

УДК 65.33

## **Оптимизация межоперационного трубопроводного транспорта теста из разнозлаковой муки**

Щерабаков А.С, инженер, аспирант,  
Институт холода и биотехнологий Национального исследовательского  
университета информационных технологий, механики и оптики (ИХиБТ  
НИУ ИТМО), [alex.scherBa@mail.ru](mailto:alex.scherBa@mail.ru)  
Байченко А.А. , магистр, ассистент ИХиБТ НИУ ИТМО, [Externalize@yandex.ru](mailto:Externalize@yandex.ru)

*Оптимизация транспортирования теста требует совместного решения уравнений неразрывности потока и движения с учетом реологического уравнением среды и зависимости стоимости трубы от его параметров.*

Ключевые слова : тесто, трубопроводный транспорт, цена

## **Optimization of the inter-operation pipeline transportation of the dough from differently - cereal flour**

Scherabakov A.S, an engineer, a graduate student,  
Institute of Refrigeration and Biotechnologies, National Research University of  
Information Technologies, Mechanics and Optics (IR&BT NRU ITMO),  
[alex.scherBa@mail.ru](mailto:alex.scherBa@mail.ru)

Baichenko A.A , MPH, assistant IR&BT NRU ITMO, [Externalize@yandex.ru](mailto:Externalize@yandex.ru)

**Optimization of the dough transportation requires a composite solution of the equations of the motion and continuity of the flow, taking into account the rheological equation of the dough and the cost of the pipe depending on its parameters.**

Keywords: dough, pipeline, price

Выбор межоперационного трубопроводного транспорта на хлебопекарных производствах, как основного элемента в объединении технологического оборудования цехов, является сложной многопараметрической задачей. Связано это не только с многообразием типов нагнетающих устройств, но и различием природы перемещаемых сред,

их стабильности и качества, обеспечением необходимой скорости транспортирования [1,2,3,6].

Анализ течения неньютоновских жидкостей по трубам представляет собой важную задачу для инженера, включающую в себя множество практических приложений. Целью данного анализа является установление связи между градиентом давления в трубе и производительностью и отображение этого в стоимости системы.

Оптимизация транспортирования разнозлакового теста требует совместного решения уравнений неразрывности потока и движения с учетом реологического уравнением среды и зависимости стоимости трубы от его параметров. В математической основе реодинамики используются дифференциальные уравнения неразрывности и движения Навье – Стокса в цилиндрических координатах  $r, \theta, z$  :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v_r) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left( \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = \\ & = -\frac{\partial P}{\partial z} + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rr}) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \right) + \rho g_r \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left( \frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) = \\ & = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \left( \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{r\theta}) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \tau_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} \right) + \rho g_\theta \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \\ & = -\frac{\partial P}{\partial z} + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \end{aligned} \quad (4)$$

Условные обозначения даны в конце статьи.

Система уравнений (1) – (4) в общем виде не имеет аналитического решения, поэтому для разработки основных инженерных формул необходимо упростить систему. Будут сделаны следующие моделирующие упрощения:  $\rho$  – среда не сжимаема, плотность постоянная величина; течение

ламинарное, стационарное и симметричное. Тогда для течения среды в горизонтальной трубе постоянного сечения можно принять, что  $v_r = v_\theta = 0$ ,  $v_z = v_z(r)$ ,  $g_z = g_r = g_\theta = 0$ ;  $P = P(z)$  - давление изменяется только по оси трубы; Из компонент тензора напряжений сохраняется только  $\tau_{rz}$ , остальные компоненты девиатора напряжений по переменным  $\theta$ ,  $z$  и  $t$  равны нулю. Тогда из системы (1) – (4) получим сравнительно простое дифференциальное уравнение:

$$\left(\frac{dP}{dz}\right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) \quad (5)$$

Поскольку  $\tau_{rz}$  - единственная компонента тензора, то здесь можно опустить индекс  $r$  и  $z$  и назвать эту величину напряжением сдвига. Левая часть уравнения (5) не зависит от  $r$ , и уравнение можно непосредственно интегрировать, если известна связь между напряжением сдвига  $\tau$  и скоростью сдвига  $\frac{\partial v_z}{\partial r}$  и получить зависимость скоростей течения от текущего радиуса трубы. После второго интегрирования, используя интегрирование по частям и полагая, что скорость на стенке трубы равна нулю, получим формулу расхода.

Вискозиметрические исследования на ротационном вискозиметре Реотест и непосредственные моделирующие опыты на приборе конструкции Щербакова А.С. [авторская заявка № 2013129808 с приоритетом от 28.06.2013 на авторское свидетельство] подтвердила правильность гипотезы возможности отнесения теста из разнотлаковой муки к средам Оствальда де Виля (степенной жидкости) [4,5,7,8,9]. Тогда реологическое уравнение имеет вид:

$$F(\tau) = \left(\frac{\tau}{k}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

Цены на трубы приведены в таблице 1.

Таблица 1

## Цены на трубы нержавеющей от компании ООО «МИРРАВИК»

Наименование	Ед. изм.	Цена за пог. м.	Вес кг./пог.м.
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 8x1,0	мм.	87,00	0,175
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 10x1,0	мм.	90,00	0,225
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 12x1,0	мм.	95,00	0,275
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 12x1,5	мм.	142,00	0,394
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 14x1,0	мм.	133,00	0,321
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 14x1,5	мм.	152,36	0,470
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 16x1,0	мм.	127,00	0,384
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 16x1,5	мм.	137,00	0,545
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 18x1,5	мм.	153,00	0,620
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 20x1,5	мм.	198,55	0,695
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 20x2	мм.	229,00	0,901
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 22x1,5	мм.	198,15	0,758
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 25x1,5	мм.	204,00	0,883
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 25x2,0	мм.	267,00	1,152
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 26,9x3,0	мм.	469,00	1,795
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 30x1,5	мм.	242,00	1,070
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 32x1,5	мм.	299,00	1,146
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 33x1,5	мм.	250,00	1,146
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 38x1,5	мм.	315,00	1,371
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 38x2	мм.	374,00	1,803
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 42,4x2,0	мм.	445,00	2,023
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 50,8x1,5	мм.	405,00	1,852
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 57x1,5	мм.	571,55	2,120
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 60,3x1,5	мм.	556,00	2,209
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 76,2x1,5	мм.	655,00	2,802
Труба 08X18Н10 (1.4301) зеркал. 88,9x1,5	мм.	855,33	3,290

С помощью программы CurveExpert построена график зависимости цены трубопровода от его диаметра. График приведен на рисунке 1

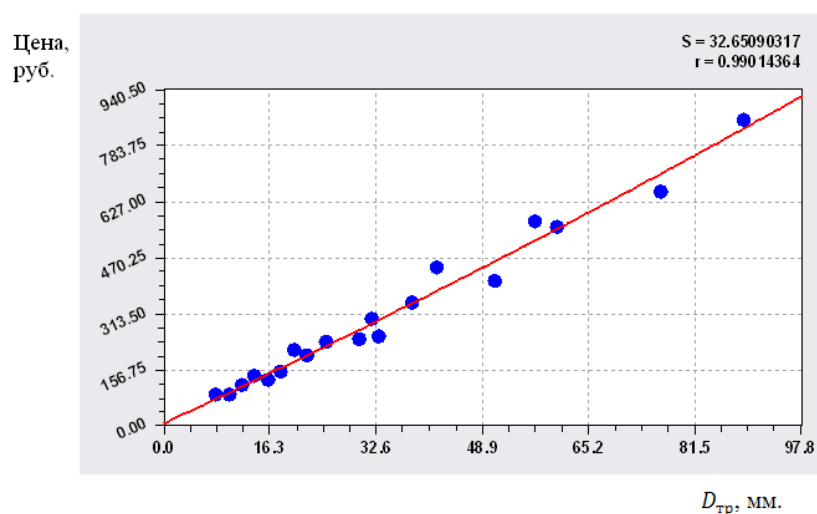
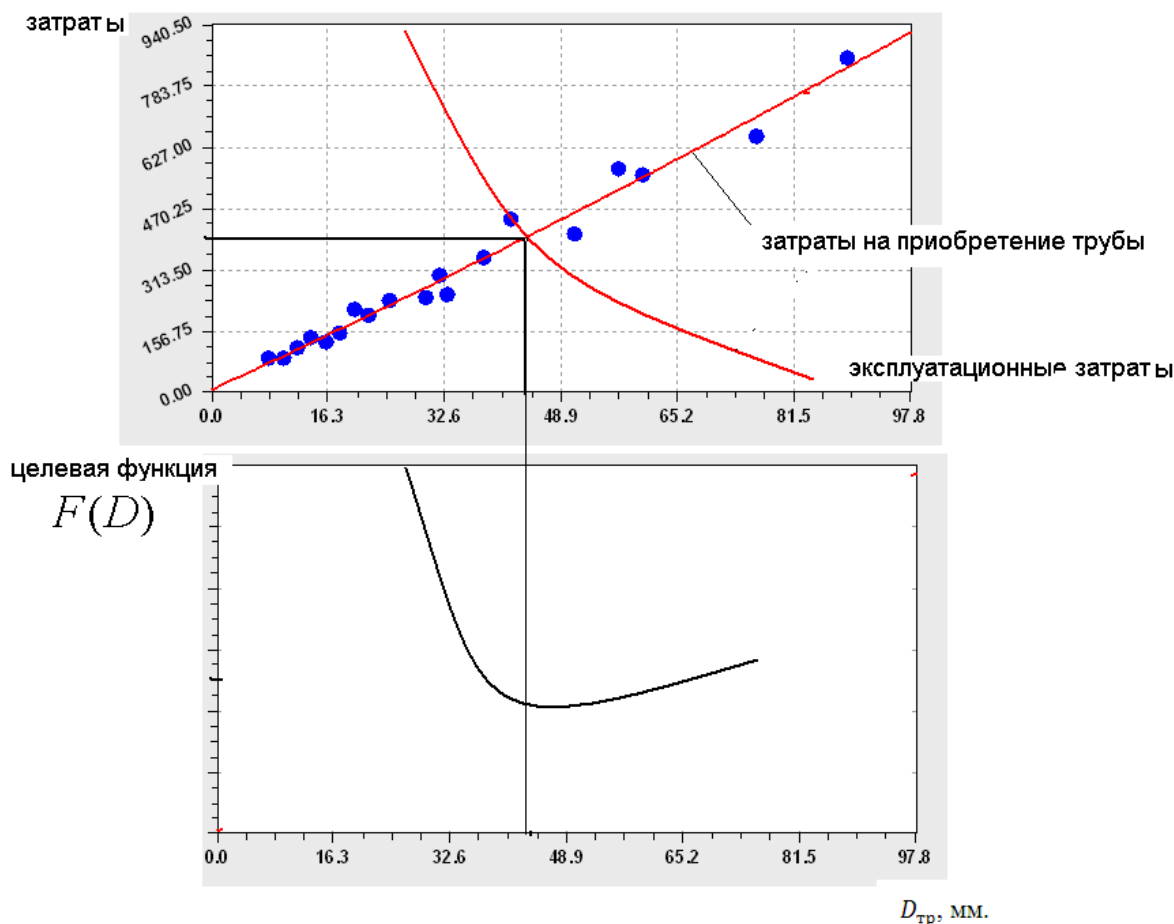


Рисунок 1. Зависимость цены трубопровода от его диаметра.

Совмещая графики цены трубы и цены электроэнергии для перекачки, получим оптимальную точку на пересечении графиков (Рис.2).



$$F(D) = 2Lk(CTE) \left( \frac{Q(3n+1)}{n\pi} \right)^n \left( \frac{D_{\text{тр}}}{2} \right)^{-(3n+1)} + (CTP)D_{\text{тр}} \quad (7)$$

Рис.2 . Целевая функция

Предложенная методика построения целевой функции, учитывающей стоимость труб и расходуемой электроэнергии на нагнетание, позволяет оптимизировать межоперационную транспортную систему разнозлакого теста в смысле минимизации финансовых затрат.

Условные обозначения:

$r$  – цилиндрическая координата, м;  $\tau$  – напряжение сдвига, Па;  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига;  $Q$  – объемный расход текущей среды через трубу, м<sup>3</sup>/с;  $n$  – индекс течения;  $k$  – коэффициент консистенции;  $R$  – радиус капилляра, м;  $v$  – средняя скорость, м/с;  $\rho$  – плотность среды, кг/ м<sup>3</sup>;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $F(D)$ - целевая функция;  $L$  – длина трубы;  $D_{\text{тр}}$  – диаметр трубы;  $CTE$ - эксплуатационные затраты;  $CTP$ - стоимость трубы

## Список литературы

1. Арет В. А., Щербаков А. С. Капиллярная вискозиметрия пшеничного теста методом исключения входовых потерь давления [Электронный ресурс]: Электронный научный журнал «Процессы и аппараты пищевых производств»/ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий». Электронный журнал – Санкт – Петербург: СПбГУНиПТ, 2011. - №2.
2. Щербаков А.С. Кинетика реологического поведения пшенично-кукурузного теста при различной температуре продукта. Проблемы и перспективы развития науки в начале третьего тысячелетия в странах СНГ: Сб. материалов международной научно-практической интернет-конференции. – Переяслав – Хмельницкий, Украина, 2013. – С. 16-18
3. Steffe, J. F. Rheological Methods In Food Process Engineering. Second Edition, 1996, pg. 428.
4. Bagley E.B. End correction in the capillary flow of polyethylene // Journal of Applied Physics, 1957. Vol. 28, No. 5. – pp. 624 – 627.
5. Leonov A.I., Prokunin A.N. Non-linear Phenomena in Flows of Viscoelastic Polymer Fluids, Chapman and Hall, London, 1994, 475 pp.
6. Metzner A.B. Reed J.C. Flow of Non-Newtonian Fluids – Correlation of the Laminar, Transition, and Turbulent-Flow Regions. Aiche Journal, 1, 1955, P. 434-440.
7. Reiner M. Selected papers on rheology, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 1975, 463 pp.
8. Schofield R.K., Scott Blair G.W., Proc. Roy. Soc. (London), A 160, 87-94 (1937).
9. Scott Blair G.W., A survey of general and applied rheology, London, 1949.

## Транслитерация:

### Spisok literatury

1. Aret V. A., Shherbakov A.S . Kapillyarnaya viskozimetriya pshenichnogo testa metodom isklyucheniya vxodovykh poter davleniya [elektronnyj resurs]: elektronnyj nauchnyj zhurnal «processy i apparaty pishhevyx proizvodstv»/gou vpo «sankt-peterburgskij gosudarstvennyj universitet nizkotemperaturnyx i pishhevyx texnologij». elektronnyj zhurnal – sankt – peterburg: spbgunipt, 2011. - №2.
2. Shherbakov A.S. Kinetika reologicheskogo povedeniya pshenichno-kukuruznogo testa pri razlichnoj temperature produkta. problemy i perspektivy razvitiya nauki v nachale tretego tysyacheletiya v stranax sng: sb. materialov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy internet-konferencii. – pereyaslav – xmelnickij, ukraine, 2013. – s. 16-18

3. Steffe, J. F. Rheological methods in food process engineering. Second edition, 1996, pg. 428.
4. Bagley E.B. End correction in the capillary flow of polyethylene // Journal of applied physics, 1957. vol. 28, no. 5. – pp. 624 – 627.
5. Leonov A.I., Prokunin A.N. Non-linear phenomena in flows of viscoelastic polymer fluids, Chapman and Hall, London, 1994, 475 pp.
6. Metzner A.B., Reed J.C. Flow of non-newtonian fluids – correlation of the laminar, transition, and turbulent-flow regions. Aiche Journal, 1, 1955, p. 434-440.
7. Reiner M. Selected papers on rheology, Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, 1975, 463 pp.
8. Schofield R.K., Scott-Blair G.W., Proc. roy. soc. (London), a 160, 87-94 (1937).
9. Scott-Blair G.W., A survey of general and applied rheology, London, 1949.