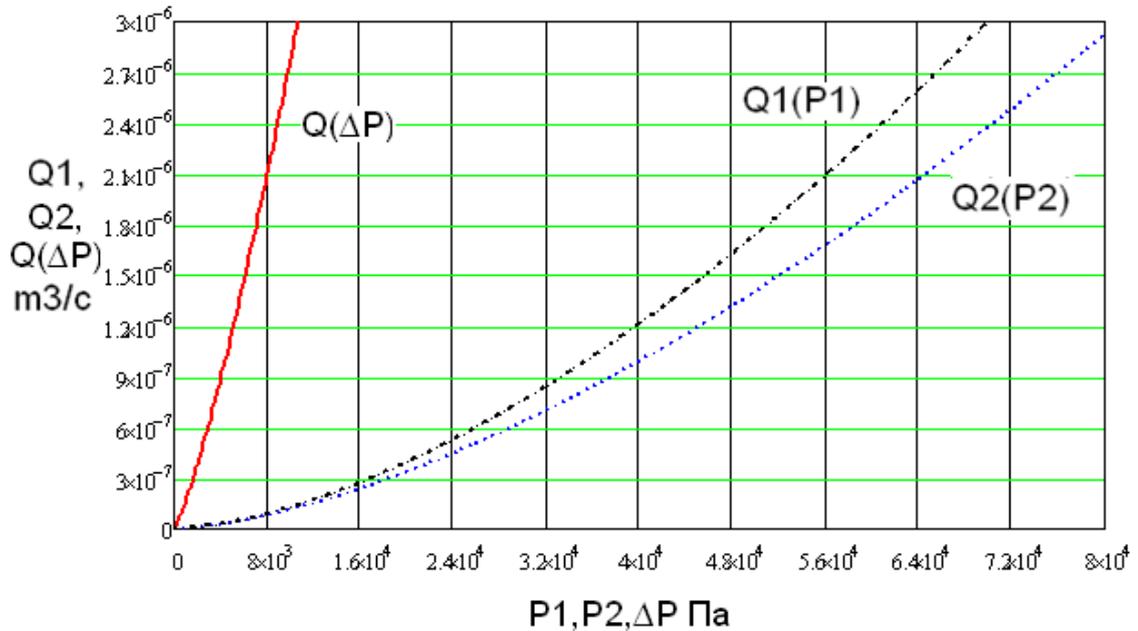


Рис. 6. Графики зависимости объемных расходов  $Q$  от давлений  $\Delta P$ , Па, построенные в программе Mathcad

Как видно из приведенных выше графиков экспериментальная зависимость  $Q(P)$  является нелинейной.

Для определения напряжения сдвига на стенке капилляра воспользуемся формулой (5) вытекающей из уравнения равновесия:

$$\tau_R = \frac{\Delta p R}{2 \Delta L}, \text{ Па} \quad (5)$$

где  $L$  – расстояние между поперечными сечениями капилляра.

Для определения скорости сдвига на стенке капилляра через измеряемые величины воспользуемся формулой Рабиновича:

Перепишем уравнение Рабиновича (2.68) в виде

$$-\dot{\gamma}_R = \frac{3}{4} \left( \frac{4Q}{\pi R^3} \right) + \frac{\Delta p}{\pi R^3} \frac{dQ}{d\Delta p} \quad (6)$$

Производная  $\frac{dQ}{d\Delta p}$  определена с помощью программы Mathcad.

Графики этих функции и производные представлены на рисунке 7.

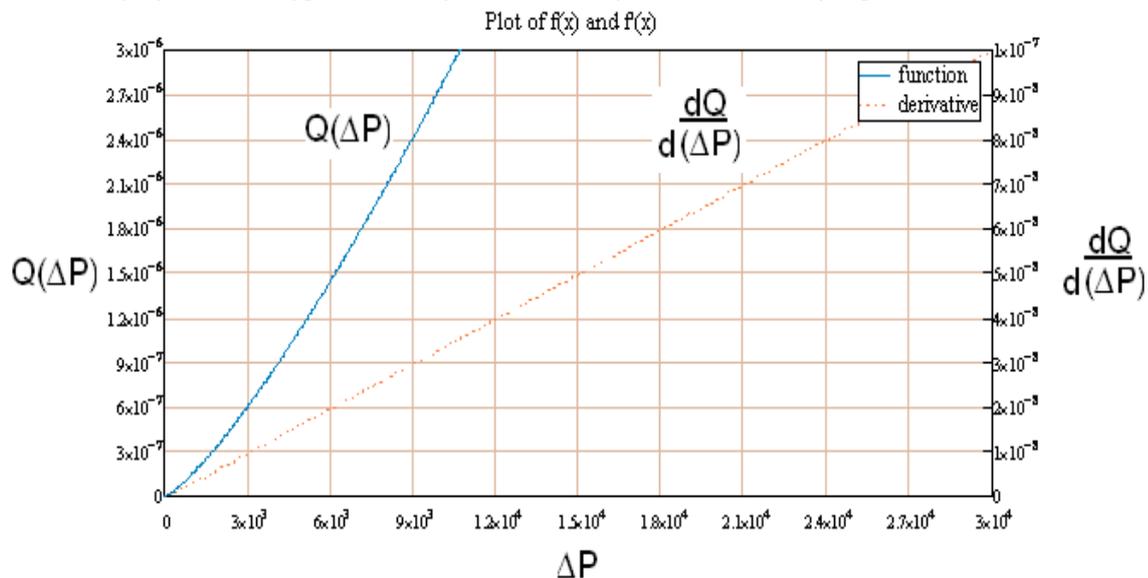


Рис. 7. График зависимости объемного расхода  $Q_{\Delta P}$  от давления  $\Delta P$ , Па и производная этой функции, построенные в программе Mathcad

Для определения зависимости скорости сдвига на стенке капилляра от напряжения сдвига на стенке капилляра, в формулы (7) и (6) подставлены экспериментальные значения величин.

$$\tau_{Rn} = \frac{\Delta p_n R}{2 \Delta L}, \text{ Па} \quad (7)$$

$$\tau_{1R} = \frac{3 \cdot 10^3 \cdot 0,004}{2 \cdot 0,15} = 40 \text{ Па} \quad (8)$$

$$\tau_{2R} = \frac{4,5 \cdot 10^3 \cdot 0,004}{2 \cdot 0,15} = 60 \text{ Па} \quad (9)$$

$$\tau_{3R} = \frac{6 \cdot 10^3 \cdot 0,004}{2 \cdot 0,15} = 80 \text{ Па} \quad (10)$$

$$\tau_{4R} = \frac{7,5 \cdot 10^3 \cdot 0,004}{2 \cdot 0,15} = 100 \text{ Па} \quad (11)$$

$$\tau_{5R} = \frac{9 \cdot 10^3 \cdot 0,004}{2 \cdot 0,15} = 120 \text{ Па} \quad (11)$$

Расчет скоростей сдвига выполнен по формуле Рабиновича:

Для определения эмпирической зависимости напряжения сдвига на стенке капилляра от скорости сдвига на стенке капилляра воспользуемся программой CurveExpert. После внесения значений величин напряжения сдвига в поле для оси Y и скорости сдвига в поле оси X, программа CurveExpert1.3 предлагает различные законы для построения данного графика, в числе которых естественно выбрать степенную функцию.

Результаты исследования показывают, что

1. Новая установка конструкции Щербакова А.С. дает сопоставимые с немецким ротационным вискозиметром результаты.

2. Капиллярный вискозиметр Щербакова А.С. на порядок дешевле вискозиметре Rheotest-Medingen GmbH Rn4.1 и может быть рекомендован для минипекарен.

3. Установка позволяет отдельно исследовать местные сопротивления в трубопроводах для транспортирования мучного теста.



Рис. 8. График реологической кривой с установки Щербакова А.С.

#### Литература:

1. Арет В.А. и др. Физико-механические свойства сырья и готовой продукции / В.А. Арет, Б.Л. Николаев, Л.К. Николаев. – СПб.: ГИОРД, 2009. - С. 86-98.

2. Арет В.А. и др. Реологические основы расчета оборудования производства жиросодержащих пищевых продуктов / В.А. Арет, Б.Л. Николаев, Л.К. Николаев. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2009. – С. 265-269.

3. Кузнецов В.В., Шереметьев С.В. Аналитические реакции комплексообразования органических реагентов с ионами металлов в отвержденном желатиновом геле // Ж. аналит. химии.

2009. Т. 64, №9. - С. 910-919.

4. Шереметьев С.В., Кузнецов В.В. Реакции синтеза азокрасителей в отвержденном желатиновом геле и их аналитическое применение при определении нитритов // Ж. аналит. химии. 2007. Т. 62, №4. - С. 357-369.

5. Viswanath D.S. *Viscosity of Liquids Theory. Estimation, Experiment, and Data*. Springer, 2007, 660 pg.

6. Арет В.А., Байченко Л.А., Денисенко А.Ф., Николаев Л.К., Щербаков А.С. Использование результатов ротационной вискозиметрии пшеничного теста в расчетах трубопроводов. // Научный журнал ИТМО. Серия: «Процессы и аппараты пищевых производств». (Электронный журнал), №1, 2013.

7. Щербаков А.С. Вискозиметрия пшеничного теста. / Щербаков А.С. // Научный журнал СПбГУНиПТ. Серия: «Процессы и аппараты пищевых производств», №2, 2012.

8. Gardel, A. Les pertes de charge dans les branchements en Te des conduits de section circulaire/ A/ Gargel// Bulletin technique de la Suisse romande.- 1970. №25. - P. 363-391.

9. Арет В.А., Щербаков А.С., Кузнецов А.В. Влияние закругления трубы на движение неньютоновской жидкости. Научный журнал СПбГУНиПТ. Серия: «Процессы и аппараты пищевых производств». (Электронный журнал), №2, 2012.

#### **References:**

1. Aret V.A. *Physical and mechanical properties of raw materials and finished products* / V.A. Aret, B.L. Nikolaev, L.K. Nikolaev. St.Ptb.: GIORD, 2009. P. 86-98.

2. Aret V.A. *Rheological basis of calculation of manufacturing equipment of fat-containing foods* / V.A. Aret, B.L. Nikolaev, L.K. Nikolaev. St. Ptb.: SPbSUSandFT, 2009. P. 265-269.

3. Kuznetsov V.V., Sheremetjev S.V. *Analytical reactions of organic reagents complexing with metal ions in the hardened gelatin gel* // *Journal of analyt. chemistry*. 2009. V. 64. №9. P. 910 -919.

4. Sheremetjev S.V., Kuznetsov V.V. *Synthesis reaction of azo dyes in the hardened gelatin gel, and their analytical application in the determination of nitrite* // *Journal of anal. chemistry*. 2007. V. 62. №4. P. 357-369.

5. Viswanath D.S. *Viscosity of Liquids Theory. Estimation, Experiment, and Data*. Springer, 2007. 660 p.

6. Aret V.A., Baichenko L.A., Denysenko A.F., Nikolaev L.K., Shcherbakov A.S. *Using the results of rotational viscometry of wheat dough in the calculations of pipelines* // *Scientific Journal of the ITMO. Series: "The processes and equipment for food production"*. (E-zine). № 1. 2013.

7. Shcherbakov A.S. *Viscometry of wheat dough* // *Journal of SPbSUSand FT. Series: "The processes and equipment for food production"*. №2. 2012.

8. Gardel A. *Les pertes de charge dans les branchements en Te des conduits de section circulaire / A / Gargel* // *Bulletin technique de la Suisse romande*. 1970. №. 25. P. 363 - 391.

9. Aret V.A., Shcherbakov A.S., Kuznetsov A.V. *The influence of pipe curvature on the motion of a non-Newtonian fluid*. / Aret V.A., Shcherbakov A.S., Kuznetsov A.V. // *Journal of SPbSUSandFT. Series: "The processes and equipment for food production."* (E-zine). №2. 2012.