

Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, e-mail: [kazakova.ev@rgau-msha.ru](mailto:kazakova.ev@rgau-msha.ru)

Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Russia, Moscow, e-mail: [rector@rgau-msha.ru](mailto:rector@rgau-msha.ru)

**Abstract:** *The demand for meat obtained from the ritual slaughter of cattle is increasing every year. In this regard, studying the influence of kosher and halal slaughter and the influence of these types of slaughter in comparison with classical technology on the quality characteristics of raw meat is a very urgent task. When analyzing the results obtained, we came to the conclusion that the meat obtained as a result of halal slaughter of cattle was distinguished by the best functional-technological, structural-mechanical, microstructural indicators*

**Key words:** *slaughter technology, ritual slaughter, classical slaughter, halal, kosher, meat, beef*

УДК 602.4

## РЕОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭКСТРУЗИИ В ОДНОШНЕКОВОМ ПРЕСС-ГРАНУЛЯТОРЕ

**Доня Денис Викторович**, канд. техн. наук, доцент кафедры Процессов и аппаратов перерабатывающих производств, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», e-mail: [d.donya@rgaumcxa.ru](mailto:d.donya@rgaumcxa.ru)

**Попов Анатолий Михайлович**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры Мехатроники и автоматизации технологических систем, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», e-mail: [popov4116@yandex.ru](mailto:popov4116@yandex.ru)

**Бородулин Дмитрий Михайлович**, д-р техн. наук, профессор, директор Технологического института, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», e-mail: [borodulin@rgau-msha.ru](mailto:borodulin@rgau-msha.ru)

ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», Россия, Москва, e-mail: [rector@rgau-msha.ru](mailto:rector@rgau-msha.ru)

**Аннотация:** в статье рассмотрены некоторые вопросы поведения биоматериалов при экструзии в шнековом пресс-грануляторе, а также получения и обработки кривых течения по различным реологическим уравнениям.

**Ключевые слова:** шнек, экструдер, реология, кривые течения, реологические уравнения.

Одношнековые экструдеры впервые были использованы для экструзии в начале 1930-х годов. Их применение в пищевой промышленности началось в 1935 году, когда впервые был применен одношнековый экструдер для непрерывной экструзии макаронных изделий [9]. В настоящее время экструзия применяется в самых разнообразных процессах: при приготовлении снежков, круп, макаронных изделий, кондитерских изделий, кормов для животных, колбасных изделий, белковых добавок, аналогов мяса, порошковых напитков, хлебобулочных изделий и т.д.

В процессе экструзии пищевого материала происходит несколько процессов, материал подвергается значительным сдвигающим усилиям и перемешивается. Тепло, выделяемое при вязком рассеянии механической энергии, а также при добавлении дополнительного тепла приводит к желатинизации крахмалов, денатурации белков, варке или даже стерилизации. В пресс-форме материал формируется, в то время как резкое снижение давления на выходе из пресс-формы может привести к вспучиванию или (мгновенной) сушке пищевого материала [3]. Одношнековый экструдер в основном применяется для производства макаронных изделий, кондитерских изделий, кормов для домашних животных, белковых добавок и аналогов мяса. Пищевой материал подается в устройство из бункера. Затем материал подхватывается направляющими, которые перемещают его по каналу экструдера и начинают перерабатывать в пластифицированную массу или тесто. Через секцию сжатия, где диаметр шнека обычно несколько увеличивается, материал поступает в секцию дозирования, где диаметр шнека остается постоянным. Матрица расположена в конце секции дозирования. Температура в секциях дозирования при сжатии может достигать  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а давление до  $2 \cdot 10^7\text{ Па}$ .

Знание схемы течения материала внутри экструдера позволяют получить представление о механизмах перемешивания, распределении времени выдержки, прогнозировании расхода, перепаде давления и энергопотреблении. На рисунке 1 приведена схема канала подачи в одношнековом экструдере [4].

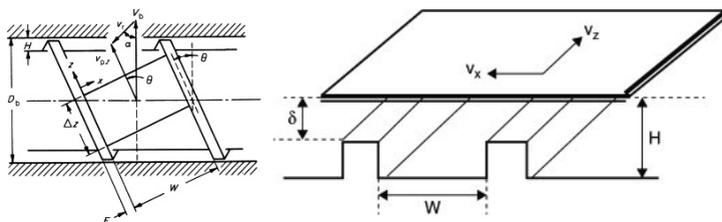


Рисунок 1 – Схема канала в одношнековом экструдере

Основная проблема при описании структуры потока внутри экструдера заключается в том, что поток в секции сжатия и дозирования является неньютоновским и неизотермическим. Поэтому для получения точной структуры потока необходимо решить уравнение движения, а также уравнение энергии.

Решения системы уравнений могут быть получены только при выполнении широких приближений. Наиболее важными из них являются предположение о стационарном состоянии, пренебрежение силами инерции и тяжести, а также предположение о полностью развитом типе потока несжимаемой смазки (независимо от координат  $x$  и  $z$ ) (рисунок 1).

При таких предположениях поток в канале экструдера сводится к потоку в зазоре высотой  $h$  и шириной  $w$ , одна стенка которой движется со скоростью  $\pi ND \cos \theta$  и против градиента давления а  $dp/dz$ . Поток рассматривается относительно прямоугольной системы координат  $x, y, z$  (рисунок 1), которая вращается с угловой скоростью вала. Цилиндр имеет скорость  $V$  относительно этой системы координат с составляющими:  $V_x = \pi ND \sin \theta$ ,  $V_y = 0$ ,  $V_z = \pi ND \cos \theta$ . Поток в направлении  $z$  является результатом действия двух движущих сил: сопротивления, вызванного  $z$ -составляющей относительной скорости цилиндра  $V_z$  и градиента давления в направлении  $z$ . С учетом этих допущений и упрощений возможно решение уравнения движения вместе с уравнением энергии [5].

Наиболее простой случай возникает, когда материал обладает ньютоновским режимом текучести с вязкостью, не зависящей от температуры, и когда мы пренебрегаем составляющими скорости в направлении  $y$  вблизи пролетов. Последнее предположение является разумным приближением, когда  $(h/w < 0,1)$ . Интересно отметить, что уравнение энергии довольно сложно решить даже для этого упрощенного реологического процесса из-за конвекционного фактора. Только при условии адиабатического выдавливания и пренебрежимо малых температурных градиентов в направлении  $y$  получается относительно простой результат.

Расход материала может быть получен из профиля скорости  $v_z$  путем интегрирования по поперечному сечению канала подачи и умножения этого расхода на число витков  $k$  шнека:

$$Q_v = k \int_0^w \int_0^h v_z dx dy, \quad (1)$$

Используя профиль скорости получаем:

$$Q_v = \frac{1}{2} h \cdot k \cdot w \cdot V_z \left(1 - \frac{1}{3} M\right) = \frac{1}{2} h \cdot k \cdot w \cdot V_z - \frac{1}{12} \cdot \frac{h^3 \cdot k \cdot w}{\eta} \left(\frac{dp}{dz}\right), \quad (2)$$

где  $M$  определяется как:

$$M = \frac{h^2}{2\eta V_z} \left(\frac{dp}{dz}\right). \quad (3)$$

В уравнении (2) потоком утечки через зазор между цилиндром и направляющими поверхностями пренебрегли.

Когда учитывается поток утечки между витками и стенкой цилиндра, необходимо внести поправку в уравнение (2) [6].

$$Q_v = \frac{1}{2} h k w V_z - \frac{1}{12} \frac{h^3 k w}{\eta} \left( \frac{dp}{dz} \right) - \frac{k w V_x \delta}{2 \tan \theta}, \quad (4)$$

Поток  $Q_v$  должен проходить через матрицу. Если мы предположим, что матрица представляет собой круглый канал диаметром  $d$  и длиной  $l$ , то получим:

$$Q_v = \frac{\pi}{128} \frac{d^4 \Delta p}{\eta l}, \quad (5)$$

$$\frac{Q_v \sin \theta}{k w h N L} = \frac{\pi}{2} \frac{\left(1 - \frac{\delta}{h}\right) \left(\frac{d}{L}\right) \sin \theta \cos \theta}{1 + \frac{32}{3\pi} \left(\frac{h}{d}\right)^3 \frac{l w k}{d L} \sin \theta}. \quad (6)$$

Введем безразмерный расход, используя в качестве эталонного расхода произведение скорости вращения  $N$ , ( $c^{-1}$ ) и общего объема канала экструдера  $k w h L / \sin \theta$  ( $m^3$ ). Из уравнения (5) следует, что  $Q_v$  пропорционально скорости вращения шнека для данной геометрии экструдера. На практике большинство пищевых материалов, подлежащих экструзии, обладают неньютоновскими реологическими свойствами. Некоторые авторы проанализировали подобные ситуации и представили обзор модельных исследований экструдеров с подачей расплава с использованием степенного выражения для тензора напряжений  $\tau$ :

$$\tau = B_0 \dot{\gamma}^n, \quad (7)$$

Данных о реологических свойствах пищевых материалов в условиях экструзии (температура, давление) в литературе крайне мало. В литературе упоминаются три метода определения констант в определяющем уравнении для тензора напряжений [7].

- 1) Измерение повышения давления в экструдере с закрытой матрицей.
- 2) Измерение расхода и перепада давления с помощью различных матриц.
- 3) Измерение расхода и перепада давления с помощью капиллярных вискозиметров, установленных в матрице экструдера.

Из-за трудностей с описанием точных режимов потока и поддержанием постоянной температуры в экструдере первый способ практически бесполезен. Второй способ отличается тем, что для подачи сырья обычно требуется небольшая длина канала, поэтому необходимы корректировки на входе и выходе. Только использование капиллярных вискозиметров может дать точные результаты при точно известной температуре.

Таким образом, можно сделать вывод в том, что до сих пор невозможно описать закономерности течения в одношнековых экструдерах, перерабатывающих биоматериалы. Основной причиной этого является отсутствие данных о реологических свойствах биоматериалов в условиях экструзии. Эти реологические свойства могут быть очень сложными. В уравнение, определяющее тензор напряжений, может потребоваться ввести коэффициенты нормальных напряжений и эффекты упругости (время

релаксации, время замедления). Также очень важно, чтобы в процессе экструзии происходили химические реакции (например, желатинизация крахмала или материалы, полученные из крахмала, денатурация белков), которые сильно влияют на реологические свойства биоматериала при прохождении через экструдер. Очевидно, что, когда это происходит, возникает вопрос о возможности измерения реологических свойств.

Реологическое уравнение состояния в виде степенного уравнения, с точки зрения простоты математической интерпретации, представляется наиболее приемлемым. В связи с этим можно сказать, что для получения математической модели процессов обработки продуктов в шнековых пресс-грануляторах помимо знания реологических и физических особенностей поведения продукта необходимо иметь четкое представление о граничных условиях, характеризующих особенности поведения продукта при переработке в шнековом пресс-грануляторе [2].

Зависимость вязкости от скорости сдвига может быть выражена математически посредством реологического уравнения состояния, которое отражает деформационное состояние продукта. В настоящее время ряд ученых предложили несколько уравнений, описывающих деформационное поведение различных материалов [3]. Каждое из этих уравнений включает в себя определенное количество эмпирических параметров, зависящих от физических и термодинамических свойств продукта, проявляющихся при деформационном исследовании продукта. При этом каждое из реологических уравнений деформационного поведения продукта является в какой-то мере идеализацией действительного поведения материала при его деформационном поведении, что в значительной степени вносит погрешность в описание реологического поведения продукта [1, 6].

Несмотря на громоздкость некоторых реологических уравнений, они не в состоянии описать деформационное поведение всего спектра материалов с достаточной степенью точности. Даже при простоте аналитических представлений реологических уравнений общее аналитическое решение этих уравнений весьма сложно. Однако при применении соответствующих граничных условий и допущений возможно получение частных решений [4, 9].

Были проведены реологические исследования с образцами гранулированного продукта, полученного из сыпучих компонентов: сахар-песок, картофельный крахмал, мякоть ягоды брусники и аронии, в качестве связующего элемента был использован концентрированный сок брусники, эксперименты проводились с образцами, имеющими различную начальную влажность. Для получения зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига проводились измерения с применением ротационного вискозиметра. Обработку экспериментальных данных производили с помощью программы «Виртуальная модель кривых течения» (свидетельство об официальной регистрации № 2008612695). Результаты исследования представлены на рисунках 2 и 3.

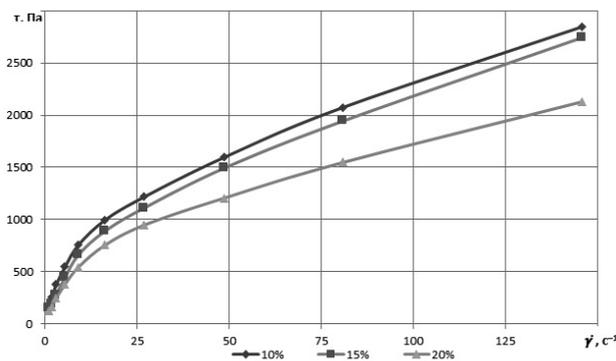


Рисунок 2 – Кривые течения при влажности образца  $W$  10, 15, 20 %

Представленные на рисунке кривые течения исследуемых образцов с различной влажностью, показывают, что все образцы подчиняются степенному уравнению Оствальда-де-Вилля и показывают псевдопластическое течение. На рисунке 3 представлены зависимости вязкости образцов от скорости сдвига. Для получения коэффициентов реологического уравнения использовали программу «Виртуальные кривые течения», которая позволяет проводить обработку экспериментальных данных как по одному реологическому уравнению, так и с разбивкой на отдельные сегменты кривой течения с получением реологических уравнений для каждого сегмента.

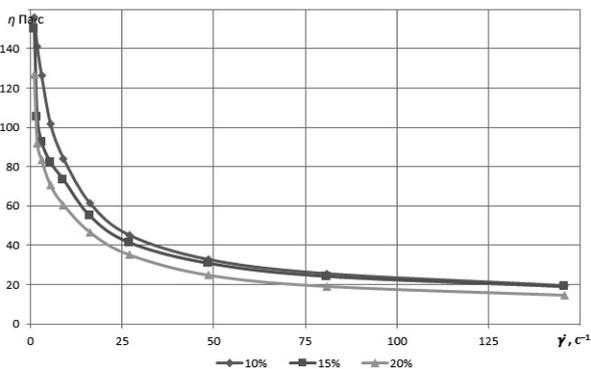


Рисунок 3 – Кривые вязкости при влажности образца  $W$  10, 15, 20 %

В таблице 1 представлены результаты обработки кривых течения по степенному уравнению Оствальда-де-Вилля, в таблице 2 представлены результаты обработки этих же данных, но с разделением кривой течения и описанием различными реологическими уравнениями.

Таблица 1

Коэффициенты для реологического уравнения Оствальда-де-Вилля

$W, \%$	$B_0$	$n$	$\bar{\epsilon}$
10	134,95	0,57	8,09
15	152,37	0,59	7,19
20	190,8	0,56	8,55

Таблица 2

Коэффициенты для реологических уравнений, описывающих кривые течения

$W, \%$	Реологическое уравнение	$\dot{\gamma}, \text{c}^{-1}$	$\tau_0$	$B_0$	$n$	$\eta_{\text{пл}}$	$\bar{\epsilon}, \%$
10	$\tau = B_0 \dot{\gamma}^n$	1 – 9		119,52	0,68		2,09
	$\tau = \tau_0 + \eta_{\text{пл}} \dot{\gamma}$	9 – 16,2	282,5	–	–	29,17	
	$\tau = \tau_0 + B_0 \dot{\gamma}^n$	16,2 – 145,7	296,48	81,92	0,62		
15	$\tau = \tau_0 + \eta_{\text{пл}} \dot{\gamma}$	1 – 9	82,24	–	–	64,69	1,63
	$\tau = \tau_0 + \eta_{\text{пл}} \dot{\gamma}$	9 – 16,2	374	–	–	31,67	
	$\tau = \tau_0 + B_0 \dot{\gamma}^n$	16,2 – 145,7	493,26	44,97	0,79	0,97	
20	$\tau = B_0 \dot{\gamma}^n$	1 – 5,4	–	160,14	0,75	–	2,04
	$\tau = \tau_0 + \eta_{\text{пл}} \dot{\gamma}$	5,4 – 9	239,5	–	–	57,5	
	$\tau = B_0 \dot{\gamma}^n$	9 – 145,7	–	258,22	0,48	–	

После обработки экспериментальных данных и получения реологических уравнений деформационного поведения образцов, провели статистическую оценку адекватности описания кривых течения как одним уравнением, так и с применением различных реологических уравнений, в результате получили среднюю ошибку аппроксимации  $\bar{\epsilon}$ .

Все исследуемые образцы являются неньтоновскими жидкостями, имеющими аномально-вязкий характер реологического течения. Для описания деформационного поведения данных образцов можно применить реологическое уравнение Оствальда-де-Вилля, однако в таком случае получается довольно неточное описание реальной деформационной картины течения продукта (ошибка аппроксимации  $\bar{\epsilon}$  будет в пределах от 7,19 до 8,55). Снизить неточность описания деформационного поведения образцов можно разбив кривые течения на отдельные участки, которые будут описываться соответствующим реологическим уравнением, в таком случае ошибка аппроксимации  $\bar{\epsilon}$  будет уже в пределах от 1,63 до 2,09. Таким образом, применение для обработки результатов исследований программы «Виртуальные кривые течения» позволяет более точно описать деформационное поведение материала, при этом в значительной степени усложняется математический аппарат. Однако переработке материала в шнековом пресс-грануляторе как по длине шнека, так и в его матрице

не будут развиваться скорости сдвига, которые приведут к использованию всего набора реологических уравнений для описания поведения материала. Как правило, достаточно будет одного, максимум двух уравнений при значительно более высокой точности описания реологического поведения.

### Библиографический список

1. Шариков, А.Ю. Экструдирование смесей пшеницы и выжимок моркови повышенной влажности в технологии продуктов, готовых к употреблению. / Шариков А.Ю., Степанов В.И., Иванов В.В., Поливановская Д.В., Амелякина М.В. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018;80(3):43-49. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-3-43-49>

2. Термопластическая экструзия в процессах пищевой биотехнологии / А.Ю. Шариков, В.В. Иванов, М.В. Амелякина, Е.М. Сербя. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Первое экономическое издательство", 2022. – 116 с. – ISBN 978-5-91292-447-7. – DOI 10.18334/9785912924477.

3. Получение гранулированного активного угля из отходов растительного сырья / Е.А. Фарберова, Е.А. Тиньгаева, А.Д. Чучалина [и др.] // Известия высших учебных заведений. Серия: химия и химическая технология. - 2018. - Т. 61, № 3. - С. 51-57. DOI: <https://doi.org/10.6060/tcct.20186103.5612>.

4. Разработка состава и технологии получения таблетированной формы концентрата безалкогольного напитка / М.Н. Школьников, Е.В. Аверьянова, Д.В. Доня, И.В. Хлопотов // Техника и технология пищевых производств. – 2017. – № 3(46). – С. 96-101.

5. Доня, Д.В. Реологические показатели комбинированных мясных фаршей / Д.В. Доня, Е.В. Махачева // Вестник КрасГАУ. – 2014. – № 4(91). – С. 249-253. – EDN SFDTAJ.

6. Литвинова, И.А. Компьютерные технологии в реологических исследованиях молочных продуктов: специальность 05.18.04 "Технология мясных, молочных и рыбных продуктов и холодильных производств": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Литвинова Инга Анатольевна. – Кемерово, 2012. – 155 с.

7. Доня, Д.В. Реология вязкопластичных сред в одношнековых экструдерах / Д.В. Доня, К.Б. Плотников; Кемеровский государственный университет. – Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2018. – 165 с.: ил., схем., табл. – Режим доступа: по подписке. – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-8353-2382-1. – Текст: электронный.

8. Моделирование мехатронных систем производства инстантированных напитков с добавлением амарантовой муки / А.М. Попов, К.Б. Плотников, П.П. Иванов [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2020. – Т. 50, № 2. – С. 273-281. – DOI 10.21603/2074-9414-2020-2-273-281. – EDN BBCSRB.

9. The effects of sequential enzyme modifications on structural and physicochemical properties of sweet potato starch granules / L. Guo, H. Tao, B. Cui [et al.] // Food Chemistry. - 2019. - Vol. 277. - P. 504-514. DOI:

## RHEOLOGICAL ASPECTS OF EXTRUSION IN A SINGLE-SCREW GRANULATOR PRESS

**Donya Denis Viktorovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Processes and Devices of Processing Industries, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, e-mail: [d.donya@rgaumcxa.ru](mailto:d.donya@rgaumcxa.ru)

**Popov Anatoly Mikhailovich**, Doctor of Engineering. Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechatronics and Automation of Technological Systems, Kemerovo State University, e-mail: [popov4116@yandex.ru](mailto:popov4116@yandex.ru)

**Borodulin Dmitry Mikhailovich**, Doctor of Engineering. Sciences, Professor, Director of the Technological Institute, Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, e-mail: [borodulin@rgau-msha.ru](mailto:borodulin@rgau-msha.ru)

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Russia, Moscow, e-mail: [rector@rgau-msha.ru](mailto:rector@rgau-msha.ru)

**Abstract:** the article discusses some issues of the behavior of biomaterials during extrusion in a screw granulator press, as well as obtaining and processing flow curves according to various rheological equations.

**Key words:** auger, extruder, rheology, flow curves, rheological equations.

УДК 664.3

## НОВЫЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРОДУКТОВ НА ОСНОВЕ ПОДСОЛНЕЧНЫХ МАСЕЛ

**Дубровская Ирина Александровна**, канд. техн. наук., доцент кафедры технологии жиров, косметики, товароведения, процессов и аппаратов, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», e-mail: [dubrovskaya.ia@mail.ru](mailto:dubrovskaya.ia@mail.ru)

**Бутина Елена Александровна**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технологии жиров, косметики, товароведения, процессов и аппаратов, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», e-mail: [butina\\_elena@mail.ru](mailto:butina_elena@mail.ru)

**Герасименко Евгений Олегович**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технологии жиров, косметики, товароведения, процессов и аппаратов, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», e-mail: [rosmaplus@gmail.com](mailto:rosmaplus@gmail.com)