

Научная статья

УДК [637.5.002.62-404.2:665.221]:532.133

DOI: 10.17586/2310-1164-2021-14-3-38-48

## Оригинальная методика экспериментального нахождения коэффициента динамической вязкости для высоковязких сред и его определение для бараньего курдючного жира

А.А. Эльмурзаев<sup>1</sup>, Н.Д. Айсунгуров<sup>1</sup>, И.Ю. Алексанян<sup>2</sup>, С.Д. Руднев<sup>3</sup>, А.Х.-Х. Нугманов<sup>2\*</sup><sup>1</sup>Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, Грозный<sup>2</sup>Астраханский государственный технический университет, Россия, Астрахань, \*albert909@yandex.ru<sup>3</sup>Кемеровский государственный университет, Россия, Кемерово

**Аннотация.** Определяли плотность и коэффициент динамической вязкости бараньего курдючного жира, превосходящий по своей сбалансированности другие виды животных жиров. Для определения его физической плотности применяли пикнометрический метод, в котором была скорректирована расчетная формула, основанная на принципе аддитивности, т.к. определяемая характеристика подчиняется этому правилу. В ходе серии экспериментов установлена средняя величина физической плотности курдючного жира, равная 802 кг/м<sup>3</sup>. Представлена оригинальная методика, позволяющая посредством структурометра СТ-2 экспериментально определять значения коэффициента динамической вязкости для различных высоковязких сред, апробированная на примере полуфабриката из измельченного бараньего курдючного жира. Показан алгоритм расчета коэффициента динамической вязкости для исследуемого диспергированного курдючного сала, реализовав который определено его численное значение – 567,6 Па·с. Представленное исследование актуально, поскольку систематизация достоинств и недостатков известных подходов к определению вязкостных характеристик показала, что традиционные критериальные уравнения, в частности уравнение Стокса, описывающее кинетику гравитационного осаждения для ламинарного режима, которое можно было бы использовать для экспериментального нахождения коэффициента динамической вязкости для высоковязких сред, практически не пригодны.

**Ключевые слова:** реология; физико-механические свойства сырья; экспериментальные методики; физическая плотность; динамическая вязкость; структурометры; курдючный жир

Original article

## An original method for the experimental determination of the dynamic viscosity coefficient for high-viscosity media and its determination for sheep tail fat

Ayub A. Elmurzaev<sup>1</sup>, Nokha D. Aisungurov<sup>1</sup>, Igor Yu. Aleksanian<sup>2</sup>, Sergey D. Rudnev<sup>3</sup>, Albert H.-H. Nugmanov<sup>2\*</sup><sup>1</sup>Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia<sup>2</sup>Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, \*albert909@yandex.ru<sup>3</sup>Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

**Abstract.** The purpose of this study was to determine the density and coefficient of dynamic viscosity of lamb tail fat. To determine the physical density of the object the well-known pycnometric method was used, in which the calculation formula based on the principle of additivity was corrected, since the defined characteristic obeys this rule. After the series of experiments, the average value of the physical density of tail fat was determined, equal to 802 kg/m<sup>3</sup>. This article presents an original technique that allows using the ST-2 structuremeter to experimentally determine the values of the dynamic viscosity coefficient for various high-viscosity media, tested on the example of a semi-finished product from the minced lamb tail fat. The authors present an original algorithm for calculating the dynamic viscosity coefficient for the dispersed fat under study, by implementing which its numerical value is determined – 567.6 Pa·s. The research presented in the article is relevant, since the systematization of the advantages and disadvantages of the known approaches to determining the viscosity characteristics has shown that the traditional criterion equations, in particular the Stokes equation describing the kinetics of gravitational deposition for the laminar regime, which could be used for experimental determination of the dynamic viscosity coefficient for high-viscosity media, are practically not suitable.

**Keywords:** rheology; physical and mechanical properties of raw materials; experimental methods; physical density; dynamic viscosity; structuremeters; chicken fat

## Введение

В последние годы возрос интерес исследователей к экструдированным, т.е. к продуктам с развитой структурой, полученным на базе сырья животного происхождения, в первую очередь, как к источнику высококачественных жиров, а также как основе продуктов лечебно-профилактического питания различных технологических форм. Одним из перспективных направлений в этой области является расширение ассортимента продуктов с развитой структурой, в частности, за счет использования бараньего курдючного жира, путем изменения их вкуса и аромата натуральным дымным копчением, что обеспечивает увеличение сроков их хранения [1, 2].

В данном случае объектом исследования является неньютоновская высоковязкая среда (измельченный курдючный жир), которая не обладает естественной текучестью, а сдвиг (условная вязкость) наблюдается при внешнем воздействии, т.е. избыточном искусственно созданном давлении на продукт, при этом традиционные вискозиметры использовать не представляется возможным.

Систематизация достоинств и недостатков известных технологий копченого курдючного сала, а также изучение и анализ комплекса его целевых характеристик и теплотехнических параметров процедуры обезвоживания гранул с защитным покрытием позволит не только скомпоновать рациональный технологический поток производства данного продукта, но и определить рациональные режимные параметры реализации его стадий. Опираясь на предварительное постановочное тестирование отдельных стадий, рекомендована рациональная компоновка технологического потока производства гранулированной копченой продукции из курдючного сала, в котором предусмотрены операции формирования продукта в виде полого цилиндра и дальнейшее преобразование его в гранулы в виде колец, в связи с чем для оценки кинетики и эффективности этих процессов становится очевидной необходимость определения плотности и вязкости объекта исследования.

Применение ротационных вискозиметров также вызывает значительные трудности и погрешности при определении условной вязкости, т.к. ротор, вследствие контакта с жирной (смазочной) средой при ее движении остается практически неподвижным, поэтому определение условной вязкости таких материалов возможно в современных реоустановках, в частности Instron или как в нашем случае структурометр СТ-2. Однако, в отличие от других структурно-механических и реологических характеристик общепринятой апробированной методики определения вязкости для данного оборудования и подобных материалов в настоящий момент не приводятся как в паспорте на него, так и открытых литературных источниках.

Большинство высоковязких пищевых сред, как и бараний курдючный жир, относят к коллоидным, при этом они, как правило, еще и многофазные, поэтому в процессе механической обработки, в частности формирования, структура их дисперсных систем может разрушаться и восстанавливаться, а условия деструкции и обратного структурирования для различных продуктов могут значительно различаться. В этой связи интересна обзорная статья А.Ю. Круподерова, Л.К. Николаева и А.В. Кузнецова [3], в которой были рассмотрены работы ряда отечественных и иностранных авторов, связанных с исследованиями зависимости эффективной вязкости [4–6] и касательных напряжений вязких продуктов от градиента скорости и ряда других факторов [7–9]. Авторами были отмечены особенности структурно-механических свойств вязких продуктов [10–12], а также факторы, влияющие на их изменение, приведены результаты собственных исследований, в области механической обработки жиросодержащих продуктов с аномальной вязкостью [13, 14].

Из анализа рассмотренных публикаций следует, что большинство вязких пищевых продуктов (и объект исследования здесь не является исключением) обладают псевдопластичными свойствами, а их реологические свойства могут изменяться в зависимости от применяемого приема механической обработки, являющейся системной единицей реализуемой технологии копченого курдючного сала. К тому же, этот анализ показал, что на сегодняшний момент не представлено конкретных рекомендаций по выбору того или иного способа, позволяющего с достаточной для инженерных расчетов точностью, экспериментально определить величину коэффициента динамической вязкости для высоковязких продуктов.

Цель исследования – определение плотности и коэффициента динамической вязкости бараньего курдючного жира. Для ее достижения решались следующие задачи:

- ✓ определение плотности объекта исследования;
- ✓ разработка оригинальной методики экспериментального нахождения коэффициента динамической вязкости для высоковязких сред;
- ✓ определение коэффициента динамической вязкости для бараньего курдючного жира.

### Объекты и методы исследования

Объектом исследования явился бараний курдючный жир, который по своей сбалансированности превосходит другие виды животных жиров.

Одной из основных характеристик пищевого материала является его физическая плотность, определяемая, например, пикнометрическим методом, описанным в работе [15] и в ГОСТ Р 8.736 – 2011 ГСИ. Мерная колба – пикнометр позволяет с высокой точностью измерить как массу материала, так и его объем. Объем определяется заполнением чистого и сухого сосуда до метки или до верха капилляра, а массу же вычисляют путем взвешивания пустого сосуда и сосуда, заполненного жидкостью. В нашем случае, когда требуется вычислить плотность твердого вещества, то сосуд заполняют жидкостью, в которой исследуемое вещество не растворяется. В формуле для вычисления плотности учитывается вес заполненного жидкостью пикнометра, вес исследуемого вещества и плотность полученной суспензии, равная отношению суммы весов жидкости и образца к известному объему пикнометра.

Ниже представлена формула для расчета физической плотности исследуемого материала, в основе которой положен принцип аддитивности, т.к. определяемая характеристика подчиняется этому правилу

$$\rho_{\phi} = \frac{x_{\text{обр}}}{\frac{1}{\rho_{\text{сус}}} - \frac{x_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}}} \quad (\text{г/мл}), \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{сус}} = \frac{m_{\text{обр}} + m_{\text{ж}}}{V_{\text{п}}}$  – плотность полученной суспензии, г/мл;

$x_{\text{обр}} = \frac{m_{\text{обр}}}{m_{\text{обр}} + m_{\text{ж}}}$  – доля исследуемого материала в суспензии;

$x_{\text{ж}} = \frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{обр}} + m_{\text{ж}}}$  – доля эталонной жидкости в суспензии;

$V_{\text{п}}$  – объем пикнометра, мл;

$m_{\text{обр}}$  – масса образца, г;

$m_{\text{ж}}$  – масса жидкости, г.

Определение вязкости исследуемого сала производилось на структурометре СТ-2 (рисунок 1) [16, 17]. Следует отметить, что традиционные критериальные уравнения [18–20], описывающие кинетику гравитационного осаждения, в частности, уравнение Стокса для ламинарного режима, которые можно было бы использовать для экспериментального нахождения вязкости в случае применения структурометра СТ-2 для высоковязких сред таких, как курдючный жир, не пригодны [21]. Это связано с тем, что в данном случае индентор не будет осаждаться под действием силы тяжести в курдючном измельченном сале и для его продвижения необходимо создание дополнительных усилий для преодоления сопротивления исследуемой среды. В этой связи в исходном уравнении гравитационного осаждения появляется дополнительная сила, вследствие чего необходимо получить модифицированное критериальное уравнение с учетом вышеизложенного.



Рисунок 1 – Структурометр СТ-2  
Figure 1. Structrometer ST-2

Рассмотрим физическую модель продвижения индентора в исследуемой среде при дополнительном усилии на преодоление ее силы сопротивления его перемещению (рисунок 2).

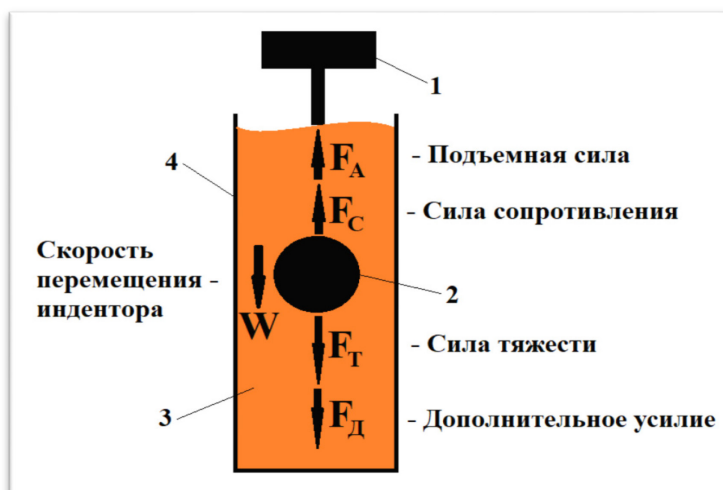


Рисунок 2 – Динамическая модель движения индентора:  
1 – индентор; 2 – рабочий элемент индентора; 3 – исследуемая среда; 4 – резервуар  
Figure 2. Dynamic model of indenter motion:  
1 – indenter; 2 – working element of the indenter; 3 – investigated environment; 4 – reservoir

Согласно динамической модели движения индентора (рисунок 2) уравнение суммы сил, действующих на него, представляется в виде

$$F_T + F_D - F_A - F_C = F_{ин}, \quad (2)$$

где  $F_T = m_T g$  ;

$F_D = m_ж g$  ;

$F_A = m_ж g$  ;

$F_C = \mu S \frac{dW}{dn}$  ;

$F_{ин} = m_T \frac{dW}{d\tau}$ , Н;

$m_T$  – масса индентора, кг;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$m_{ж}$  – масса вытесненной исследуемой среды, кг;

$a$  – ускорение от приложенной  $F_{д}$ , м/с<sup>2</sup>;

$\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;

$S$  – площадь поверхности рабочего органа индентора, м<sup>2</sup>;

$\frac{dW}{dn}$  – градиент скорости, с<sup>-1</sup>;

$\frac{dW}{d\tau}$  – ускорение от  $F_{ин}$ , м/с<sup>2</sup>.

Согласно допущениям, принятым в теории физического подобия [22, 23], величины, входящие в уравнение (2), заменяем величинами им пропорциональными

$$C_1 d^3 \rho_T g + C_1 d^3 \rho_T a - C_1 d^3 \rho_{ж} g - \mu C_2 d^2 \frac{W}{d} = C_1 d^3 \rho_T \frac{dW}{d\tau}, \quad (3)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – коэффициенты формы при объеме и площади поверхности рабочего органа индентора соответственно, которые равны единице, вследствие шарообразной формы рабочего органа;

$d$  – диаметр рабочего органа индентора, м;

$\rho_T$  – плотность материала индентора, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{ж}$  – плотность исследуемой среды, кг/м<sup>3</sup>.

Данное выражение, представляющее собой модифицированное дифференциальное уравнение, описывающее продвижение индентора в исследуемой среде, не может быть решено в общем виде традиционными математическими методами, т.к. количество неизвестных в нем превышает число уравнений в системе, поэтому решение данного уравнения целесообразно провести с использованием теории подобия.

Исходя из того, что скорость индентора в эксперименте постоянна, то  $\frac{dW}{d\tau} = 0$ , и как следствие,

$F_{ин} = 0$ . Тогда преобразованное уравнение (3) примет следующий вид

$$d^3 \rho_T g + d^3 \rho_T a - d^3 \rho_{ж} g - \mu d^2 \frac{W}{d} = 0. \quad (4)$$

Проведя математические преобразования уравнения (4) получим

$$d^3 g (\rho_T - \rho_{ж}) + d^3 \rho_T a - \mu d^2 \frac{W}{d} = 0;$$

$$d^3 g (\rho_T - \rho_{ж}) - \mu d^2 \frac{W}{d} = -d^3 \rho_T a;$$

$$\mu W d - d^3 g (\rho_T - \rho_{ж}) = d^3 \rho_T a. \quad (5)$$

Согласно теории подобия, можно использовать критерии и их произведения, также любой из комплексов можно умножить на симплекс, в частности на  $-\frac{\rho_T}{\rho_{ж}}$  (отношение плотностей). В итоге,

поделив левую часть уравнения (5) на правую часть, получим искомые безразмерные критерии подобия.

Первый критерий

$$\frac{\mu W d}{d^3 \rho_T a} = \frac{\mu W}{d^2 \rho_T a}. \quad (6)$$

Так как физический смысл данного критерия (6) состоит в том, что он обуславливает соотношение сил инерции (скорость) и сил вязкости, то его можно обозначить как модифицированный критерий Рейнолдса –  $Re_m$ . Для приближения к традиционной форме данного критерия возьмем его обратную величину, что допускается в теории подобия [23, 24]

$$Re_m = \frac{d^2 \rho_T a}{\mu W}. \tag{7}$$

Второй критерий

$$\frac{d^3 g(\rho_T - \rho_{ж})}{d^3 \rho_T a} = \frac{g(\rho_T - \rho_{ж})}{\rho_T a} \cdot \frac{\rho_T}{\rho_{ж}} = \frac{g}{a} \cdot \left( \frac{\rho_T - \rho_{ж}}{\rho_{ж}} \right). \tag{8}$$

Согласно наличию в данном критерии (8) множителя  $\left( \frac{\rho_T - \rho_{ж}}{\rho_{ж}} \right)$  по физическому смыслу данный комплекс можно обозначить как модифицированный критерий Архимеда –  $Ar_m$

$$Ar_m = \frac{g}{a} \cdot \left( \frac{\rho_T - \rho_{ж}}{\rho_{ж}} \right). \tag{9}$$

Так как классически критериальные уравнения представляются в степенной форме, получим искомое соотношение в следующем виде

$$Re_m = K Ar_m^x, \tag{10}$$

где  $K$  и  $x$  – являются эмпирическими коэффициентами.

Таким образом, мы имеем две неизвестных переменных в уравнении (10), вследствие чего необходимо провести два корректных эксперимента с модельными средами близкие по своему строению и находящиеся в данной области физического подобия, для которых известен коэффициент динамической вязкости. В итоге решив систему из двух степенных уравнений можно найти искомые коэффициенты  $K$  и  $x$ .

### Результаты и их обсуждение

Результаты экспериментов по определению величин, входящих в формулу (1) и расчет физической плотности курдючного полуфабриката представлены в таблице 1.

Таблица 1. Данные экспериментов по определению физической плотности диспергированного курдючного сала в пикнометре объемом 50 мл

Table 1. Data from experiments to determine the physical density of dispersed tail fat in a 50 ml pycnometer

Эксперимент	Масса образца, г	Масса жидкости, г	Плотность суспензии, г/мл	Плотность образца, кг/м <sup>3</sup>
1	5,91	42,64	0,971	803
2	6,58	41,82	0,968	804
3	7,41	40,74	0,963	800
4	5,40	43,24	0,973	799
5	8,20	39,77	0,959	802
Среднее значение				802

В качестве модельных сред использовалось свиное сало плотностью 890 кг/м<sup>3</sup> в разном агрегатном состоянии при температурах 25 и 38°С. Для данного продукта хорошо известен коэффициент динамической вязкости, величина которого зависит от температуры [25]. Значения этого вязкостного параметра для выбранной модельной среды и при различных температурах представлены в таблице 2.

Таблица 2. Динамическая вязкость свиного сала для выбранных температур

Table 2. Dynamic viscosity of lard for selected temperatures

Наименование	Температура, °С	Динамическая вязкость, Па·с	Температура, °С	Динамическая вязкость, Па·с
Свиное сало	25	1250	38	40

Результаты экспериментов по определению силы продвижения индентора сквозь модельную среду  $F_D$  представлены в таблице 3.

Таблица 3. Опытные данные по силе продвижения индентора сквозь модельный продукт  
 Table 3. Experimental data on the force of advancement of the indenter through the model product

Эксперимент	Температура, °C	$F_d$ , Н	Температура, °C	$F_d$ , Н
1	25	0,108	38	0,0015
2	25	0,117	38	0,0009
3	25	0,103	38	0,0019
4	25	0,113	38	0,0016
5	25	0,098	38	0,0014
Среднее значение		0,108		0,0015

Для дальнейших исследований необходима информация о самом инденторе, которая представлена в таблице 4.

Таблица 4. Характеристики индентора  
 Table 4. Indentor characteristics

Наименование	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Масса, кг	Диаметр рабочего органа, м	Скорость движения, м/с
Индентор	7800	0,0286	0,015	0,001

Находим ускорение  $a$ , (м/с<sup>2</sup>) от силы  $F_d$ , (Н) для двух вариантов проведения экспериментальных исследований, поделив  $F_d$  на массу индентора

$$a(25^\circ \text{C}) = 3,77 \text{ м/с}^2; a(38^\circ \text{C}) = 0,052 \text{ м/с}^2.$$

Далее вычислим критерии Архимеда и Рейнольдса из полученных ранее безразмерных комплексов (7) и (9) для тех же двух вариантов проведения экспериментальных исследований

$$Ar_m(25^\circ \text{C}) = 20,187; Ar_m(38^\circ \text{C}) = 1480;$$

$$Re_m(25^\circ \text{C}) = 5,293; Re_m(38^\circ \text{C}) = 2,282.$$

Далее составим систему, состоящую из двух степенных уравнений

$$\begin{cases} 5,293 = K \cdot 20,187^x \\ 2,282 = K \cdot 1480^x \end{cases}.$$

Решив данную систему уравнений для модельной среды (свиной жир) при различных температурах были получены искомые эмпирические коэффициенты:  $K = 9,536$  и  $x = -0,196$ .

Таким образом, критериальное уравнение для продуктов, подобных модельным, можно представить в виде

$$Re_m = 9,536 Ar_m^{-0,196}. \tag{11}$$

Посредством уравнения в обобщенных переменных (11) можно определить любой параметр, входящий в формулы критериев, зная величины всех остальных параметров. В нашем случае определяем коэффициент динамической вязкости  $\mu$  (Па·с) для курдючного сала, который входит в формулу критерия  $Re_m$  по следующему алгоритму.

1. Проводим эксперимент на структуромере СТ-2 для нахождения усилия проталкивания  $F_d$  индентора при его фиксированной скорости (рисунок 3), на основании чего вычисляем ускорение от этой силы.
2. Зная все значения параметров, входящих в критерий  $Ar_m$ , находим его величину.
3. Из уравнения (11) находим критерий  $Re_m$ .
4. Из величины критерия  $Re_m$  определим коэффициент динамической вязкости.

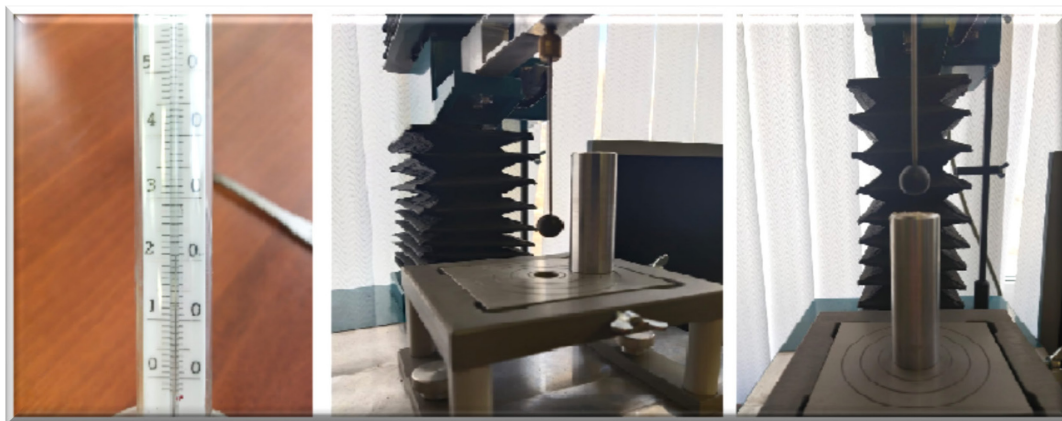


Рисунок 3 – Проведение эксперимента на структуромере СТ-2  
 Figure 3. Carrying out an experiment on the ST-2 structometer

Реализуем вышеизложенный алгоритм расчета коэффициента динамической вязкости для исследуемого диспергированного курдючного сала.

На основе проведенного экспериментального исследования получена графическая зависимость усилия проталкивания от времени при фиксированной скорости движения индентора (рисунок 4).

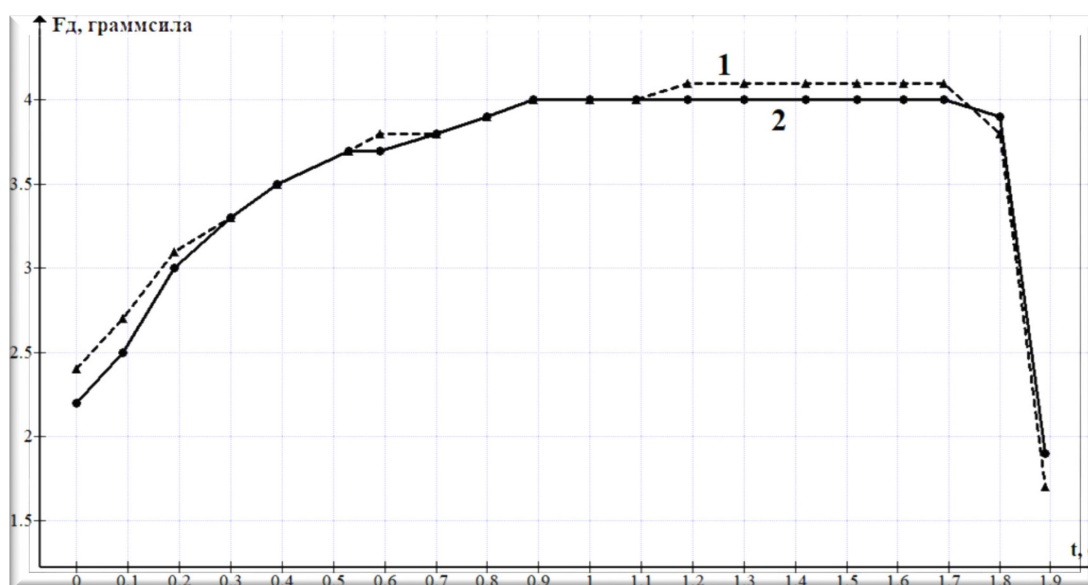


Рисунок 4 – График зависимости усилия проталкивания от времени при фиксированной скорости движения индентора, равной 0,001 м/с, и температуре 20°С, а также двукратном дублировании эксперимента (относительная погрешность менее 1%): 1 – эксперимент 1; 2 – эксперимент 2

Figure 4. Graph of the pushing force versus time at a fixed indenter speed of 0.001 m/s and a temperature of 20°C, as well as at two-fold duplication of the experiment (relative error is less than 1%): 1 – experiment 1; 2 experiment 2

Исключая пусковой момент движения индентора и зону его торможения в конце траектории, взяв за основу стационарный режим перемещения, находим усилие, переводя грамм-силы в Ньютоны.  
 $F_{д} = 4 \cdot 0,00981 = 0,03924 \text{ Н}$ .

Вычисляем ускорение от этой силы  $a = 1,375 \text{ м/с}^2$ .

Находим критерий  $Ar_m = 62,39$ .

Находим критерий  $Re_m = 9,536 \cdot 62,39^{-0,196} = 4,242$ .

Из величины критерия  $Re_m$  определим  $\mu$

$$\mu = 0,015^2 \cdot 7800 \cdot \frac{1,372}{0,001 \cdot 4,242} = 567,6 \text{ Па}\cdot\text{с}$$



## Выводы

Следует отметить, что рекомендуемая методика практически универсальна, однако в случае радикального изменения консистенции объекта исследования, т.е. при значительном его отличии по свойствам от модельных образцов, необходимо для другой области подобных продуктов провести дополнительные эксперименты и определить соответствующие коэффициенты в критериальном уравнении (11). Кроме того, в варианте сравнительно маловязких жидких сред, в которых перемещение индентора может осуществляться под действием только гравитационной силы, без дополнительного усилия, можно воспользоваться уравнением Стокса в случае ламинарного режима течения, или при изменении режима можно использовать критериальное уравнение гравитационного осаждения для внешней гидродинамической задачи, т.е. при обтекании жидкой среды твердого тела.

## Литература

1. Ткачев О.А. Разработка и исследование способа вакуум-электро-статического копчения экструдированных продуктов: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Воронеж, 2013. 21 с.
2. Сухарев И.Н. Совершенствование процесса копчения мясных изделий под избыточным давлением: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2016. 195 с.
3. Круподеров А.Ю., Николаев Л.К., Кузнецов А.В. Реологические характеристики аномально вязких пищевых продуктов и других сред // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. № 4. С. 96–106.
4. Николаев Б.Л., Николаев Л.К., Денисенко А.Ф., Круподеров А.Ю., Кузнецов А.В. Влияние температуры продукта, градиента скорости и касательных напряжений на реологические характеристики майонеза провансаль «Колибри» // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. №1. С. 85–89.
5. Денисенко А.Ф., Николаев Б.Л., Круподеров А.Ю., Мовчанюк Е.В., Николаев Л.К. Влияние механической и тепловой обработки на реологические свойства смеси мороженого «Пломбир шоколадный» // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2012. № 2. С. 17.
6. Николаев Л.К., Денисенко А.Ф., Николаев Б.Л., Круподеров А.Ю. Кинетика реологических свойств кулинарного жира «Фритюрный» // Сборник трудов 26-го Симпозиума по реологии. Тверь, 2012. № 2. С. 128–129.
7. Debon J., Prudêncio E.S., Petrus J.C.C. Rheological and physico-chemical characterization of prebiotic microfiltered fermented milk. *Journal of Food Engineering*. 2010, no. 99, pp. 128–135.
8. Rascon-Diaz M.P., Tejero J.M., Mendoza-Garcia P.G., Garcia H.S., Salgado-Cervantes M.A. Spray drying yogurt incorporating hydrocolloids: structural analysis, acetaldehyde content, viable bacteria, and rheological properties. *Food Bioprocess Technol.* 2012, no. 5, pp. 560–567.
9. Aportela-Palacios A., Sosa-Morales M.E., Velez-Ruiz J.F. Rheological and physicochemical behavior of fortified yogurt, with fiber and calcium. *Journal of Texture Studies*. 2005, no. 36, pp. 333–349.
10. Mandala I.G., Savvas T.P., Kostaropoulos A.E. Xanthan and locust bean gum influence on the rheology and structure of a white model-sauce. *Journal of Food Engineering*. 2004, no. 64, pp. 335–342.
11. Koocheki A., Ghandi A., Razavi S.M.A., Mortazavi S.A., Vasiljevic T. The rheological properties of ketchup as a function of different hydrocolloids and temperature. *International Journal of Food Science and Technology*. 2009, no. 44, pp. 596–602.
12. Zhang M., Chen Y., Li G., Zongliang D. Rheological properties of fish skin collagen solution effects of temperature and concentration. *Korea-Australia Rheology Journal*. 2010, V. 22, no. 2, pp. 119–127.
13. Schantz B., Rohm H. Influence of lecithin-PGPR blends on the rheological properties chocolate. *LWT – Food Science and Technology*. 2005, no. 38, pp. 41–45.
14. Hassan A.N., Frank J.F., Schmidt K.A., Shalabi S.I. Rheological properties of yogurt made with encapsulated nonpropylactic cultures. *Journal of Dairy Science*. 1996, V. 79, no. 12, pp. 2091–2097.
15. Зайдель А.Н. Ошибки измерений физических величин: методические рекомендации. СПб.: Лань, 2005. 112 с.
16. Пилипенко Т.В., Старцева Т.Д. Изучение реологических характеристик кексов с использованием «Структурометра ст-2» // Национальный форум молодых исследователей: сб. тр. Петрозаводск: Новая Наука, 2019. С. 7–11.
17. Сорокин С.С., Малец А.И., Ульянова А.А. Определение структурно-механических свойств хлебного мякиша ржаного хлеба прибором «Структурометр ст-2» // Сурский вестник. 2019. № 4(8). С. 65–68.
18. Abbas K.A., Abdulkarim S.M., Saleh A.M., Ebrahimian M. Suitability of viscosity measurement methods for liquid food variety and applicability in food industry – A review. *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 2010, V. 8, no. 3&4, pp. 100–107.

19. Tabilo G., Barbosa-Cánovas G.V. Rheology for the food industry. *Journal of Food Engineering*. 2005, V. 67, no. 1, pp. 147–156.
20. Cullen P.J., Duffy A.P., O'Donnell C.P., O'Callaghan D. Process viscometry for the food industry. *Trends in Food Science & Technology*. 2000, V. 11. pp. 451–457.
21. Веденяпин В.В., Смирнова Н.С. Уравнения Эйлера и Навье–Стокса как следствия уравнений типа Власова // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2019. № 41. С. 1–20.
22. Курагин В.А., Астахова Т.Н. Анализ размерности и метод подобия в решении физических задач // Научная дискуссия: вопросы математики, физики, химии, биологии. 2016. № 4(32). С. 82–89.
23. Сухарев Е.М. Изучение метода размерностей и теории физического подобия на примере задачи о движении тела под действием постоянной силы // Аллея науки. 2018. Т.1. № 3(19). С. 668–670.
24. Макаров К.А. О физическом смысле числа Рейнольдса и других критериев гидродинамического подобия // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. № 1(25). С. 12.
25. Горбатов А.В. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов: Справочник. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. 296с.

## References

1. Tkachev O.A. Development and research of a method for vacuum-electro-static smoking of extruded products. *Extended abstract of candidate's thesis*. Voronezh, 2013. 21 p. (In Russian)
2. Sukharev I.N. Improvement of the process of smoking meat products under excessive pressure. *Candidate's thesis*. Voronezh, 2016. 195 p. (In Russian)
3. Krupoderov A.Yu., Nikolaev L.K., Kuznetsov A.V. Rheological characteristics of abnormally viscous food products and other media. *Processes and Food Production Equipment*. 2014, no. 4, pp. 96–106. (In Russian)
4. Nikolaev B.L., Nikolaev L.K., Denisenko A.F., Krupoderov A.Yu., Kuznetsov A.V. The influence of the temperature of the product, velocity gradient and tangential stresses on the rheology characteristics of mayonnaise, mayonnaise "Kolibri". *Processes and Food Production Equipment*. 2013, no. 1, pp. 85–89. (In Russian)
5. Denisenko A.F., Nikolaev B.L., Krupoderov A.Yu., Movchanyuk E.V., Nikolaev L.K. Influence of mechanical and heat treatment on the rheological properties of ice cream mixture "Chocolate Sundae". *Processes and Food Production Equipment*. 2012, no. 2. (In Russian)
6. Nikolaev L.K., Denisenko A.F., Nikolaev B.L., Krupoderov A.Yu. Kinetics of the rheological properties of "Frying" cooking oil. *Proceedings of the 26th Symposium on Rheology*. Tver, 2012, no. 2. pp. 128–129. (In Russian)
7. Debon J., Prudêncio E.S., Petrus J.C.C. Rheological and physico-chemical characterization of prebiotic microfiltered fermented milk. *Journal of Food Engineering*. 2010, no. 99, pp. 128–135.
8. Rascon-Diaz M.P., Tejero J.M., Mendoza-Garcia P.G., Garcia H.S., Salgado-Cervantes M.A. Spray drying yogurt incorporating hydrocolloids: structural analysis, acetaldehyde content, viable bacteria, and rheological properties. *Food Bioprocess Technol*. 2012, no. 5, pp. 560–567.
9. Aportela-Palacios A., Sosa-Morales M.E., Velez-Ruiz J.F. Rheological and physicochemical behavior of fortified yogurt, with fiber and calcium. *Journal of Texture Studies*. 2005, no. 36, pp. 333–349.
10. Mandala I.G., Savvas T.P., Kostaropoulos A.E. Xanthan and locust bean gum influence on the rheology and structure of a white model-sauce. *Journal of Food Engineering*. 2004, no. 64, pp. 335–342.
11. Koocheki A., Ghandi A., Razavi S.M.A., Mortazavi S.A., Vasiljevic T. The rheological properties of ketchup as a function of different hydrocolloids and temperature. *International Journal of Food Science and Technology*. 2009, no. 44, pp. 596–602.
12. Zhang M., Chen Y., Li G., Zongliang D. Rheological properties of fish skin collagen solution effects of temperature and concentration. *Korea-Australia Rheology Journal*. 2010, V. 22, no. 2, pp. 119–127.
13. Schantz B., Rohm H. Influence of lecithin-PGPR blends on the rheological properties chocolate. *LWT – Food Science and Technology*. 2005, no. 38, pp. 41–45.
14. Hassan A.N., Frank J.F., Schmidt K.A., Shalabi S.I. Rheological properties of yogurt made with encapsulated nonropy lactic cultures. *Journal of Dairy Science*. 1996, V. 79, no. 12, pp. 2091–2097.
15. Zaidel A.N. *Measurement errors of physical quantities: guidelines*. St. Petersburg, Lan' Publ., 2005. 112 p. (In Russian)
16. Pilipenko T.V., Startseva T.D. Study of rheological characteristics of muffins using "Structurometer st-2". *National Forum of Young Researchers*. Collection of works. Petrozavodsk, New Science Publ., 2019. pp. 7–11. (In Russian)
17. Sorokin S.S., Malets A.I., Ulyanova A.A. Determination of the structural and mechanical properties of rye bread crumb using the "Structurometer st-2" device. *Surskiy Vestnik*. 2019, no. 4, pp. 65–68 (In Russian)
18. Abbas K.A., Abdulkarim S.M., Saleh A.M., Ebrahimian M. Suitability of viscosity measurement methods for liquid food variety and applicability in food industry – A review. *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 2010, V. 8, no. 3&4, pp. 100–107.
19. Tabilo G., Barbosa-Cánovas G.V. Rheology for the food industry. *Journal of Food Engineering*. 2005, V. 67, no. 1, pp. 147–156.

20. Cullen P.J., Duffy A.P., O'Donnell C.P., O'Callaghan D. Process viscometry for the food industry. *Trends in Food Science & Technology*. 2000, V. 11. pp. 451–457.
21. Vedenyapin V.V., Smirnova N.S. Euler and Navier-Stokes equations as consequences of Vlasov-type equations. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha*. 2019, no. 41, pp. 1–20. (In Russian)
22. Kuragin V.A., Astakhova T.N. Dimensional analysis and similarity method in solving physical problems. *Scientific Discussion: Questions of Mathematics, Physics, Chemistry, Biology*. 2016, no. 4, pp. 82–89. (In Russian)
23. Sukharev E.M. Study of the method of dimensions and the theory of physical similarity on the example of the problem of the motion of a body under the action of a constant force. *Alley of Science*. 2018, V. 1, no. 3, pp. 668–670. (In Russian)
24. Makarov K.A. On the physical meaning of the Reynolds number and other criteria of hydrodynamic similarity. *Engineering Journal: Science and Innovations*. 2014, no. 1, p. 12. (In Russian)
25. Gorbatov A.V. *Structural and mechanical characteristics of food*. Moscow, Light and Food Industry Publ., 1982. 296 p. (In Russian)

#### *Информация об авторах*

Аюб Абдулаевич Эльмурзаев – канд. техн. наук, и.о. зав. кафедрой технологические машины и оборудование  
Ноха Джабраилович Айсунгуров – ассистент кафедры технологические машины и оборудование  
Игорь Юрьевич Алексанян – д-р техн. наук, профессор кафедры технологические машины и оборудование  
Сергей Дмитриевич Руднев – д-р техн. наук, профессор кафедры машины и аппараты технологических систем  
Альберт Хамед-Харисович Нугманов – д-р техн. наук, доцент кафедры технологические машины и оборудование

#### *Information about the authors*

Ayub A. Elmurzaev, Ph.D., Acting Head of the Department Technological Machines and Machinery  
Nokha D. Aisungurov, Assistant of the Department Technological Machines and Equipment  
Igor Yu. Aleksanian, D. Sc., Professor of the Department of Technological Machines and Equipment  
Sergey D. Rudnev, D. Sc., Professor of the Department Machines and Devices of Technological Systems  
Albert H.-H. Nugmanov, D. Sc., Associate Professor of the Department of Technological Machines and Equipment

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

*Статья поступила в редакцию 27.07.2021*

*Одобрена после рецензирования 15.09.2021*

*Принята к публикации 20.09.2021*

*The article was submitted 27.07.2021*

*Approved after reviewing 15.09.2021*

*Accepted for publication 20.09.2021*