



Е.В. СЛАВНОВ, И.А. ПЕТРОВ

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ЭКСТРУЗИИ ЗЕРНОВЫХ
И ОТЖИМА МАСЛИЧНЫХ
КУЛЬТУР**

Институт механики сплошных сред УрО РАН

Е.В. Славнов, И.А. Петров

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ЭКСТРУЗИИ ЗЕРНОВЫХ
И ОТЖИМА МАСЛИЧНЫХ КУЛЬТУР**

2019

УДК 636.086.1 + 664.3

ББК 45.45 + 35.782.12

С 47

Отв. редактор: докт. техн. наук, проф. Е. В. Славнов.

Рецензенты:

докт. техн. наук О. И. Скульский;

докт. техн. наук, проф. Н. М. Труфанова.

Славнов Е.В., Петров И.А.

Теоретические основы экструзии зерновых и отжима масличных культур. — Екатеринбург: УрО РАН, 2019. — 328 с.

Процесс экструзии рассмотрен с точки зрения особенностей использования его при переработке зерновых культур. Описано определение реологических и теплофизических свойств. Представлены математические модели экструзии и результаты моделирования. Обсужден ряд новых технических решений. Рассмотрено влияние физико-механических воздействий на кормовые качества готового продукта. Показаны изменения структуры зерна в процессе экструзии на наноуровне. Представлены результаты эксперимента кормления коров с полной заменой кормовых добавок экструдатом ржи. Предложены математические модели процесса отжима. Представлен метод определения коэффициента фильтрации в процессе отжима и его зависимость от концентрации и давления. Найден безразмерный комплекс, определяющий интенсивность отжима. Рассмотрено влияние технологических и конструктивных параметров процесса на эффективность отжима. Приведен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных.

Для научных и инженерно-технических работников, занимающихся экструзией, в том числе зерновых культур, фильтрацией в условиях больших пластических деформаций, в частности, переработкой масличных культур, специалистов в области сельскохозяйственного машиностроения, подготовки кормов и производства биотоплива. Для студентов и аспирантов, изучающих вопросы кормления животных и использования альтернативных источников энергии.

Табл. 28. Ил. 183. Библиогр. список 143 назв.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты № 06-024-00480, 07-08-97603-р_офи, 10-08-96069-р_урал_а, 13-08-96006-р_урал_а) и администрации Пермского края.

ISBN 978-5-7691-2525-6

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|------------|
| Предисловие..... | 7 |
| РАЗДЕЛ I. | 13 |
| ЭКСТРУЗИЯ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР С ОЦЕНКОЙ КАЧЕСТВА ПОЛУЧАЕМОГО ПРОДУКТА | 13 |
| ГЛАВА 1. ПРОЦЕСС ЭКСТРУЗИИ И ЭКСТРУДЕРЫ..... | 13 |
| 1.1 Процесс экструзии. | 13 |
| 1.2. Экструдеры зерновых продуктов..... | 16 |
| ГЛАВА. 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ. | 29 |
| 2.1. Основные уравнения. | 29 |
| 2.2. Математическое моделирование процесса экструзии на одношнековых машинах..... | 35 |
| 2.3. Модель процесса экструзии в интегральных характеристиках с учетом радиальных утечек и незначительного изменения геометрии канала. | 40 |
| 2.4. Двумерные и квази-трехмерные модели процесса экструзии..... | 52 |
| ГЛАВА. 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ ПЕРЕРАБАТЫВАЕМОГО ПРОДУКТА. | 66 |
| 3.1. Реологические свойства перерабатываемого продукта..... | 66 |
| 3.2. Теплофизические свойства перерабатываемого продукта..... | 89 |
| ГЛАВА 4. СПЕЦИФИКА ЭКСТРУЗИИ ЗЕРНОВЫХ ПРОДУКТОВ. ... | 101 |
| 4.1. Экструзия зерновых – перспективный путь в кормозаготовительной отрасли сельского хозяйства..... | 101 |
| 4.2. Увлажнение исходного сырья при экструзии зерновых продуктов. | 102 |
| 4.3. Экструзия фуражного зерна непосредственно убранных с поля..... | 105 |
| 4.4. Автономная установка экструзии с использованием вала отбора мощности трактора. | 109 |
| 4.5. Характер распределения влаги в канале экструдера при увлажнении перерабатываемого зерна. | 111 |
| 4.6. Использование радиальных утечек. | 118 |
| ГЛАВА 5. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ ПУТЕМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОРМОВЫЕ КАЧЕСТВА ПОЛУЧАЕМОГО ПРОДУКТА (НА ПРИМЕРЕ ЗЕРНА ОЗИМОЙ РЖИ). | 122 |

| | |
|--|------------|
| 5.1. Необходимость наличия показателя качества зерновых культур после экструзии..... | 122 |
| 5.2. Показатель кормового качества зерновых продуктов до и после экструзии. | 123 |
| 5.3. Получение концентрированных кормовых добавок экструзионной обработкой зерна озимой ржи с оценкой их пищевой ценности..... | 125 |
| 5.4. Изменение наноструктуры зерна озимой ржи в процессе экструзии..... | 134 |
| 5.5. Экструзионная подготовка концентрированных кормов и результаты скармливания их животным. | 141 |
| ГЛАВА 6. ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННОГО ГОТОВОГО ПРОДУКТА..... | 151 |
| 6.1. Чего не хватает при математическом моделировании экструзии зерновых культур с учетом качества готового продукта. | 151 |
| 6.2. Экспериментальная установка определения влияния физико-механического воздействия на кормовые качества готового продукта. | 152 |
| 6.3. Определение влияния параметров физико-механического воздействия на кормовые качества готового продукта..... | 157 |
| 6.4. Возможные алгоритмы дальнейшего развития использования зависимости параметров физико-механического воздействия на кормовую ценность продукта..... | 169 |
| РАЗДЕЛ II. | 174 |
| ШНЕК-ПРЕССОВЫЙ ОТЖИМ МАСЛИЧНЫХ КУЛЬТУР..... | 174 |
| ГЛАВА 7. ШНЕК - ПРЕССОВАЯ ПЕРЕРАБОТКА МАСЛИЧНЫХ КУЛЬТУР..... | 174 |
| 7.1. Переработка масличных культур – одна из возможностей решения проблемы ежегодного восстановления экологически чистых энергетических запасов. | 174 |
| 7. 2. Современное состояние проблемы шнек прессового отжима масличных культур..... | 176 |
| ГЛАВА 8. МОДЕЛЬ УТЕЧЕК ЧЕРЕЗ РАДИАЛЬНЫЙ ЗАЗОР В ОДНОШНЕКОВОМ ЭКСТРУДЕРЕ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ПО ДЛИНЕ ГЕОМЕТРИЕЙ. | 181 |
| 8.1. Описание развернутого канала шнека с изменяющейся по длине геометрией..... | 181 |

| | |
|--|-----|
| 8.2. Система уравнений по аксиальной координате. Уравнения в безразмерных величинах..... | 189 |
| 8.3. Численное решение системы модельных уравнений..... | 193 |
| 8.4. Моделирование НРХ шнеков с различной геометрией в изотермическом случае..... | 195 |
| 8.5. Определение влияния тепломассопереноса в зазоре на характеристики шнека в неизотермическом режиме на примере переработки рапса..... | 214 |
| ГЛАВА. 9. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ МАСЛИЧНЫХ КУЛЬТУР И ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ. | |
| 9.1. Изменение вязкости перерабатываемого продукта в процессе отжима масла на примере экструдата рапса | 223 |
| 9.2. Метод определения коэффициента проницаемости масличных культур в процессе отжима..... | 231 |
| 9.3. Изменение коэффициента проницаемости масличных культур в процессе отжима на примере рапса..... | 238 |
| 9.4. Влияние скорости нагружения и давления на интенсивность отжима масличных культур на примере рапса..... | 243 |
| 9.5. Предел по остаточному содержанию масла при механическом отжиме..... | 250 |
| 9.6. Модуль всестороннего сжатия клетчатки, содержащейся в экструдате рапса..... | 253 |
| 9.7. Массовая и объемная концентрации масличных культур..... | 257 |
| ГЛАВА 10. МОДЕЛЬ ШНЕК ПРЕССОВОГО ОТЖИМА МАСЛИЧНЫХ КУЛЬТУР..... | |
| 10.1. Постановка задачи течения смеси с относительным движением компонент. Полные уравнения модели в случае трехмерного течения..... | 264 |
| 10.2. Модель течения в шнек прессе с учетом отжима в интегральных характеристиках..... | 268 |
| 10.3. Численное решение системы в интегральных характеристиках..... | 273 |
| ГЛАВА 11. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШНЕК ПРЕССОВОГО ОТЖИМА..... | |
| 11.1. Общие закономерности процесса шнек прессового отжима, наблюдаемые при математическом моделировании..... | 276 |
| 11.2. Влияние конструктивных и технологических параметров шнек-пресса на процесс отжима (численный эксперимент) [59]..... | 291 |

| | |
|--|-----|
| 11.3. Двумерная модель отжима масличных культур | 298 |
| 11.4. Экспериментальное исследование выхода масла вдоль канала при отжиме рапса | 308 |
| ЛИТЕРАТУРА | 313 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ | 325 |

зультатам. В таблице П.1 также приведены значения коэффициента формы которые рассчитаны делением расхода в прямом канале на произведение скорости верхней стенки, ширины и глубины канала. Можно видеть, что при увеличении отношения b/h коэффициент формы асимптотически стремиться к 0,5, что соответствует расходу между двумя параллельными плоскостями. Предлагается описать значение коэффициента формы аппроксимирующей зависимостью:

$$c(\chi) = 2 \cdot 10^{-5} \cdot \chi^5 - 0,007 \cdot \chi^4 + 0,0103 \cdot \chi^3 - 0,0739 \cdot \chi^2 + 0,26734 \cdot 10^{-5} \cdot \chi + 0,0475, \quad (\text{П.1})$$

где $\chi = b/h$.