

# **РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭКСТРУДЕРА НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ БИОПОЛИМЕРОВ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКТА**

**Мартынова Д.В., Мартынов Н.Н., Попов В.П., Панов Е.И.  
Оренбургский государственный университет, г. Оренбург**

В последние годы в связи с ростом стоимости сырой нефти население планеты все более отчетливо осознает ограниченность ископаемых ресурсов. При этом повышенный интерес начинают вызывать биополимеры, представляющие собой особый класс полимерных материалов. Они рассматриваются как дополнение и отчасти альтернатива традиционным полимерным материалам, как логичный и необходимый шаг для успешного развития современной и ориентированной на будущее индустрии пластмасс[5].

Как известно, среди биополимеров различают полимеры, полученные на основе возобновляемого растительного сырья, и полимеры, способные к биоразложению.

Развитие производства как получаемых на биологической основе, так и биоразлагающихся полимеров уже невозможно остановить. Уже сейчас биополимеры во многих областях представляют собой серьезную альтернативу традиционным полимерным материалам.

Метод экструзионной обработки полимеров относится к одному из самых популярных методов [2].

Экструдеры являются наиболее перспективными и широко распространенными, так как в них наряду с процессами смешивания (гомогенизации) протекают процессы диспергирования, обезвоживания, дегазации, пластификации.

Обработка биополимеров термопластической экструзией обеспечивает большой объем и разнообразие производимой продукции и высокий экономический эффект, обусловленный, прежде всего тем, что один экструдер может заменить целый комплекс машин и механизмов. Его использование позволяет сделать процесс непрерывным, легко контролируемым, универсальным по видам перерабатываемого сырья и готовых продуктов [4].

Биополимеры подвергаются наибольшему химическим изменениям в процессе экструзии, поэтому более целесообразным является рассмотрение химических процессов на примере данного сырья.

Вместе с тем, одношнековые прессующие механизмы являются одними из самых энергоемких технологических объектов. Особенностью пресс-экструдеров является сложность и разнообразие процессов обработки биополимеров [3].

В связи с этим важной представляется оптимизация режимов процесса экструдирования с целью энерго – и ресурсосбережения и обеспечения необходимого качества полуфабриката.

Многообразие биополимеров, естественно отражается на конструкции, исполнении и режимах работы пресс-экструдеров и связанного с ним вспомогательного оборудования. Конструктивные особенности шнеков специфичны и имеют самый разнообразный профиль. Технологический процесс экструдирования и его энергоёмкость в основном определяются конструкцией шнека [6].

Проведенный анализ существующих конструкций пресс-экструдеров для экструдирования сложных биополимеров позволяет сделать вывод о том, что необходимо разработать конструкцию рабочего органа пресс-экструдера с возможностью регулирования угла наклона витков шнека, и шага между витками, с целью обеспечения возможности регулирования скорости подачи материала в зону сжатия.

Было установлено, что с увеличением температуры происходит увеличение степени уплотнения в шнековой камере и увеличивается давление на выходе из экструдера. В результате увеличения давления и степени уплотнения происходят более глубокие химические преобразования в экструдированном материале. Таким образом, следует сделать вывод, что степень уплотнения перерабатываемого материала имеет непосредственное влияние на температуру и давление, и, как следствие, на глубину химических преобразований в перерабатываемом материале [9].

Для изучения преобразования биополимеров в экструдере наиболее удобным и доступным материалом является зерно, так как данный вид исследуемого материала представляет собой сложный биополимер. В связи с этим была исследована зерновая смесь в составе ячменя – 70%, пшеницы – 10%, овса – 19% и соли – 1%.

Основной установкой для проведения экспериментального исследования является малогабаритный пресс-экструдер ПЭШ-30/4, выпускаемый ОАО “Орстан”.

Внешний вид лабораторной установки с измерительной аппаратурой показан на рисунке 1.

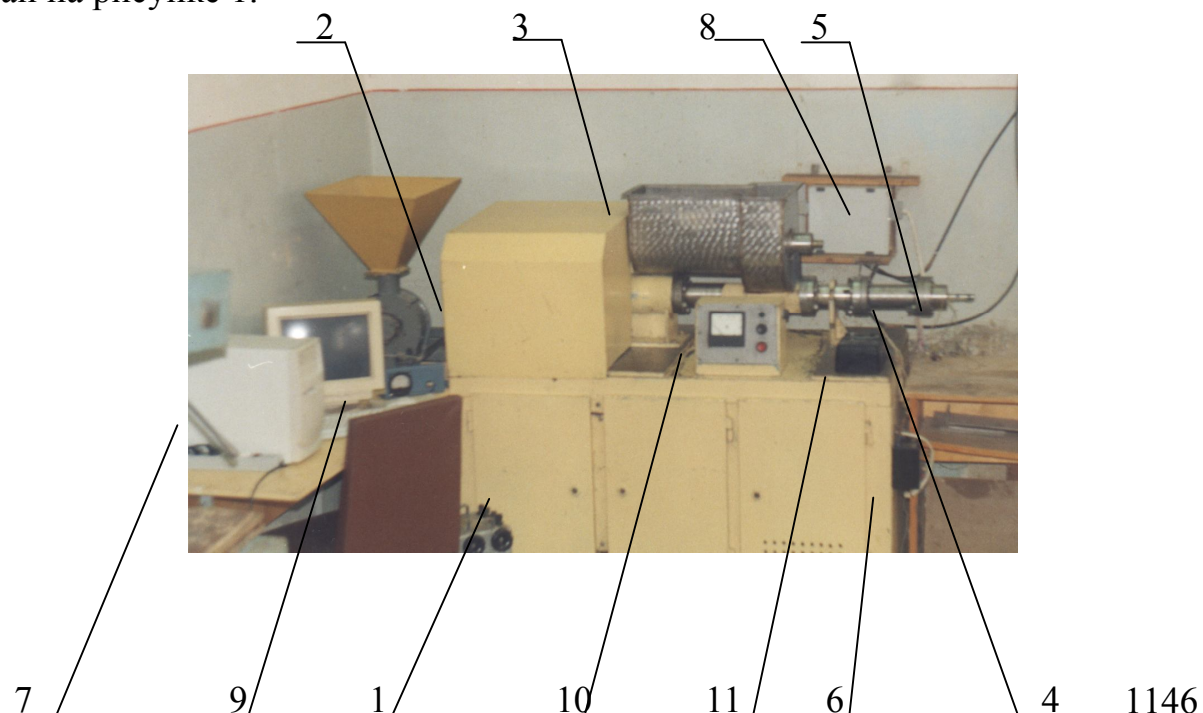


Рисунок 1 – Общий вид экструдера с измерительной аппаратурой:

1 – станина; 2 – редуктор; 3 – загрузочная воронка; 4 – цилиндрический корпус шнека; 5 – формующая головка; 6 – пульт управления; 7 – персональная ЭВМ; 8 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 9 – тахометр; 10 – амперметр; 11 – ваттметр

Конструкция рабочего органа пресс-экструдера была изменена следующим образом: витки в зоне загрузки и транспортирования были выполнены с возможностью осевого перемещения, посредством вращения резьбового вала приводного механизма, расположенного в теле шнека, на котором расположены втулки с установленными пальцами, соединенными с витками шнека и совершающими движение по направляющим, выполненным также в теле шнека рисунок 2 [8].

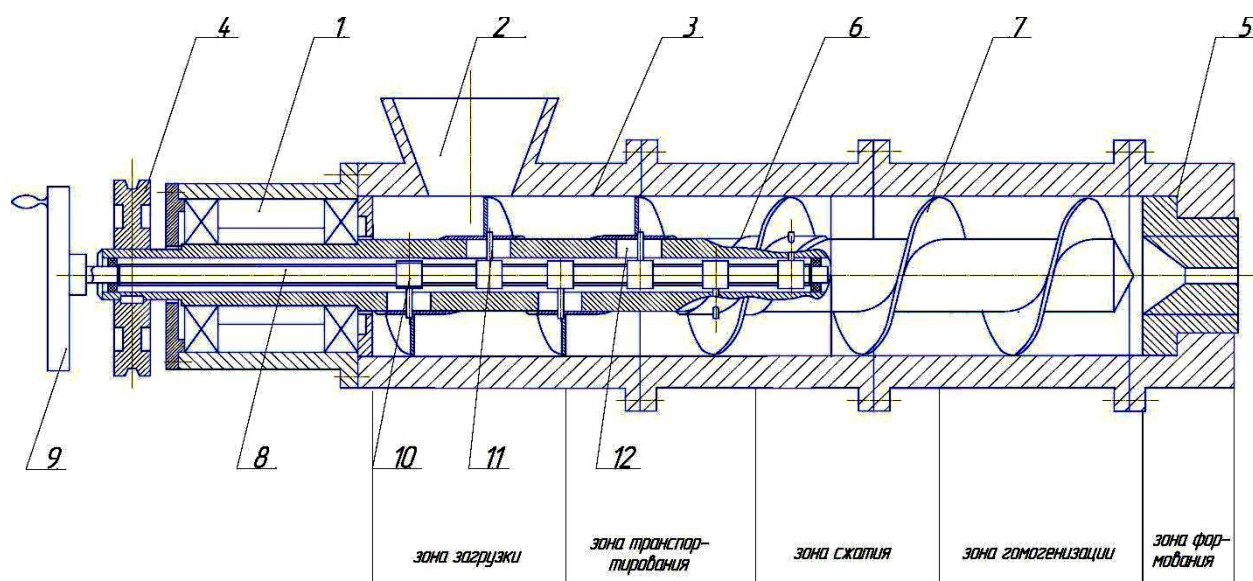


Рисунок 2 – Конструкция одношнекового пресс-экструдера:

1 – подшипниковый узел, 2 – загрузочная воронка, 3 – разъемные корпуса шнековой камеры, 4 – привод, 5 – формующая головка, 6 – шнек, 7 – витки шнека, 8 – резьбовой вал, 9 – приводной механизм, 10 – втулки с установленными пальцами 11, 12 – направляющие

В процессе экспериментальных исследований в различных местах установки измерялись давление и температура.

Также в работе были использованы разработанные ранее устройство для определения физико-механических свойств готовых экструдированных изделий и устройство для определения когезионных и адгезионных напряжений, возникающих при растяжении и сжатии материалов, извлекаемых из зон экструдера [1].

Для удобства сравнения результатов измерения прочности экструдата определяли предельное напряжение сдвига  $\tau_n$ :

$$\tau_n = \frac{F}{S}, \quad (1)$$

где  $F$  – срезывающее усилие;  
 $S$  – площадь поперечного сечения пробы сухих изделий.

Конструкция шнековой камеры была разбита на пять зон: зона загрузки, зона транспортирования, зона сжатия, зона гомогенизации и зона формования.

Было изучено преобразование зерновой смеси в каждой зоне с точки плотности и полного напряжения.

Количество повторностей рассчитывали по критерию Стьюдента с целью достижения доверительного интервала 0,5. По расчетам выявлено, что количество повторностей равняется пяти. Эксперимент проводили в пяти повторностях.

Плотность зерновой смеси по зонам экструдера определяли следующим образом: после выхода экструдера на режим, останавливали его, выключали привод, разбирали экструдер на части и исследовали материал, находящийся в каждой зоне. Плотность определяли по ГОСТ 23513-79.

Были проведены исследования химического состава экструдированного материала. Аминокислотный состав определяли по ГОСТ 32195-2013. Определение аминокислот производили после гидролиза методом жидкостной хроматографии.

При проведении исследований все анализы осуществляли в неоднократных повторностях в зависимости от точности и сложности использованных методов. Для обработки экспериментальных данных использовали разработанное на основе трехфакторного эксперимента программное средство «Обработка результатов многофакторного эксперимента на основе композиционного ортогонального плана ПФЭ 2<sup>3</sup>», зарегистрированное в университетском фонде алгоритмов и программ.

Результаты эксперимента, отражающие зависимость плотности и полного напряжения материала в зонах шнековой камеры экструдера от влажности материала и отношения шага винтовой лопасти шнека к ее наружному диаметру представлены соответственно в таблицах 1 и 2.

Из таблицы 1 мы видим, что за счет изменения отношения шага винтовой лопасти шнека, к ее наружному диаметру ( $P_x/D$ ) в зонах загрузки, транспортирования и сжатия можно значительно увеличить плотность материала. Так же наблюдается увеличение плотности материала в зоне формования до величины 1400 г/см<sup>3</sup>, сопоставимой с достигаемой на гидравлических прессах, при использовании аналогичного сырья.

Таблица 1 – Зависимость плотности материала в зонах шнековой камеры экструдера от влажности и отношения шага винтовой лопасти шнека к ее наружному диаметру, г/см<sup>3</sup>.

Влажность W %	Отношение $P_x/D$	Зона загрузки	Зона транспортирования	Зона сжатия	Зона гомогенизации	Зона формования
28	0,4	750	920	1310	1350	1400
	0,6	750	850	1260	1330	1380
	0,8	750	790	1190	1280	1340
	1,0	750	760	1110	1210	1300
	1,2	750	770	1120	1230	1310
30	0,4	750	900	1250	1330	1380
	0,6	750	840	1200	1300	1350
	0,8	750	760	1100	1200	1300
	1,0	750	780	1150	1230	1320
	1,2	750	800	1180	1280	1330
32	0,4	750	790	1140	1230	1310
	0,6	750	770	1120	1210	1300
	0,8	750	790	1150	1230	1320
	1,0	750	810	1180	1250	1330
	1,2	750	840	1220	1280	1350

Из таблицы 2 мы видим, что при изменении отношения шага винтовой лопасти шнека к ее наружному диаметру ( $P_x/D$ ), изменяется полное напряжение в материале. В результате можно снизить полное напряжение в зоне формования до 7,6 кПа. За счет снижения полного напряжения в зонах сжатия, гомогенизации и формования снижаются энергозатраты на проведение процесса экструдирования и повышается качество готовых изделий.

Таблица 2 – Зависимость полного напряжения материала в зонах шнековой камеры экструдера от влажности и отношения шага винтовой лопасти шнека к ее наружному диаметру, кПа

Влажность W %	Отношение $P_x/D$	Зона загрузки	Зона транспортирования	Зона сжатия	Зона гомогенизации	Зона формования
28	0,4	3,6	7,5	7,5	7,5	7,5
	0,6	3,6	7,3	7,5	7,1	7,9
	0,8	3,6	6,7	8,2	8,4	8,6
	1,0	3,6	6,5	8,5	8,6	8,8
	1,2	3,6	6,6	8,2	8,4	9,7
30	0,4	3,6	7,5	7,5	7,5	7,6
	0,6	3,6	7,3	7,5	7,7	7,8
	0,8	3,6	6,4	8,4	8,6	8,8

	1,0	3,6	6,8	8,1	8,5	8,7
	1,2	3,6	7,0	8,2	8,4	8,6
32	0,4	3,6	6,8	8,0	8,3	8,6
	0,6	3,6	6,5	8,3	8,5	8,7
	0,8	3,6	7,0	7,8	8,1	8,4
	1,0	3,6	7,2	7,5	7,7	7,9
	1,2	3,6	7,4	7,5	7,6	7,7

Проведенные нами анализы зерновой смеси в составе ячменя – 70%, пшеницы – 10%, овса – 19% и соли – 1% показали, что в результате экструдирования происходит существенное изменение химического состава продукции. Так со 110 до 113,78 г (или на 3,78%) увеличивается концентрация сырого протеина – одного из основных показателей лимитирующих продуктивность животных. При этом возрастает не только количество протеина, но и повышается его физиологическая ценность за счет увеличения концентрации основных незаменимых аминокислот.

Исследованиями выявлено, что после экструдирования количество лизина, одной из самых дефицитных аминокислот увеличивается на 12 % с 365,96 до 412,49 мг на 100 г, глицина – на 41 %, 413,38 до 584,1 мг на 100 г, цистина – на 70%, с 228,6 до 390,77 мг на 100 г, триптофана – на 26,5%, метионина и аспарагиновой кислоты соответственно на 3,7% и 3,6%. При экструдировании зерновая масса на 2,2% обогащается сырым жиром – наиболее концентрированным источником энергии. На 2,3 % уменьшается объем клетчатки – наименее ценная часть зерновой смеси [7].

Из таблицы 3 мы видим, что при внедрении в производство разработанной конструкции пресс-экструдера в сравнении с традиционной, наблюдается улучшение качественных показателей продукта, снижаются механические потери и негодные отходы, уменьшается крошимость и содержание целых зерен, увеличивается содержание перевариваемого протеина.

Таблица 3 – Анализ качественных показателей продукта, производимого на традиционной и разработанной конструкции пресс-экструдера.

Качественные показатели получаемого продукта	По традиционной технологии	По разработанной технологии
Выход экструдированного комбикорма, %	94,0	94,5
Негодные отходы, %	0,5	0,2
Усушка, %	5	5
Механические потери, %	0,5	0,3
Содержание перевариваемого протеина в одной кормовой единице, г	100	114
Содержание сырой клетчатки, %	6,1	4,9
Крошимость экструдата, %	12	3

Кислотность по вытяжке, %	5	3
Влажность, %	10	10
Содержание целых зерен от 0,3 до 0,7%	0,6	0,3
Потери каротина в процессе прессования, %	5	3
Количество некондиционного экструдата, %	6	4

Результаты исследования химического состава экструдированного материала показали, что при экструдировании сложных биополимеров на разработанном пресс-экструдере происходят глубокие химические преобразования в исследуемом материале, в результате чего улучшаются качественные показатели готового продукта.

Таким образом, предлагаемые изменения конструкции рабочего органа пресс-экструдера позволяют: оптимизировать процесс экструдирования различного сырья за счет регулируемого поддержания давления в зоне сжатия; снизить энергопотребление экструдера; повысить производительность экструдера; получать экструдаты высокого качества.

#### Список литературы

1. Антимонов С.В. Оптимизация технологии экструдированных грубых кормов и добавок / С.В. Антимонов, В.Г. Коротков, В.П. Попов, Е.В. Ганин, С.В. Кишкилев // *Материалы IX международной научно-практической конференции «Научный вестник» 27.12.2012-05.01.2013 г., Прага. Publishing House «Education and Science»s.r.o. 2013 г С. 72-76 ISBN 978-966-8736-05-6*
2. Кишкилев, С.В. Исследование переработки зернового сырья на технологической линии при применении криогенных технологий [Электронный ресурс] / С.В. Кишкилев и др. // *Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской научно-методической конференции (с международным участием); Оренбургский гос. ун-т. - Оренбург: ООО ИПК "Университет", 2015. – С. 939-947. – CD-R. ISBN 978-5-7410-1180-5*
3. Коротков В.Г. Вторичные материальные ресурсы маслодобывающих производств / В.Г. Коротков, и др. // *Хранение и переработка сельхозсырья, 2008, № 6, с. 27-29.*
4. Коротков В.Г. Влияние шоковой заморозки на качество и энергоемкость процесса измельчения зернового сырья и вторичных материальных ресурсов пищевых производств различными типами измельчителей / В.Г. Коротков, С.В. Кишкилев, Н.Н. Мартынов, Д.В. Мартынова, Е.И. Панов // *Материалы LII международной научно-практической конференции «Технические науки - от теории к практике» №11 (47). Новосибирск: Изд. АНС «СибАК», 2015. – С. 193-202. ISBN 2308-5991*
5. Попов В.П. Разработка технологии экструдированных кормов на основе отходов пищевой промышленности с охлаждением двухкратно измельчаемого сырья / Попов В.П., Коротков В.Г., Антимонов С.В., Кишкилев С.В. // *«Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры». Материалы Всероссийской научно-методической конференции (с*

международным участием); Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2013 г. С.1038-1041

6. Попов В.П. Определение оптимальной влажности исходной смеси для производства экструдированных кормов на основе подсолнечной лузги / Попов В.П., Коротков В.Г., Антимонов С.В., Кишкилев С.В. // Материалы IX международной научно- практической конференции «Найновите научни постижения» 17.03.2013-25.-03.2013 г., София Республика Болгария, Publishing House «Education and Science»s.r.o. 2013 г, С.29-32 ISBN 978-966-8736-05-6

7. Тимофеева Д.В. Исследование преобразования структурно-механических свойств и химического состава белково-крахмало-клетчаткосодержащего сырья в канале одношнекового пресс-экструдера [Текст]/ Д.В. Тимофеева, С.В. Кишкилев, В.П. Попов, Н.Н. Мартынов // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской научно-методической конференции (с международным участием); Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2015. С. 1007-1013. ISBN 978-5-4417-0161-7.

8. Тимофеева Д.В. Оптимизация изменения агрегатного состояния сырья в процессе экструзии / Тимофеева Д.В, Зинюхина А.Г., Попов В.П., Коротков В.Г., Антимонов С.В. // Вестник Оренбургского государственного университета. - 2013. - № 3. - С. 225-229. ISBN 1814-6457 (Реестр ВАК МО РФ).

9. Тимофеева Д.В. Исследование процесса преобразования сыпучего материала в упруго-вязко-пластичный в канале шнека пресс-экструдера / Тимофеева Д.В., Попов В.П., Коротков В.Г., Антимонов С.В.// Бъдещие изследованиа: материали за 9-а международна практична конференция. Том 25. Сельско стопанство. Ветеринарна наука – София: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2013. – С.50-54