

## ОБОСНОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦЕЛЬНОГО МОЛОКА

В статье приведены результаты экспериментальных исследований механических свойств цельного молока жирностью 3,4%. Применена реологическая модель Шведова-Бингама для описания течения молока, как вязко-пластического тела. Определена линейная зависимость предельного напряжения сдвига и пластической вязкости молока от температуры.

**Ключевые слова:** молоко, механические свойства, предельное напряжение сдвига, пластическая вязкость.

Изучение механических свойств молока, как сельскохозяйственного сырья животного происхождения, является одной из главных задач пищевой перерабатывающей отрасли агропромышленного комплекса. Это необходимо для того, чтобы выявить закономерности движения, взаимосвязей и трансформации компонентов (белка, жира), входящих в состав перерабатываемого материала, и обосновать необходимые промышленные требования к технологическому оборудованию.

К механическим относятся реологические свойства жидкостей, которые проявляются при течении – вязкость, упругость, пластичность и другие. Они определяются химическим и фазовым составом, концентрацией растворов. От этих свойств зависит выбор режимов технологической переработки материалов. С их помощью проводят расчет перерабатывающего и транспортирующего оборудования (сепараторы, насосы, смесители, гомогенизаторы, трубопроводы и т.д.). Эти свойства определяют качество продукта, его органолептику.

Глубокое их изучение дает возможность повысить производительность переработки молока, шире использовать его как средство диагностики различных заболеваний у коров, создавать пищевые и технические заменители, которые используют для вышайки телят, для испытаний нового молочного оборудования или демонстрации его работы в учебных целях. Большая потребность в лекарственных препаратах, получаемых из молочных продуктов [1]. Реологическое поведение является важным критерием для разработки методов анализа качественных (сенсорных) показателей чувствительности материала [2].

Математические зависимости, устанавливающие связь между действующими на жидкость механическими напряжениями, деформациями и их производными по времени, включают реоло-

гические коэффициенты, определяющие свойства материалов (вязкость, упругость, пластичность и другие). Эти характеристики являются главными физико-механическими свойствами и непосредственно связаны с законами движения частиц молока, со строением пространственной структуры, которую образуют белковые молекулы и жировые шарики. Определяются свойства опытным путем, зависят от многих факторов, условий испытаний, вида экспериментального оборудования [3] и не достаточно хорошо изучены.

Для описания реологического поведения материалов в отдельных частных случаях их деформирования пользуются механическими моделями, для которых составляют дифференциальные уравнения [4,5]. Механическая модель жидкости определяется комбинацией простых элементов (рисунок 1).

У молока различной жирности хорошо изучена только одна механическая характеристика – вязкость. Особенно – ее зависимость от температуры.

Техника измерений включает целый ряд приборов (вискозиметров Гепплера, Энглера, Оствальда), реометров, реотестов и других устройств, с помощью которых разные ученые

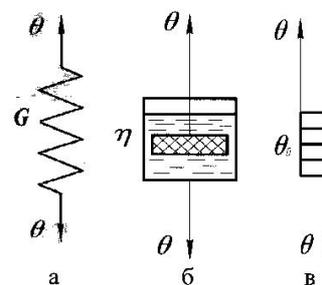


Рисунок 1. Механические модели:  
 а – упругое тело Гука; б – идеально-вязкое тело Ньютона; в – пластическое тело Сен-Венана  
 ( $\theta$  – напряжение сдвига, Па;  $G$  – модуль сдвига, Па;  
 $\theta_0$  – предельное напряжение сдвига, Па;  
 $\eta$  – динамическая вязкость, Па·с)

выявили наличие аномальной (структурной) вязкости у молока. Она зависит от степени внешнего воздействия у многих жидкостей, например у растворов полимеров. Эксперименты не дали механической модели молока.

Горбатовым А.В. [6], изучавшим структурные свойства молока, реологическая модель не выбрана. Вайткусом В.В. [7] была изучена зависимость вязкости молока, сливок и обезжиренного молока, в котором главную роль в образовании структуры раствора играют белковые молекулы, от степени механического воздействия, от времени его хранения (в том числе тиксотропные явления), но реологической модели предложено не было.

Ренден В.Х. [8] приводит сведения об экспериментальных исследованиях натурального молока, в том числе гомогенизированного, жирностью 3,3% и делает выводы, что его поведение при вискозиметрическом течении можно описать с помощью степенного уравнения Оствальда-Де Виля. Это – реологическая модель псевдопластической жидкости, в которой динамическая вязкость материала не определена:

$$\theta = k \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (1)$$

где  $\dot{\gamma}$  – градиент скорости сдвига,  $c^{-1}$ ;  $k$  и  $n$  – коэффициенты (консистентная постоянная и индекс течения). Данное выражение эмпирическое, механическую модель для такого состояния молока определить не возможно.

Экспериментальные исследования цельного молока жирностью 3,4%, выполненные в Оренбургском государственном университете, показали невозможность описания его поведения при вискозиметрическом течении уравнением (1). Испытания проводились на установке, изготовленной на базе стандартного ротационного вискозиметра ВСН-3 с термостатированием исследуемой жидкости (рисунок 2).

Принцип действия вискозиметра 1 (рисунок 2) основан на измерении сдвиговых напряжений в материале, который находится в узком кольцевом зазоре между вращающейся наружной цилиндрической гильзой 3 и внутренним цилиндром, связанным с измерителем момента вязкого трения 5, выполненном в виде пружины кручения. Переключатель оборотов гильзы устанавливает градиент скорости сдвига 200, 292, 392 и 583  $c^{-1}$ .

В качестве термостатирующей жидкости использовали трансформаторное масло. Температуру его поддерживали с отклонением не более 0,5°C с помощью нагревателя 9 терморегулятором 8. Повышение и понижение температуры исследуемого материала осуществляли ускоренной или замедленной подачей трансформаторного масла насосом 11. Перед измерением провели тарировку вискозиметра на дистиллированной воде.

Испытания велись по методике, изложенной в паспорте вискозиметра, для образцов молока жирностью 3,4%, взятых у коров краснопестрой породы. Интервал температур: от 15° до 50°C. В таблице 1 приведены результаты измерений динамической вязкости. Они были использованы для выбора реологического уравнения состояния.

Аппроксимация экспериментальных данных методом наименьших квадратов показала, что описать поведение молока можно уравнением Шведова-Бингама:

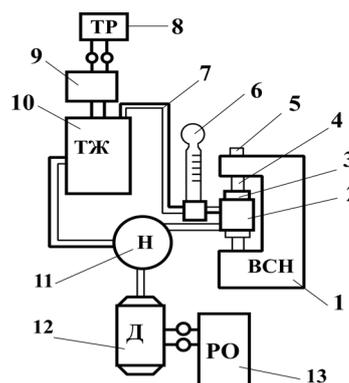


Рисунок 2. Схема экспериментальной установки: 1 – вискозиметр ВСН; 2 – стакан для исследуемой жидкости; 3 – гильза; 4 – привод; 5 – измеритель момента; 6 – термометр; 7 – трубопровод; 8 – терморегулятор; 9 – нагреватель; 10 – емкость с термостатирующей жидкостью; 11 – насос; 12 – двигатель; 13 – регулятор оборотов

Таблица 1. Динамическая вязкость молока жирностью 3,4%, мПа Ч с

$t, ^\circ C$	$\dot{\gamma}, c^{-1}$			
	200	292	392	583
15	2,577	2,589	2,411	2,211
20	2,577	2,354	2,192	2,063
25	2,148	2,060	1,753	1,768
30	1,804	1,765	1,534	1,474
35	1,632	1,471	1,359	1,326
40	1,289	1,412	1,315	1,267
45	1,203	1,177	1,227	1,179
50	1,031	1,118	1,096	1,032

Таблица 2. Предельное напряжение сдвига  $\theta_0$  (Па) и пластическая вязкость  $\eta^0$  (мПа Ч с)

Коэффициенты	Температура, °С							
	15	20	25	30	35	40	45	50
$\theta_0$	0,172	0,147	0,123	0,098	0,074	0,049	0,025	0
$\eta^0$	1,82	1,69	1,56	1,43	1,30	1,18	1,05	0,92

$$\theta = \theta_0 + \eta^0 \cdot \dot{\gamma}, \quad (2)$$

где  $\theta_0$  – предельное напряжение сдвига (Па) и  $\eta^0$  – пластическую вязкость (Па Ч с) при изучении динамических процессов можно найти из выражений [9]:

$$\theta_0 = (\Sigma \theta_i \cdot \Sigma \dot{\gamma}_i^2 - \Sigma \theta_i \cdot \dot{\gamma}_i \cdot \Sigma \dot{\gamma}_i) / [4 \cdot \Sigma \cdot \dot{\gamma}_i^2 - (\Sigma \dot{\gamma}_i)^2];$$

$$\eta^0 = (4 \cdot \Sigma \theta_i \cdot \dot{\gamma}_i - \Sigma \theta_i \cdot \Sigma \dot{\gamma}_i) / [4 \cdot \Sigma \cdot \dot{\gamma}_i^2 - (\Sigma \dot{\gamma}_i)^2].$$

Предельное напряжение сдвига и пластическая вязкость являются реологическими характеристиками цельного молока жирностью 3,4%. Зависимость этих параметров от температуры ( $t$ ) определяется линейными уравнениями:

$$\theta_0 = 0,245 - 4,9 \cdot 10^{-3} t,$$

$$\eta^0 = 2,2 \cdot 10^{-3} - 2,56 \cdot 10^{-5} t.$$

Изменение значений коэффициентов  $\theta_0$  и  $\eta^0$  (таблица 2) с повышением температуры и скорости сдвига объясняется физическим состоянием среды.

Усиливается броуновское движение частиц раствора и механическое воздействие, разрушающее пространственную структуру жидкости. Механическая модель молока, как вязко-пластического тела показана на рисунке 3.

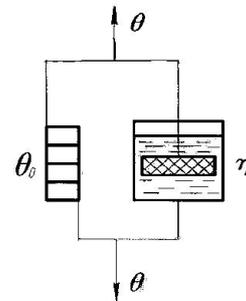


Рисунок 3. Механическая модель молока жирностью 3,4%

### Выводы

Экспериментальное определение реологических свойств молока жирностью 3,4% при температуре, которая ниже температуры денатурации белков, подтверждает наличие аномалии вязкости. В отличие от В.Х. Рендена для этого пищевого продукта при вискозиметрическом течении получена реологическая модель Шведова-Бингама.

Определены реологические свойства молока (предельное напряжение сдвига и пластическая вязкость) и установлена их линейная зависимость от температуры.

26.10.2011

### Список литературы:

1. Regnault S., Dumay E., and Cheftel J. C. Pressurisation of raw skim milk and of a dispersion of phosphocaseinate at 9 degrees C or 20 degrees C: effects on the distribution of minerals and proteins between colloidal and soluble phases // J.Dairy Res. V.73.- 2006. – P.91-100.
2. Система научного и инженерного обеспечения пищевых и перерабатывающих отраслей АПК России /А.Н. Богатырев, В.А. Панфилов и др. – М.: Пищевая промышленность, 1995. – 528с.
3. Белкин И.М. Ротационные приборы. Измерение вязкости и физико-механических характеристик материалов /И.М. Белкин, Г.В. Виноградов, А.И. Леонов. – М.: Машиностроение, 1967. – 272 с.
4. Николаев Л.К. Реологические характеристики жиросодержащих пищевых продуктов. – Л.: Легкая и пищевая промышленность, 1979. – 58 с.
5. Бибик Е.Е. Реология дисперсных систем. – Л.: Ленинградский университет, 1981. – 172 с.
6. Горбатов А.В. и др. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов /А.В. Горбатов и др. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 296с.
7. Вайткус В.В. Изучение вязкости молока и сливок. Труды Литовского филиала ВНИИМС, т. 1. – Вильнюс: Минтис, 1964. – С.16-26.
8. Randhahn V.H. Beitrag zum Fließverhalten von Milch- und Milchkonzentraten //Milchwissenschaft, 28 (10), 1973. – S.620-628.
9. Леонов Е.Г. Гидроаэромеханика в бурении /Е.Г. Леонов, В.И. Исаев. – М.: Недра, 1987. – 304с.

Сведения об авторах:

**Назаров Вячеслав Владимирович**, доцент кафедры детали машин и прикладная механика Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент  
**Кушнарченко Владимир Михайлович**, заведующий кафедрой детали машин и прикладная механика Оренбургского государственного университета, доктор технических наук, профессор  
 460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, ауд. 4310, тел. (3532)372561, e-mail: vmkushnarenko@mail.ru