

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ

ВАСИЛЕВСКАЯ С.П., ХАНИН В.П.

Учебное пособие

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра машин и аппаратов химических и пищевых производств

Василевская С.П., Ханин В.П.

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ

Учебное пособие

В качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по программе направления подготовки кадров высшей квалификации 19.06.01 Промышленная экология и биотехнологии направленности Процессы и аппараты пищевых производств, 15.04.02 и 15.03.02 Технологические машины и оборудование, 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающий процесс в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии

Оренбург
2021

УДК 664(6/7)
ББК 36.81 – 5
Т 38

Рецензент:

Полищук Владимир Юрьевич – профессор, доктор технических наук. ФГБОУ ВПО
«Оренбургский государственный университет»

Авторы:

Василевская С.П., Ханин В.П.

Техника и технология переработки неоднородных систем [Электронный ресурс]: учебное пособие – Эл. изд. - Электрон. текстовые дан. (1 файл pdf: 131 с.). - Василевская С.П., Ханин В.П. 2021. – Режим доступа: <http://scipro.ru/conf/processingtechnologies.pdf>. Сист. требования: Adobe Reader; экран 10'.

ISBN 978-1-005-65632-4

Учебное пособие содержит теоретическое обоснование и практическую реализацию комплексного подхода организации процесса и разработки техники в технологии переработки сырья и отходов, представленных неоднородными системами.

Учебное пособие предназначено для студентов и аспирантов, изучающих технические и технологические вопросы переработки сырья и отходов производства, представленных дисперсными системами, для разработки малоотходных и безотходных технологий, исследования технологических объектов, а также структурно-параметрического синтеза технологических машин и аппаратов, по направлению подготовки кадров высшей квалификации: 19.06.01 Промышленная экология и биотехнологии направленности Процессы и аппараты пищевых производств, 15.04.02 и 15.03.02 Технологические машины и оборудование, 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающий процесс в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии.

ISBN 978-1-005-65632-4



© Василевская С.П., Ханин В.П. 2021
© Оренбургский государственный университет, 2021
© Оформление: издательство НОО Профессиональная наука, 2021

Содержание

<i>Введение</i>	6
<i>1. Современные подходы в области утилизации органических отходов и методы оценки их эффективности</i>	8
1.1. Комплексное использование сырья в отраслях пищевой и перерабатывающей промышленности	8
1.2. Оценка технологических процессов переработки продукции АПК	10
1.3. Критерии оценки эффективности процесса утилизации высоковлажных органических отходов	13
<i>2. Обзор существующих способов утилизации основных органических отходов</i>	16
2.1. Характеристика отходов производства пива и их полезных свойств ...	16
2.2. Совершенствование технологии производства спирта, направленное на уменьшение количества вырабатываемой барды	18
2.3. Существующие методы переработки отходов пивоварения	19
2.4. Методы переработки отходов спиртового производства	22
2.5. Комплексное использование вторичных материальных ресурсов пивоварения	24
<i>3. Проектирование системы процессов эффективных технологий утилизации</i>	26
3.1. Основы построения систем технологических процессов	26
3.2. Анализ математической модели технологического объекта	29
3.3. Технология вычислительного эксперимента при синтезе технологического объекта	33
3.4. Применение метода рабочих характеристик для оптимизации технологического объекта	35
3.5. Особенности вычислительного эксперимента	37
3.6. Варианты технологии утилизации органических отходов	39
<i>4. Обзор процессов, реализующих технологию утилизации</i>	41
4.1. Основные режимы и способы экструдирования пищевых масс	41
4.2. Основные режимы и способы увлажнения и сушки пищевых масс	44
<i>5. Оптимизация работоспособности предложенной технологии</i>	47
5.1. Исследование свойств экструдата смеси зерновых отходов с высоковлажными органическими отходами	47
5.2. Использование альтернативных наполнителей для утилизации высоковлажных органических отходов	52

6. Описание процесса экструдирования	55
6.1. Аналитическое описание процесса экструдирования	55
6.2. Методика определения неизвестных внешних величин процесса экструдирования.....	73
6.3. Определение параметров процесса экструдирования.....	82
7. Новые конструкции экструдированного оборудования.....	88
7.1. Матрицы с фильерами переменного сечения	88
7.2. Матрицы с фильерами в упругой оболочке	92
7.3. Экструдеры высоковлажных полуфабрикатов.....	97
8. Расчет режимов и оценка эффективности предложенной технологии	107
8.1. Порядок расчета технологического оборудования.....	107
8.2. Расчет количественного распределения исходных сырьевых компонентов в готовой продукции и отходах	109
8.2.1. Общие зависимости баланса сухих веществ и воды.....	109
8.2.2. Расчет баланса сухих веществ и воды при производстве пива	110
8.3. Расчет эффективности используемой технологии.....	117
8.4. Линия для обезвоживания высоковлажных вторичных сырьевых ресурсов.....	125
Заключение.....	126
Библиографический список.....	128

Введение

Проблема переработки органических отходов характерна для отраслей аграрно-промышленного комплекса (АПК). Она связана с повышением эффективности переработки используемых и утилизации неиспользуемых отходов.

Актуальность этой проблемы, с одной стороны, обоснована тем, что доля материальных издержек на приобретение сырья и производство продукции для предприятий пищевой промышленности превышает 90 % всех производственных затрат. Повышение эффективности производства в таких условиях требует рационального использования отходов.

С другой стороны, особенностью предприятий АПК является их широкое распространение на любой территории и приближенность к местам проживания людей. Поэтому к защите от вредного воздействия отходов АПК предъявляются повышенные требования.

Для перерабатывающих предприятий АПК характерно получение широкой номенклатуры высоковлажных отходов. Сюда следует отнести отходы мясного и молочного производства, отходы крахмало-паточного и бродильных производств.

Твердые и жидкие отходы бродильных производств могут рассматриваться как вторичные материальные ресурсы (ВМР), так как в них содержатся белковые и минеральные вещества, углеводы и витамины. До настоящего времени объемы утилизации этих отходов в нашей стране были невелики, несмотря на то, что в них содержится до 25 % питательных веществ исходного сырья. Поэтому переработка основных отходов пивоварения и спиртового производства является важной задачей для обеспечения кормовой базы сельскохозяйственного комплекса и предотвращения загрязнения окружающей среды.

Использование высоковлажных отходов бродильных производств осложняется большим содержанием воды (88 ... 95 %). Непроизводительная перевозка больших масс воды обуславливает высокую стоимость перевозок. Это ограничивает возможность утилизации.

С другой стороны, питательная ценность высушенных отходов превосходит питательную ценность зерна: тонна сухой барды стоит на мировом рынке почти в два раза больше, чем тонна кормового зерна, что свидетельствует об экономической эффективности разработок новых методов получения сухой барды и дробины.

Таким образом, утилизация отходов бродильных производств требует решения комплекса экологических, экономических и технологических проблем, среди которых определяющее значение имеет технология переработки отходов.

Актуальной задачей является разработка технологии ресурсосберегающей переработки пивной дробины и спиртовой барды в белково-витаминные кормовые

продукты. Такая технология должна быть малоотходной для обеспечения охраны окружающей среды.

Основное требование к переработке высоковлажных отходов заключается в сохранении в продукте максимального количества полезных веществ при удалении из них воды и обеззараживании от вредной микрофлоры. Такая технология ускоряет процесс высушивания и снижает энергозатраты на удаление влаги по сравнению с высушиванием влажных отходов в массе. Получаемый продукт может быть использован как компонент комбикорма.

Указанная технология позволяет обрабатывать такие отходы как свекловичный жом и мелассу, спиртовую дробину и барду, а также отходы производства дрожжей и молока. В качестве компонента в продукт могут быть добавлены отходы переработки мяса.

Повышение эффективности производства является одним из факторов, обеспечивающих стабильную работу перерабатывающих отраслей. Поэтому перед научными и производственными работниками перерабатывающей промышленности стоят задачи создания и освоения прогрессивных процессов с применением современных физико-химических методов обработки; проектирование и создание новых видов технологий, обеспечивающих повышение эффективности производства; разработки объективных методов оценки качества сырья и продуктов.

Важным фактором обеспечения эффективности технологии должно быть совместное рассмотрение основных процессов, реализующих эту технологию.

При проектировании машин и аппаратов не всегда известны важнейшие физико-химические свойства перерабатываемых полуфабрикатов, особенно если эти полуфабрикаты вновь созданы. Получаемые в результате переработки полуфабрикаты сложны по составу и обладают комплексом различных свойств, которые составляют в совокупности качество продукции и должны быть учтены при расчете процессов и аппаратов и их совершенствовании.

Для обоснования параметров технологии следует применять системный подход. Он охватывает все этапы создания технологии от выбора основных технологических процессов и определения последовательности их выполнения до проектирования реализующего эти процессы оборудования.

Это позволит разработать и обосновать методы экологически безопасной и ресурсосберегающей переработки высоковлажных растительных отходов отраслей АПК в виде экономически эффективной технологии.

Материалы, положенные в основу данной работы, получены в результате работы, выполненной в рамках темы «Совершенствование биотехнических систем пищевых производств и кормоприготовления», которая включена в тематику НИР ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» на 2008 ... 2016 гг., номер госрегистрации 01.960.005780.

1. Современные подходы в области утилизации органических отходов и методы оценки их эффективности

1.1. Комплексное использование сырья в отраслях пищевой и перерабатывающей промышленности

Постановка проблемы. Комплексное использование сырья состоит в максимально возможном извлечении из него всех компонентов и вовлечении их в хозяйственный оборот. Это позволяет удовлетворить общественные потребности в продукции, которая может быть получена из исходного сырья.

Комплексного использования сырья достигают внедрением безотходных и малоотходных технологий, которые позволяют при постоянной или даже уменьшающейся массе перерабатываемых ресурсов увеличивать объем и ассортимент производимой продукции. Это сокращает расход предметов труда на изготовление единицы продукции и снижает ее себестоимость.

Традиционно в процессе основного производства, как правило, получается один продукт, являющийся конечной его целью. Получение нескольких продуктов в традиционных производствах встречается редко. В перерабатывающей промышленности имеется ряд побочных продуктов, которые могут быть непосредственно использованы как корм или другие виды продукции. Для таких продуктов организация дополнительных производств не нужна. Однако значительная часть ценных компонентов (белка, углеводов, жира, витаминов и др.) остается в отходах, переработка которых требует организации побочных производств.

Основные понятия, термины и определения. Отрасли пищевой и перерабатывающей промышленности, использующие для получения продукции сырье растительного и животного происхождения, имеют большую материалоемкость. Доля материальных затрат на производство продукции в большинстве отраслей пищевой промышленности превышает 90 %. Следовательно, эти отрасли являются источником образования значительного количества отходов.

Пищевая промышленность ориентирована на производство из сырья одного основного продукта, выход которого составляет 15...30 % от массы переработанного сырья. Остальная часть сырья, которая содержит значительные количества ценных веществ и в данном производственном процессе не используется, переходит в так называемые отходы производства, которые часто являются вторичным сырьем для производства дополнительной продукции.

Вовлечение в сферу производства ресурсов промышленных отходов равносильно расширению сырьевой базы при одновременной экономии затрат труда, а выпуск дополнительной продукции из вторичного сырья означает снижение издержек производства на единицу конечной продукции при тех же затратах на

сырье. Поэтому комплексное использование сырья и отходов является приоритетной задачей для пищевой и перерабатывающей промышленности.

В процессе технологической переработки первичного сырья и вспомогательных производственных материалов получают основную и побочную продукцию, а также отходы производства.

Основная продукция – это продукция, для получения которой создано и осуществляется производство на промышленном предприятии.

По окончании технологического процесса основной продукт всегда является товарным и имеет стандарт и цену.

Побочный продукт – дополнительная продукция, образующаяся при производстве основной продукции и не являющаяся целью данного производства, но пригодная как сырье в другом производстве или для потребления в качестве готовой продукции.

Побочные продукты производства образуются в результате физико-химической переработки сырья наряду с основной продукцией в едином технологическом цикле и сохраняют максимум полезных веществ в неизменном виде. Они имеют самостоятельное экономическое значение, отличаются от основной продукции по своим физико-химическим свойствам, агрегатному состоянию.

Побочные продукты, как правило, являются товарными, имеют стандарт или технические условия и установленную цену.

Отходы потребления – отходы, образовавшиеся в течение или по завершении определенного процесса потребления данного объекта, в том числе твердые бытовые отходы. Объектом потребления может быть природное сырье, агропромышленная и любая другая продукция.

Если под потреблением понимается производство продукции, получаемые отходы называют отходами производства.

Понятие «отходы производства» может меняться с внедрением прогрессивных технологических процессов, передовой техники, новых видов сырья и с изменением спроса на вырабатываемую продукцию. Некоторые отходы могут стать ценным сырьем для получения других конечных и промежуточных продуктов.

Наличие отходов производства свидетельствует о несовершенстве технологического процесса получения основного продукта, его незамкнутости по отношению к окружающей природной среде, отсутствии комплексности переработки, ограниченности производственных мощностей и большой трудоемкости утилизации. Отходы производства приобретают качество товара только тогда, когда они являются объектом купли-продажи. Отходы делятся на используемые и неиспользуемые. Используемые отходы производства – те отходы, которые целесообразно использовать как побочные продукты или после обработки. Используемые отходы можно рассматривать как вторичное сырье.

Вторичное сырье (используемые отходы) – это вторичные материальные ресурсы (ВМР), которые можно и целесообразно использовать.

К этой группе относится наибольшее число отходов пищевой и перерабатывающей промышленности, которые могут быть реализованы в народном хозяйстве (после дополнительной обработки) в качестве сырья или добавок к нему при производстве новой продукции либо непосредственно (без переработки) как продукция другого назначения (например, корма).

Неиспользуемые отходы (отходы) – это отходы производства, для которых на современном уровне развития науки и техники пока не установлена возможность и целесообразность использования как непосредственно, так и после обработки.

Возвратные отходы – это отходы производства, повторно используемые в технологических процессах этого же производства без дополнительной (промежуточной) доработки в качестве сырья при производстве одной и той же продукции.

Безвозвратные отходы – это отходы производства, которые невозможно, неэффективно или недопустимо использовать повторно, в частности, без дополнительной обработки.

В результате аварийных ситуаций, износа запорной арматуры, поломок аппаратуры, переливов, боя стеклотары и других причин образуются различные виды загрязненных отходов, часть из которых теряется со сточными водами, выбросами в атмосферу, почву. Эти отходы относятся к безвозвратным. Сюда же следует отнести неизбежные технологические потери производственных веществ, обусловленные спецификой технологии (испарение, усушка, распыл, угар). В пищевой промышленности эти потери строго нормируются.

Использование таких отходов в настоящее время не осуществляется, но с развитием науки и техники они могут быть утилизированы и, таким образом, перейти в ВМР и возвратные отходы. Если производство является комплексным, то все понятия – основные продукты, побочные продукты и отходы становятся условными.

1.2. Оценка технологических процессов переработки продукции АПК

Принято считать, что глобальной оценкой экологической оптимальности E_o технологии переработки сельскохозяйственного сырья является выражение, описывающее воздействие производства на окружающую среду, вида

$$E_o = \sum M_{qr} V_{qr} + \sum S_{qr}, \quad (1.1)$$

где M_{qr} – оценка единицы q –го потребляемого ресурса r –м производственным объектом;

V_{qr} – годовой объем ресурса, потребляемого r –м производственным объектом;

S_{qr} – потери r –го производственного объекта в результате загрязнения природы и истощения q –го ресурса.

Эта оценка требует минимизации, то есть $E_o \rightarrow \min$.

На практике вычисление оценки E_o представляет значительные трудности. Поэтому обычно используют безразмерные коэффициенты оценки эффективности, основанные на использовании массового баланса технологического процесса.

Для оценки воздействия технологии на окружающую среду можно использовать уровень безотходности, зависящий от масштабов потребления природно-сырьевых ресурсов и массы получаемых при этом отходов с учетом степени их опасности.

Уровень безотходности $K_{\bar{o}}$ – интегральный показатель, характеризующий технологию с точки зрения ее соответствия современным требованиям рационального природопользования, который имеет вид

$$K_{\bar{o}} = K_M K_{\text{ЭК}}. \quad (1.2)$$

Он формируется из элементарных составляющих – коэффициента полноты использования материально-сырьевых ресурсов K_M , описывающего степень замкнутости технологического процесса на «входе» и на «выходе» по отношению к окружающей среде, и коэффициента экологичности $K_{\text{ЭК}}$, характеризующего интенсивность воздействия процесса на окружающую среду.

Степень замкнутости процесса по отношению к окружающей среде определяется отношением массы произведенной продукции к израсходованной на ее получение массе материально-сырьевых ресурсов. К произведенной относится основная продукция, побочная продукция, изготавливаемая на данном предприятии из отходов, а также масса отходов, реализуемых на другие производства, где они служат исходным сырьем для получения продукции, или готовой продукцией (кормом для животных или птиц). Поэтому коэффициент полноты использования материальных ресурсов рассчитывают по формуле

$$K_M = \frac{\sum H_q V_n - V_n}{\sum H_q V_n}, \quad (1.3)$$

где H_q – фактический расход сырья и материалов на единицу производимой продукции;

V_n – объем производства продукции;

V_n – объем неиспользуемых отходов.

Коэффициент полноты использования материальных ресурсов рассчитывается на основе составленного для каждого варианта технологического процесса уравнения сквозного материального баланса, характеризующего количественное движение всех видов сырья и материалов, размеры образования и использования отходов, побочных продуктов, размеры потерь. Коэффициенты полноты использования материальных ресурсов должны рассчитываться при производстве каждого вида продукции, а также для технологических процессов. Таким образом, становится возможным проведение сравнительной оценки различных вариантов производства одних и тех же пищевых продуктов.

Коэффициент экологичности $K_{ЭК}$, характеризующий степень безопасности производства для окружающей среды имеет вид

$$K_{ЭК} = 1 - K_o. \quad (1.4)$$

Коэффициент отходоёмкости K_o , определяемый как отношение массы неиспользуемых побочных вспомогательных продуктов и твердых, жидких и газообразных отходов, поступающих в окружающую среду с учетом степени относительной опасности каждого вида, к единице продукции. Он рассчитывается по формуле

$$K_o = \frac{\sum V_{oj} P_j}{\sum H_q V_n}, \quad (1.5)$$

где V_{oj} – масса отхода j – го вида;

P_j – показатель относительной опасности отхода j – го вида.

По величине коэффициента отходоёмкости технологии можно разделить следующим образом.

Технологии, имеющие значение $K_{\bar{o}}$ от 0,9 до 1,0, можно отнести к условно-безотходным.

Технологии с коэффициентом $K_{\bar{o}}$ от 0,7 до 0,9 относятся к малоотходным.

Технологии с $K_{\bar{o}} < 0,7$ относятся к категории рядовых.

Обязательными условиями для такого ранжирования являются следующие.

Для условно-безотходных технологий количество выбросов (сбросов) в окружающую среду загрязнителей и объемы размещения отходов должны быть меньше установленных предельно допустимых экологических норм и нормативов.

Для малоотходных технологий количество выбросов (сбросов) в окружающую среду загрязнителей и объемы размещения отходов должны быть меньше установленных предельно допустимых экологических норм и нормативов и в исключительных случаях установленным для предприятия лимитам.

Недостатком представленных выше натуральных критериев является то, что они не учитывают сложности описываемых ими технологических процессов.

1.3. Критерии оценки эффективности процесса утилизации высоковлажных органических отходов

Для оценки эффективности процесса переработки предприятием отходов в продукцию необходим комплекс интегральных критериев, характеризующих количественную и качественную стороны этого процесса. Необходимость введения комплекса таких критериев обусловлена тем, что в настоящее время существует лишь качественная оценка существующих технологий, в которых отсутствует экономическая составляющая и, что очень актуально, не имеется объективной экологической составляющей, без которых нет полноты оценки процесса.

Критерии должны быть представлены в стоимостной форме.

Схема формирования таких критериев представлена на рисунке 1.1. Она показывает, что I компонентов сырья превращаются в L готовых продуктов и J отходов. При этом учитываются их массы V и стоимость единицы массы H .

Были приняты следующие допущения:

- может быть составлен продуктовый баланс, позволяющий определить, какая часть данного сырьевого компонента присутствует в данном виде отходов;
- глубина переработки продукта оценивается его стоимостью;

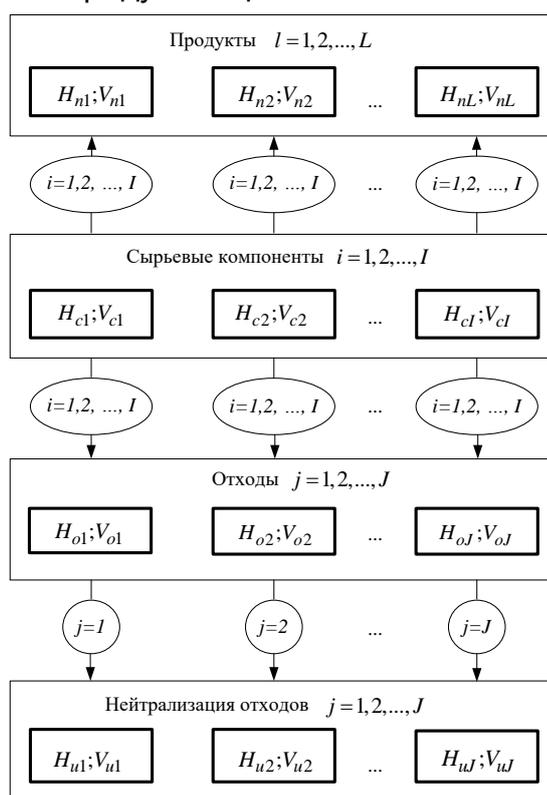


Рисунок 1.1 – Схема разделения компонентов сырья и его обработки.

- экологическая опасность отходов оценивается затратами на их нейтрализацию или устранение последствий их воздействия на окружающую среду;
- стоимость отходов и затраты на их нейтрализацию включены в стоимость продукта;
- оценка технологии тем выше, чем больше значение критерия, максимально значение критерия равно единице.

Интегральная оценка того, как эффективно предприятие использует передовые технологии по переработке отходов в различные виды продукции и рационально ведет процесс переработки в соответствии с современными требованиями природопользования, характеризуется критерием безотходности технологического процесса:

$$K_{об} = 1 - \frac{\sum H_{oj} V_{oj}}{\sum H_{ci} V_{ci}}, \quad (1.6)$$

где H_{oj} – стоимость сырьевых компонентов, заложенная в единицу массы j -ого вида отходов,

$$H_{oj} = \sum H_{ci} \beta_i, \quad \sum \beta_i = 1; \quad (1.7)$$

H_{ci} – стоимость единицы массы i -го сырьевого компонента;

β_i – доля i -го вида сырьевого компонента в j -том виде отходов;

V_{oj} – масса j -го вида произведенных отходов;

V_{ci} – масса i -го переработанного сырьевого компонента.

Предприятие должно стремиться к максимально возможной переработке сырья в продукцию, что можно оценить посредством максимизации критерия безотходности технологического процесса

$$K_{об} = \max \left\{ 1 - \left(\frac{\sum H_{oj} V_{oj}}{\sum H_{ci} V_{ci}} \right)_k \right\}. \quad (1.8)$$

В формуле (1.8) и далее индекс k – порядковый номер множества рассматриваемых технологий.

Для оценки степени совершенства получения из отходов предприятием продукции различного назначения (как технического, так и пищевого) введем критерий глубины переработки сырья:

$$K_2 = 1 - \frac{\sum H_{oj} V_{oj}}{\sum H_{nl} V_{nl} - \sum (H_{oj} + H_{uj}) V_{oj}}, \quad (1.9)$$

где H_{nl} и V_{nl} – соответственно стоимость единицы массы l -го продукта, вырабатываемого из рассматриваемого сырья, и его масса;

H_{uj} – стоимость нейтрализации единицы массы j – го отхода.

Коэффициент глубины переработки должен также стремиться к его максимальному значению

$$K_{oz} = \max \left\{ 1 - \left[\frac{\sum H_{oj} V_{oj}}{\sum H_{nl} V_{nl} - \sum (H_{oj} + H_{uj}) V_{oj}} \right]_k \right\}. \quad (1.10)$$

Имеется потребность во введении критерия экологичности технологического процесса, который характеризует, насколько опасна для окружающей среды применяемая предприятием технология по нейтрализации отходов. Такой критерий имеет вид

$$K_{э} = 1 - \frac{\sum H_{uj} V_{oj}}{\sum H_{nl} V_{nl} - \sum (H_{oj} + H_{uj}) V_{oj}}. \quad (1.11)$$

Критерий экологичности также стремится к максимуму

$$K_{oэ} = \max \left\{ 1 - \left[\frac{\sum H_{uj} V_{oj}}{\sum H_{nl} V_{nl} - \sum (H_{oj} + H_{uj}) V_{oj}} \right]_k \right\}. \quad (1.12)$$

Перечисленные критерии являются составляющей частью интегрального критерия эффективности технологического процесса, который характеризует полноту и совершенство технологических процессов реализуемых на конкретном производстве по переработке и утилизации отходов и ВМР данного предприятия с точки зрения экономической эффективности и экологической безопасности произведенной продукции

$$K_{mэ} = K_{об} K_{oz} K_{oэ} \rightarrow 1,0. \quad (1.13)$$

2. Обзор существующих способов утилизации основных органических отходов

2.1. Характеристика отходов производства пива и их полезных свойств

В основе пивоварения лежат такие химические и микробиологические процессы преобразования зернового сырья, как гидролиз крахмала и белков, брожение и созревание.

В процессе производства пива, который является одним из самых материалоемких производств среди отраслей пищевой промышленности, образуется значительное количество твердых и жидких отходов. В отходы по некоторым оценкам переходит до 25 % питательных веществ исходного сырья. Многие из этих отходов после обработки могут рассматриваться как ВМР.

Отходы пивоварения образуются при производстве солода и пива.

Непосредственно в производстве пива, появляются отходы от очистки (полировки) ячменя и солода перед их дроблением, пивная дробина, остаточные пивные дрожжи, хмелевая дробина, осадок белков и твердых частиц (белковый отстой) после охлаждения и осветления сусла. Имеются технологические потери сухих веществ на распыление при дроблении, потери экстрактивных веществ на образование диоксида углерода в начале процесса брожения, а также потери на смачивание контактных поверхностей трубопроводов и технологического оборудования. Большое количество сточных вод образуется при мойке и дезинфекции производственных помещений, технологического оборудования, тары и трубопроводов.

Отходы пивоваренной промышленности, которые по составу могут рассматриваться как ВМР и по количеству использоваться для получения товарной продукции, можно разделить на твердые и жидкие. К твердым относятся: дисперсная фаза пивной дробины, зерновые отходы (отсев ячменя), солодовые ростки и сплав ячменя. Жидкими с высокой концентрацией полезных веществ являются: дисперсионная среда дробины, белковый отстой, остаточные дрожжи и лагерные осадки. Существует два вида дробины: пивная (солодовая) и хмелевая.

Пивная дробина составляет основную часть отходов пивоварения. Она является суспензией солода и воды, используемой для вымывания зерна после варки сусла. В состав дробины входят оболочки и частицы эндосперма зерна. Она обладает густой консистенцией со структурой грубо размолотого зерна, имеет светло-коричневый цвет, сладковатый вкус и запах солода.

В процессе затирания и фильтрации в дробине остается около 30 % сухих веществ солода, а 65 ... 70 % сухих веществ переходит в сусло под действием амилолитических и протеолитических ферментов.

Характеристика сухой и влажной дробины по химическому составу представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Химический состав пивной дробины (среднее количество в %)

Состояние дробины	Сырая	Сухая
Вода	75 ... 92	10,0
Сырой протеин	4,8	20,5
Жирные вещества	1,5	7,2
Экстрактивные безазотистые вещества (БЭВ)	10,0	40,0
Целлюлоза (клетчатка)	5,0	16,0
Зола	1,2	6,0

В пивной дробине присутствуют, в основном, следующие аминокислоты: гистидин, лизин, лейцин, изолейцин, метионин, валин, глицин, треонин, серин, аланин, аргинин, фенилаланин, тирозин.

В состав дробины входят, в основном, следующие минералы: фосфор, калий, кальций, и магний.

Масса сырой пивной дробины составляет 115 ... 130 % массы исходного сырья, или 25 ... 35 % массы пива, и зависит от качества и ассортимента затираемых зернопродуктов, используемого фильтровального оборудования и технологии фильтрования затора, способов выгрузки дробины в сборники и так далее. В зависимости от используемого оборудования, влагосодержание дробины после варки сусла обычно составляет 75 ... 92 %. Содержание влаги в дробине, предназначенной для реализации, по действующему в настоящее время стандарту на должно превышать 88 %.

Основную часть отходов пивоварения составляет пивная дробина, которая содержит значительное количество биологически активных веществ, обладает высокой питательностью и, как следствие, может с успехом использоваться в комбикормовой промышленности. Однако применение сырой дробины в качестве кормового средства нарушает сбалансированность питания и приводит к неполной усвояемости ее отдельных ингредиентов. Кроме того, при использовании дробины в свежем виде возникают значительные затруднения с ее транспортированием, связанные с наличием большого количества воды и невозможностью длительного хранения.

2.2. Совершенствование технологии производства спирта, направленное на уменьшение количества вырабатываемой барды

Разработаны технологии утилизации барды на более ранних технологических этапах производства спирта, что позволяет снизить затраты на производство и повысить качество выпускаемой продукции.

Некоторого увеличения содержания сухих веществ в свежей барде можно добиться в результате следующих организационно-технических мероприятий непосредственно на спиртзаводах.

В процессе производства спирта не следует допускать в барду излишнюю воду. При сгонке промываемых бродильных аппаратов вывариваемую жидкость следует направлять в канализацию. Применять только двухколонные брагоперегонные аппараты. Отвод лютерной воды из этих аппаратов дает возможность увеличить концентрацию барды на 10 ... 15 %, причем лютерные воды могут быть использованы как добавка к барде при выращивании кормовых дрожжей или как теплоноситель для обогрева теплиц. При невозможности замены одноколонного брагоперегонного аппарата двухколонным рекомендуется дооборудовать одноколонный аппарат дополнительной спиртовой колонкой, что также позволит увеличить концентрацию сухих веществ в барде на 10 ... 15 %.

Увеличить концентрацию барды на 18 ... 20 % можно, обогревая брагоперегонный аппарат закрытым (глухим) паром, вводя тепло через поверхность нагрева, чтобы поступающий на перегонку пар конденсировался в закрытом объеме. Тепло пара, переданное барде, в свою очередь образует пар, предназначенный для многократной выварки спирта из бражки при ее перегонке. Паровой конденсат может быть также использован как теплоноситель.

Для увеличения концентрации барды можно возвращать фильтрат барды на станцию разваривания, заменив до 30 % воды фильтратом барды. При этом ускоряется разваривание, так как кислоты и соли, которые содержатся в фильтрате, способствуют развариванию сырья и клейстеризации крахмала. Содержание сухих веществ в барде увеличивается на 10 ... 12 %.

Кроме перечисленных мероприятий, должны быть использованы и биологические факторы, способствующие увеличению содержания сухих веществ. К таким факторам относится, прежде всего, трехсуточное брожение более концентрированных заторов с применением более сильных рас дрожжей, способных сбраживать такие заторы.

Возможное уменьшение объема барды или повышение содержания сухих веществ в ней ограничено тем, что в зрелой бражке содержание этилового спирта не может превышать 11 ... 12 %, потому что при этой концентрации спирт полностью ингибирует спиртовое брожение.

Перспективным направлением совершенствования спиртового производства

может оказаться выделение спиртовой дробины.

Для этого после осахаривания сусло разделяют на две фракции: жидкую (осветленное сусло) используют в технологическом процессе получения спирта, твердую (спиртовая дробина) отмывают от растворимых углеводов и выводят из технологического процесса влажностью 70 ... 75 % и ниже.

Спиртовая дробина имеет относительно высокую влажность, что не позволяет ее длительно хранить. Целесообразно ее сушить. Высушенная спиртовая дробина по своему составу близка к сухим пивной дробине и барде спиртовой, но превосходит их по содержанию сырого протеина и сырого жира. Сравнительный состав данных продуктов представлен в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Состав сухих отходов бродильных производств (в %)

Продукт	Влажность	Сырой протеин	Клетчатка	Зола	Сырой жир	БЭВ
Дробина спиртовая	12	23...25	11...13	3...4	6...8	40...55
Дробина пивная	11,5	20...22	15...17	3...5	5...7	35...45
Барда спиртовая	12,2	14...16	24...26	5...7	5...7	35...40

Питательная ценность спиртовой дробины 1,31 кормовых единицы, а идущей на производство спирта, пшеницы – 1,19 кормовых единицы.

Спиртовая дробина может быть использована как ценный корм для сельскохозяйственных животных в натуральном, высушенном виде, а также в составе комбикормов.

В Оренбургском государственном университете разработана технология получения высококачественного спирта, в которую входит отделение и вывод из технологического процесса зерновых оболочек. Эти оболочки затем утилизируются вместе с бардой.

Следует отметить, что все вышеприведенные технологии приводят наряду с уменьшением количества вырабатываемой барды к некоторому снижению выхода спирта.

2.3. Существующие методы переработки отходов пивоварения

Основным направлением использования пивной дробины в настоящее время является реализация на корм скоту в нативном виде.

Реализации дробины в сыром виде препятствуют ее недостатки.

Этими недостатками являются сезонные колебания спроса и предложения, низкая стойкость при хранении (24 часа в летнее время и 48 часов в зимнее), высокие расходы при перевозке, вызванные влажностью дробины 88 %.

Поэтому ведутся работы по глубокой переработке пивной дробины, позволяющей улучшить ее потребительские свойства, в том числе увеличить срок хранения. Для этих целей предлагают обезвоживание, силосование, консервирование, сушку и гранулирование.

С целью сокращения массы перевозимого потребителю продукта, производят предварительное обезвоживание пивной дробины. Из исходной массы удаляют дисперсионную среду.

На первом этапе удаляют избыточную жидкость. Для этого используют нутч-фильтры, представляющие собой сетчатые перегородки приемных бункеров. Иногда жидкую фазу отделяют на вибросите.

На втором этапе производят дополнительное обезвоживание дробины на отжимных шнековых прессах. После отжима влаги экструдированный продукт имеет влажность 60 ... 65 %.

Такая схема была применена на пивзаводе имени А.А. Бадаева еще в 1953 году. Предварительно обезвоженная в приемных бункерах дробина попадала в отжимной шнековый пресс, расположенный непосредственно под бункерами. Высота расположения пресса обеспечивала выгрузку дробины в кузов грузового автомобиля. Было установлено, что обезвоженную пивную дробину можно перевозить на грузовых автомобилях без специального оборудования.

Широко распространены способы консервирования дробины.

В ПНР создана технология приготовления силоса из сырой дробины. Во ВНИИ физиологии, биохимии и питания сельскохозяйственных животных (ВНИИФБиП) разработан способ консервирования дробины поваренной солью. Нашел применение способ сохранения дробины обработкой ее продуктами с различной влажностью: свекловичной мелассой и сорбатом калия. Такой продукт в герметичной упаковке сохраняется до 16-ти месяцев.

В качестве закваски при консервировании используют материалы растительного происхождения: кормовой подсолнечник, патоку и химические препараты: органические и минеральные кислоты. Химические препараты оказывают благоприятное воздействие на развитие молочнокислых бактерий и ограничивают развитие маслянокислых бактерий.

Обработка пивной дробины растворами пропионовой и муравьиной кислоты в концентрации соответственно 0,4 % и 0,2 ... 0,4 % (0,4 %-ная смесь этих кислот) в количестве 1 % от консервируемой массы сохраняет, свежесть пивной дробины в течение 14 суток.

Состояние пивной дробины можно стабилизировать препаратом заквашенной и сгущенной сыворотки, которая повышает начальную кислотность до рН 4,0. Качество дробины сохранялось в течение 4 недель.

После обезвоживания отжимным шнековым прессом пивную дробину влажностью 61 ... 67 % рекомендуется обрабатывать аскорбиновой кислотой, сорбатом калия или аммиаком. В случае применения аскорбиновой кислоты в

количестве 0,25 % к массе дробины срок ее хранения возрастает до 21 суток. При обработке сорбатом калия в количестве 0,5 % или аммиаком в количестве 1,0 % к массе дробины она сохраняется 7 ... 9 суток.

Наиболее эффективным способом решения проблем хранения, транспортировки и повышения кормовой ценности пивной дробины, является ее сушка. Сушки дробины особенно распространена в США и Германии.

При получении сухого сыпучего продукта обычно применяют один из двух способов обезвоживания:

- прямое выпаривание жидкости из дробины с содержанием влаги 75 ... 80 % после предварительного удаления из нее избыточной жидкости на вибросите или нутч-фильтре;

- предварительное обезвоживание дробины на отжимном шнековом прессе с последующей сушкой.

В первом случае операция сушки становится значительно дороже и длиннее, но технологичнее и позволяет удержать белок в сухом продукте. При втором способе в отпрессованной жидкости содержится 5 ... 6 % суспензированных белковых веществ, которые затем можно отделить отстаиванием или на центрифуге. Осветленную жидкость можно вернуть в варницу для повторного использования, а сконцентрированные белковые вещества добавить в дробину перед сушкой.

При сравнении сушки дробины на различных типах сушилок установлено, что сушилки прямого обогрева более производительны и дешевы, однако требуют больших эксплуатационных расходов. Паровые, трубчатые и дисковые сушилки стоят дороже, но дешевле в эксплуатации. Кроме того, после паровой сушилки дробина не требует дальнейшей обработки.

Иногда сушку пивной дробины проводят также в ротационных и пневматических сушилках.

Во избежание снижения питательной ценности, температура дробины при сушке должна быть не выше 60 °С.

Высушенная до влажности 7 ... 10 % дробина пригодна к длительному хранению и транспортировке, а по содержанию белков она приближается к бобовым и соевым, что делает ее высококачественным кормовым продуктом.

В Канаде и США сухую пивную дробину используют как компонент комбикорма для домашней птицы, свиней и других сельскохозяйственных животных. Установлено, что введение в рацион кур-несушек сухой дробины улучшает качество яиц и снижает отложения жира в печени птиц. Имеется положительный опыт включения сухой пивной дробины в рацион индеек.

В Московском государственном университете пищевой промышленности (МГУПП) исследована возможность применения экструзионных технологий при переработке пивной барды. В ходе исследований установлено, что качественные гранулы можно получить на шнековых экструдерах. В качестве связующего компонента добавляли 10 % мелассы. Наилучшие результаты получены при

экструдировании дробины влажностью 39 ... 43 % через фильтры диаметром от 2,3 до 2,7 мм. Сушка гранул проводилась до влажности 10 % в течение 10 минут на вибросушилке. Исследована также возможность гранулирования пивной дробины влажностью 50 % окатыванием. Рекомендовано использование 5 ... 6 % мелассы в качестве связующего компонента.

В Великобритании разработан способ кислотного и ферментативного гидролиза пивной дробины. Полученный ферментализат добавляют к суслу. Это улучшает питание дрожжей и стабилизирует пивную пену, благодаря наличию в нем аминокислот. Непрогидролизованный остаток дробины используется как корм сельскохозяйственных животных или птиц.

В США предлагают использовать пивную и хмелевую дробину для получения пара на пивоваренных заводах. Дробина обезвоживается до влажности 50 ... 60 % и досушивается до равновесной влажности на роторной дисковой паровой сушилке. Сухой продукт брикетируется и используется как топливо при получении пара.

Отходом пивоваренного производства является также белковый отстой, состоящий из свернувшегося белка в смеси с дубильными веществами, и хмелевой смолой. Белковый отстой используют как кормовую добавку и как связующее при гранулировании кормов.

При фильтровании пива образуется кизельгуровый шлам. В Германии он используется как сырье для производства силикатного кирпича.

Производство пива сопровождается образованием очистных осадков сточных вод. В стоки попадают, в основном белок и дрожжи. В некоторых странах Европы их улавливают, высушивают до влажности 10 % и скармливают скоту. Высушивание позволяет повысить процент усвояемости белка с 65 % в свежих дрожжах до 88 ... 95 % в сухих дрожжах.

Таким образом, все вышеприведенные методы переработки отходов пивоварения имеют, как минимум, один из следующих недостатков:

- значительная потеря питательных веществ;
- значительная энергоемкость.

2.4. Методы переработки отходов спиртового производства

Свежая барда относится к скоропортящимся продуктам. Допустимый срок ее хранения составляет в теплое время года 24 часа, а в холодное – 48 часов. Поэтому необходимо скармливать ее немедленно или же консервировать для более длительного использования.

Послеспиртовую барду в свежем виде используют в основном на откормочных пунктах для скота, организованных вблизи спиртзаводов. При этом целесообразно жидкую барду транспортировать по трубопроводам непосредственно на откормочный пункт.

Допустимый срок хранения барды увеличивается ее консервированием.

При консервировании барды необходимо создать благоприятные условия для развития молочнокислых бактерий. При наличии в барде более 2,5 % молочной кислоты жизнедеятельность уксусно- и маслянокислых бактерий прекращается. Это послужило основанием использовать для консервирования барды культурные молочнокислые бактерии. Консервирование барды молочнокислым закисанием проводится в специальных траншеях. Вместе с бардой, нагретой до 55 °С, в траншею помещают закваску на молочнокислых бактериях, которой должно быть не менее 1 % от объема заливаемой за первый день барды. В последующие дни залива барды в траншеи молочнокислая закваска не добавляется.

Консервировать барду можно в смеси с измельченными грубыми кормами, составляющими 8 ... 12 % от массы барды, что повышает кормовую ценность и содержание сухих веществ в консервированной барде.

Барду можно силосовать, если для снижения влажности смешивать ее с грубыми кормами (3 ... 4 т барды на 1 т грубого корма). Загружают массу послойно. Каждый слой грубых кормов выравнивают и заливают равномерно горячей или теплой бардой. Затем массу перемешивают и утрамбовывают. После загрузки яму изолируют от воздействия атмосферы.

При силосовании барды таким способом через 2 ... 4 месяца после закладки получают корм с приятным винно-кислым запахом. Силос имеет цвет от серого до светло-коричневого, то есть без значительных изменений по сравнению с цветом исходного сырья.

На спиртовых заводах суточной производительностью 4 тыс. дал спирта получается в сутки 50 тыс. дал барды, которую полностью использовать на кормовые цели на месте невозможно. В этих случаях единственным способом использования барды является ее сушка.

Для сушки барды паром требуется большое количество топлива. Высушивание барды усложняется тем, что она неоднородна по составу – кроме твердых частиц имеются белковые соединения, загрязняющие поверхность труб при упаривании. Кроме того, большая часть растворимых веществ барды, например, сахара, белки при повышенной температуре разрушается.

Наиболее совершенным способом сушки является сушка барды в распыленном состоянии, но этот способ экономически невыгоден.

В настоящее время сушку барды производят по двум схемам.

По полной схеме нерастворимые вещества барды отделяют сначала на сите (нутч-фильтре), а потом на отжимном прессе и высушивают, а фильтрат упаривают под пониженным атмосферным давлением и в сгущенном виде, содержащем до 30 % сухих веществ, смешивают с высушенной дробинкой, после чего полученную тестообразную смесь повторно высушивают.

Эта схема полностью сохраняет все кормовые вещества барды.

По упрощенной схеме нерастворимые вещества барды отделяют на нутч-

фильтрах и высушивают. Этот способ сушки является наиболее дешевым из известных, однако с твердой частью барды отделяется 3 ... 4 % нерастворимых сухих веществ, что составляет только 45 ... 50 % всего количества сухих веществ в барде. Фильтрат, имеющий большую кормовую ценность, по возможности утилизируют на месте.

Сухие нерастворимые вещества барды можно перед сушкой брикетировать. В этом случае сушку барды производят на специальных брикетных сушилках за счет использования тепла отходящих газов котельных заводов без дополнительного расхода топлива. Сушку брикетов производят при температуре 80 ... 90 °С. Для очистки дымовых газов от мелкого топлива и золы необходимо по пути их следования установить осадочные камеры.

При таком способе отделения из барды сухих нерастворимых веществ на каждые 1000 дал вырабатываемого спирта можно получить 4 ... 5 т сухой брикетированной барды.

Для сохранения растворимых сухих веществ барды ЦНИИСП разработан способ приготовления кормовых брикетов, который заключается в смешивании барды с сухим наполнителем – измельченными на соломорезке соломой или сеном и отрубями. Можно также использовать в качестве наполнителя овсяную шелуху, измельченные кукурузные початки и другие отходы переработки зерна. Приготовленная в смесителе тестообразная масса поступает на пресс, где формируется в виде брикетов. Эти брикеты летом сушат на воздухе под навесом, а в остальное время года высушивают в специальных сушилках.

2.5. Комплексное использование вторичных материальных ресурсов пивоварения

Основным направлением переработки ВМР пивоварения является получение кормовых продуктов и компонентов комбикормов из образующихся в процессе производства солода и пива отходов. Комплексная переработка нескольких отходов пивоварения мало разработана, хотя это направление перспективно с точки зрения технологии, экологии и экономики.

Процессы комплексной переработки основных отходов пивоварения, особенно развиты в США. На крупных предприятиях проводят сушку пивной дробины и дрожжей, а затем их смешивают с отходами от полировки для получения компонента комбикорма. Другой кормовой продукт с содержанием 28 % протеина и 69 % жира получают обработкой белкового отстоя, промывных вод и зерновых отходов препаратом «хлоробен».

Американскими учеными получен концентрат жидких отходов пивоварения. При проведении анализов полученных таким образом образцов конденсированных растворимых веществ, отобранных на пивоваренном заводе «Anheuser-Busch» (штат

Миннесота), установлено, что соотношение незаменимых аминокислот в исследуемом продукте лучше, чем в кукурузе. По содержанию минеральных веществ, особенно фосфора и железа, конденсированные растворимые вещества также превосходят кукурузу. Исследования показали, что по химическому составу и биологическим свойствам конденсированные растворимые вещества, полученные из отходов пивоварения, могут заменить в кормах тростниковую мелассу.

В Японии разработан способ консервации отходов пивоварения влажностью 75 ... 80 % добавлением ячменной или пшеничной муки и сахарного шрота, содержащих микроколичество молочнокислых бактерий. Полученный продукт может длительно храниться в герметичной упаковке.

В нашей стране также разработаны технологии комплексной переработки отходов пивоваренной промышленности.

ВНИИ бродильного производства предложено подвергать пивную дробину ферментативному гидролизу, а на полученных гидролизатах выращивать кормовые дрожжи. Непрогидролизованная дробина и образующийся в процессе гидролиза белково-витаминный концентрат также используют как компонент комбикорма.

Кормовую ценность дробины можно повысить, обогащая белком остаточных дрожжей в соотношении шесть к одному. Это позволяет повысить удои молодняка и ускорить прирост биомассы у коров.

Производство корма, обогащенного микробным белком из пивной дробины и стерилизованного белкового отстоя, разработано в нашей стране в 1968 году. Оно основано на термическом и ферментативном гидролизе.

Примером комплексного использования ВМР является направление, связанное с получением топлива из отходов пивоварения. В США исследована возможность производства этилового спирта из углеводов и некоторых отходов пивоваренной промышленности, пригодного для использования в качестве моторного топлива. А в Германии разработан способ и оборудование для получения метана из отходов пивоварения. Имеется возможность разложения пивной дробины анаэробными бактериями. Белок может быть использован как кормовой продукт, а биогаз пригоден в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания.

Разработана также технология комплексной утилизации отходов пивоварения, которая предусматривает разделение всех отходов технологического процесса на два продукта: обезвоженную на нутч-фильтрах до влажности 75 ... 80 % дробину и белково-витаминный компонент кормов. Последний получается измельчением твердых отходов, их смешиванием с жидкими отходами, в том числе фильтратом дробины. Затем его гранулируют на шнековом экструдере и высушивают инфракрасной сушкой. Такая технология позволяет наиболее полно использовать питательные вещества, имеющиеся в отходах пивоварения.

3. Проектирование системы процессов эффективных технологий утилизации

3.1. Основы построения систем технологических процессов

Системный подход, сочетающий анализ и синтез, является базовой отраслью знаний, развивающей методы проектирования больших и сложных систем и объектов на начальных стадиях разработки и обоснования проектных решений.

Метод системного анализа включает в себя:

- разработку общей схемы решения поставленной проблемы, включая построение обобщенной модели, и целевых программ;
- декомпозицию сложных систем и сложных объектов и операций их разработки и применения;
- методические основы формирования альтернатив;
- способы формирования целей и задач, назначение и согласование критериев;
- общую методологию подготовки и обоснования решений, включая неформальные процедуры.

Решение задачи анализа системы на практике осуществляется методом последовательных приближений. Сначала на основе ориентировочных представлений об организации системы выполняется предварительный анализ. В ходе самого анализа уточняются функция, строение и другие особенности системы. Затем следует новый более точный анализ. Такая итерационная процедура осуществляется несколько раз.

Использование системного анализа при проектировании системы технологических процессов осложнено отсутствием каких-либо сведений об их структуре. Проектируемая система изначально выступает в виде «черного ящика», для которой полностью определены только выходные параметры в виде множества свойств продукта, который необходимо создать.

Далее формулируется гипотеза об исходных сырьевых компонентах и попутных и побочных продуктах. На основании этой гипотезы задаются множества технологических параметров для каждого вида используемого сырья и полученного продукта. Таких гипотез может быть несколько. Тогда задача анализа сводится к построению системы процессов, преобразующей параметры сырья в параметры продукта.

Приступая к системному анализу технологии, следует учитывать, что ее процессы неодинаково влияют на качество конечного продукта. Обязательно имеется центр системы – одна или несколько частей, в которых осуществляются самые важные с точки зрения достижения конечного результата процессы. Выделение этих

частей, их границ, связей с другими частями является необходимым условием успешного системного анализа.

Технологические системы можно описать при помощи изображения технологических процессов в виде условных обозначений (процессоров). Все существующие технологические процессы описываются ограниченным числом процессоров. Обычно для описания технологической системы достаточно тринадцати процессоров. Процессоры образуют операторные модели, описывающие обмен между ними веществом с учетом изменения его состава, свойств и структуры. Примеры операторных моделей приведены в главе 10.

Анализ операторных моделей осуществляется экспертными системами.

Результатом воздействия на полуфабрикат в процессоре является изменение его состояния. Если воздействие приближает состояние полуфабриката к состоянию конечного продукта, процессор отбирается для включения в операторную модель. Если процессор не изменяет состояния полуфабриката, или не может функционировать, он не включается в систему. В результате получается множество систем, составленных возможными комбинациями соединения процессоров.

Более общей по сравнению с синтезом является задача проектирования технологических линий. Несмотря на то, что требования к поведению систем являются доминирующими, при проектировании необходимо учитывать и другие требования и ограничения, содержащиеся в технических заданиях: надежность систем, их приемлемую стоимость, требования энергетического характера, ограничения, связанные с типом технологического оборудования, его массой и габаритами, компоновкой элементов и трассировкой связей. Для расчетов систем с учетом таких требований привлекаются модели и методы, выходящие за пределы рассматриваемой проблемы.

В постановках задач синтеза используется множество систем, полученное в процессе анализа, на котором проводится выбор. Задача синтеза нетривиальна только в том случае, когда это множество систем содержит более одного элемента, иначе говоря, имеется исходная неопределенность.

Возможны следующие постановки задачи синтеза систем технологических процессов.

1. Элементы множества систем могут отличаться параметрами процессоров (модель второго ранга неопределенности, то есть множество полностью определенных систем третьего ранга по принятой в теории автоматизации классификации). Это задача параметрического синтеза. Например, выбора технологических режимов.

2. Элементы множества систем могут различаться структурами процессоров. Это множество является моделью первого ранга неопределенности, то есть множеством определенных моделей второго ранга. В результате структурного синтеза выбирается подмножество структур процессоров (в частном случае единственная структура), после чего имеет место задача параметрического синтеза.

Например, этим процессором может быть технологическая машина, а в результате структурного синтеза необходимо найти ее тип и выбрать технологические режимы.

3. Множество систем может быть моделью нулевого ранга неопределенности, то есть представляет собой множество систем с различной топологией. В результате топологического синтеза выбирается подмножество топологий (в частности единственная топология), после чего решается задача структурного синтеза. Например, система различается местом подсоединения одного процессора. В результате синтеза необходимо найти наилучшее место его включения в операторную модель, то есть определить оптимальный вариант оказания на полуфабрикат обрабатывающих воздействий.

Для описания потоков энергии и информации, проходящих через процессоры, используют математические модели.

Синтез представляет собой повышение ранга моделей, то есть уменьшение неопределенности или разнообразия за счет привлечения информации о пожеланиях ЛПР. Требования удобно рассматривать как множество систем, поведение которых удовлетворительно. Описание этого множества, в отличие от структурно-операторного описания систем, строится на поведенческом языке, характеризуя качественные и количественные требования к технологии.

Назначение математических моделей, описывающих поведение данного процессора, заключается в установлении эффективности его действия.

Под математической моделью технологического процесса будем понимать алгоритм описания данного круга явлений, содержащий две части: математический аппарат и принятые автором модели постулаты или гипотезы.

Создание математических моделей, то есть технология математического моделирования при изучении и прогнозе технологических процессов, состоит из следующих этапов:

- формулировка математической модели процесса;
- идентификация модели с помощью экспериментов;
- верификация модели, то есть сопоставление ее результатов с реальным течением процесса;
- коррекция модели по результатам верификации;
- эксплуатация модели, то есть прогноз течения процесса с помощью модели.

Принято считать, что процесс формулировки модели относится к искусству, а не к науке и целиком определяется опытом и интуицией ЛПР.

Важным этапом анализа математических моделей является декомпозиция – разложение исходного объекта на более простые, как правило, той же природы, что и исходный объект, причем совокупность этих более простых объектов эквивалентна исходному объекту.

Техническая цель декомпозиции – упростить задачу формирования сложной системы путем рассмотрения ее по частям, а организационная цель – расширить

фронт работ по формированию системы, представив автономия разработчикам частей, но сохранив основные факторы управления за разработчиком исходной системы.

3.2. Анализ математической модели технологического объекта

При проектировании сложных технологических объектов практически на всех стадиях широко используют такой метод математического моделирования, как рассмотрение изучаемых объектов в качестве разновидностей сложных систем.

Качество и количество перерабатываемого технологическим объектом полуфабриката зависит от характера потребления и перераспределения механической энергии или теплоты, передаваемой обрабатываемому материалу в рабочем пространстве машины или аппарата. Математические модели, описывающие эти технологические процессы, представляют собой сложные системы, описывающие передачу энергии по связям между элементами и с окружающей средой.

Эти системы в общем случае относятся к динамическим, то есть зависят от времени. Изменения систем во времени отражаются в состоянии системы, характеризуемой величиной, называемой внутренней характеристикой системы. Внутренняя характеристика определяет текущее значение выходных величин – параметров эффекта.

Внутренней характеристикой технологического процесса удобнее всего выбрать функцию передачи основного вида энергии обрабатываемому материалу. Например, для описания процесса экструдирования внутренней характеристикой удобно принять напряженное состояние обрабатываемого материала на контактных поверхностях рабочих органов машины.

Примем в качестве гипотезы, что подвергаемые синтезу математические модели каждой операции технологического процесса должны описывать энергетическое состояние обрабатываемого материала в рабочем пространстве. Такие модели включают модель свойств материала, которая наиболее достоверно проявляется при исследуемых воздействиях.

Согласно этой гипотезе параметры эффекта оптимизируемого процесса выводятся из энергетического состояния обрабатываемого материала.

Изложенная структура математической модели позволяет рассматривать взаимодействия рабочего пространства с обрабатываемым материалом, не накладывая ограничения на изменение внутренней характеристики системы во времени.

На рисунке 3.1 представлена структура математической модели технологического объекта, которая состоит собственно из системы математических моделей, необходимых для проведения векторной оптимизации, и тесно связанной с этой моделью базой данных.

Основой базы данных является множество T технологических параметров процесса, являющихся в данном случае управлениями. Множество T сформировано из технологических требований к процессу и управляет внешними величинами математической модели, которые разделены на четыре множества параметров:

- множество свойств обрабатываемого материала M ;
- множество кинематических параметров процесса K ;
- множество структурных параметров технологического объекта P ;
- множество геометрических параметров рабочего пространства G .

Таким образом, системе математических моделей в качестве исходных данных передаются следующие векторы:

- вектор параметров свойств \vec{m} обрабатываемого материала из множества допустимых альтернатив M ;

- вектор кинематических параметров процесса \vec{k} из множества допустимых альтернатив K ;

- вектор структурных параметров \vec{p} (не выражаемых в единицах измерения геометрических величин) из множества допустимых альтернатив P ;

- вектор геометрических параметров пространства взаимодействия \vec{g} из множества допустимых альтернатив G .

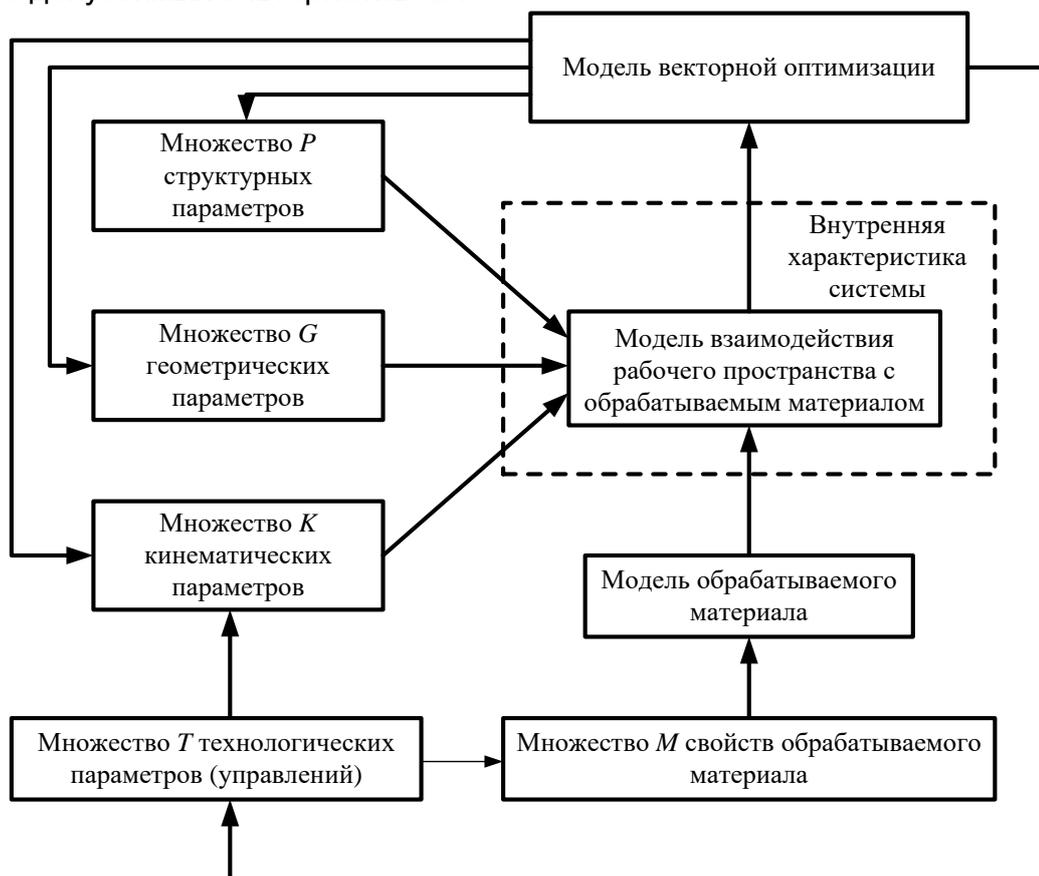


Рисунок 3.1. Структура математической модели технологического объекта

Вектор \vec{m} должен содержать необходимое количество информации для построения замкнутой модели свойств обрабатываемого материала. Для технологических машин моделью свойств часто является реологическая модель обрабатываемого материала.

Векторы K , P , G и результаты вычислений по модели свойств должны обеспечить замкнутость ядра системы – модели ее энергетического состояния. Для технологических машин и аппаратов эта модель описывает потоки механической энергии, которыми обрабатываемый материал обменивается с рабочим пространством. Например, для процесса экструдирования эти потоки выражены через напряженное состояние обрабатываемого материала на контактных поверхностях рабочих органов во всех полостях рабочего пространства экструдера. Таким образом, напряженное состояние является в данном случае внутренней характеристикой системы. В свою очередь, внутренняя характеристика системы оказывает влияние на модель свойств обрабатываемого материала. Внутренняя характеристика системы позволяет использовать модель векторной оптимизации, которая представляет собой подсистему, состоящую из трех элементов (рисунок 3.2).

Модель параметров эффекта на основе внутренней характеристики системы формирует параметры эффекта, необходимые и достаточные для проведения параметрического синтеза.

Множество параметров эффекта W_l (где l – множество качеств и свойств технического объекта) может быть представлено в виде

$$W_l = W_l(M, K, P, G) \quad (3.1)$$

Эти параметры эффекта должны характеризовать масштаб процесса, эффективность процесса и качество получаемого в процессе полуфабриката.



Рисунок 3.2. Структура математической модели векторной оптимизации

По результатам исследований В.Г. Гмошинского для технологического потока принятый уровень доверительной вероятности может составлять 80 %. В связи с этим количество параметров эффекта может не превышать пяти.

Параметры эффекта имеют многоуровневую структуру.

На первом уровне находятся параметры эффекта, определяемые непосредственно из внутренней характеристики системы, например, производительность, мощность сил полезного сопротивления. На втором уровне – параметры эффекта, определяемые с помощью параметров эффекта первого уровня, к ним относится энергоёмкость процесса. На третьем уровне расположен, например, коэффициент полезного действия процесса, определяемый с помощью параметров эффекта второго уровня. Под коэффициентом полезного действия понимается отношение полезно израсходованной на обработку полуфабриката энергии ко всей энергии, проходящей через рабочее пространство.

Таким образом, оптимизация параметров эффекта технологического процесса сводится к отысканию максимума коэффициента третьего уровня при выполнении ограничений, наложенных на параметры эффекта первого и второго уровней.

Множество ограничений оптимальной поверхности параметров эффекта формируется ЛПР, проводящим оптимизацию.

Ограничения параметров эффекта имеют вид

$$w_l \leq W_l^d, \quad (3.2)$$

$$W_l^k \leq w_l \leq W_l^t, \quad (3.3)$$

$$W_l^n \leq w_l, \quad (3.4)$$

где $W_l^d, W_l^k, W_l^t, W_l^n$ – возможные уровни ограничения параметров эффекта.

В случае, если проводится имитационное моделирование, ограничения на параметры эффекта не накладываются.

В заключение используют модель анализа участка поверхности параметров эффекта, удовлетворяющего наложенным ограничениям параметров эффекта, при проведении оптимизации, либо выбранного из других предпосылок при имитационном моделировании.

Исполнение математической модели векторной оптимизации вызывает необходимость изменения определенным образом векторов \vec{m} , \vec{k} , \vec{p} , \vec{g} , формирующих внутреннюю характеристику системы, что позволяет достичь глобального оптимального проектного решения.

Таким образом, структурно-параметрический синтез технологического объекта (механизма или аппарата) по разработанной математической модели может быть произведен на множествах M, K, P и G . Следует отметить, что членами этих

множеств могут быть только величины, входящие во внутреннюю характеристику системы.

3.3. Технология вычислительного эксперимента при синтезе технологического объекта

Механические процессы взаимодействия обрабатываемого материала с рабочими органами машины или теплофизические процессы в аппарате для любого проектируемого объекта представляют собой сложные многопараметрические нелинейные процессы, теоретическое и экспериментальное определение свойств которых традиционными методами затруднено, однако требуется для проведения параметрического синтеза. Необходимые свойства могут быть определены численными методами.

Описание алгоритма вычислительного эксперимента. Задача определения внутренней характеристики системы сводится в общем случае к решению системы нелинейных дифференциальных уравнений. Параметры эффекта вычисляются из внутренней характеристики при различных комбинациях членов множеств M, K, P и G , которые, как отмечено выше, изменяются по определенному плану. Следующим этапом решения задачи является нахождение оптимального (или рационального) решения по нескольким параметрам. Существует несколько методов отыскания такого решения. Например, оптимизация по Парето.

Область Парето характеризуется тем важным свойством, что на ней ни одно решение не может быть улучшено по одному из показателей без ущерба для другого. Выделение доминирующих решений значительно сокращает перечень возможных решений и тем самым облегчает выбор единственного решения, который проводится неформальными методами с привлечением задач верхнего иерархического уровня. Существуют предложения по формализации процедуры такого выбора путем введения некоторой аксиоматики компромисса.

Общие методы векторной оптимизации направлены на отыскание области Парето (оптимальных поверхностей).

Метод рабочих характеристик состоит в отыскании оптимума одного параметра эффекта, а все остальные параметры эффекта, переведены в разряд ограничений типа равенств. Найденное максимальное значение одного параметра будет зависеть от фиксированных значений остальных параметров. Эта зависимость называется рабочей поверхностью. Рабочая поверхность, рассматриваемая как функция одного из своих аргументов при фиксированных значениях других аргументов, называется рабочей характеристикой.

Необходимым и достаточным условием совпадения рабочей поверхности и оптимальной является строгая монотонность рабочей поверхности, то есть монотонно убывающий характер всех соответствующих ей рабочих характеристик.

Основная сложность рассмотренного метода векторной оптимизации состоит в том, что оптимизацию приходится проводить с учетом не только исходных ограничений, но и с учетом дополнительных ограничений и для различных сочетаний зафиксированных значений параметров эффекта.

Весовой метод заключается в том, что ищут максимум взвешенной суммы для различных значений положительных весовых коэффициентов. Максимум взвешенной суммы и соответствующие ей значения показателей зависят от значения выбранных весов. Параметрическую запись взвешенной суммы называют **весовой поверхностью**. Весовая поверхность содержит только эффективные точки, но не все возможные эффективные точки в общем случае принадлежат весовой поверхности. Если весовая поверхность оказывается определенной во всей области интересующих нас значений, то она в этой области совпадает с искомой областью компромиссов.

Метод векторной оптимизации на дискретном множестве заключается в том, что выбираются крайние точки, то есть такие точки, в которых достигается максимум по какому-либо параметру эффекта, эти точки будут эффективными. Из оставшихся выявляются точки, для которых вновь найдется хотя бы одна лучшая, у которой все параметры эффекта не хуже и хотя бы один лучше. Выявленные точки являются неэффективными и исключаются из рассмотрения. Из оставшихся точек опять выбирают крайние, оставшиеся снова сравнивают с найденными крайними точками и выявляют неэффективные. И так продолжается до тех пор, пока не будут исследованы все исходные точки.

Метод векторной оптимизации при линейных целевых функциях и линейных ограничениях, когда параметры эффективности являются линейными функциями на множестве. Множество является выпуклым многогранником, то есть определяется линейными ограничениями. Эффективные точки в этом случае лежат на границе многогранника ограничений, что существенно облегчает их нахождение. При этом достаточно найти опорные точки, которые лежат в вершинах многогранника ограничений, а затем из этих точек выделить эффективные.

Остальные эффективные точки, принадлежащие области Парето, являются линейными комбинациями найденных эффективных опорных точек.

Выпуклый многогранник ограничений в пространстве параметров эффекта при линейном отображении является также выпуклым многогранником. Оптимальная поверхность в этом случае представляет собой ту часть границы этого многогранника, которая содержит эффективные опорные точки. Опорная точка будет эффективной, если, во-первых, среди всех остальных опорных точек нет точки, у которой все показатели эффективности не хуже и хотя бы один лучше, и, во-вторых,

эффективная точка в пространстве должна лежать на границе выпуклого многогранника, то есть не должна быть внутренней точкой этого многогранника.

Векторная оптимизация при гладких целевых функциях и отсутствия ограничений позволяет ответить на вопрос, есть ли эффективные точки вне области или все возможные точки лежат внутри данной области. Если все эффективные точки лежат внутри области, то это значит, что задача нечувствительна к введенным ограничениям и их пересмотр не ведет к улучшению решения, его можно улучшить, только изменив функции (изменив структуру объекта). Точка является эффективной, если не найдется такого вектора-дифференциала, для которого величина этого вектора была бы больше, чем в данной точке.

Построение целевой функции как инструмента получения параметров эффекта и их оптимизации перспективно при использовании статистических моделей, построенных по результатам экспериментального исследования технологического процесса в виде функции отклика. Однако в этом случае необходимым условием является возможность экспериментального определения выбранных параметров эффекта.

Обычно при этом используется планирование эксперимента, то есть процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для получения функции отклика с требуемой точностью.

При планировании эксперимента учитываются:

- стремление к минимизации общего числа опытов;
- одновременное варьирование всеми факторами;
- использование формального алгоритма при проведении планирования.

Алгоритмы планирования эксперимента могут быть применены при вычислительных экспериментах для отыскания оптимальных решений.

3.4. Применение метода рабочих характеристик для оптимизации технологического объекта

Метод рабочих характеристик – один из наиболее удобных методов проведения параметрического синтеза технологического оборудования. Как было сказано выше, в нем ЛПР ищет оптимум одного из параметров эффекта (например w_1) при остальных показателях, переведенных в разряд ограничений типа равенств, то есть решается задача нахождения $w_{1\max}$ при $w_2 = w_{20}$; $w_3 = w_{30}$; ...; $w_p = w_{p0}$.

Найденное максимальное значение $w_{1\max}$ зависит от фиксированных значений w_{20} , w_{30} , ..., w_{p0} . Эта зависимость называется рабочей поверхностью

$$w_{1\max} = f_p(w_{2o}, w_{3o}, \dots, w_{po}). \quad (3.5)$$

Для нахождения рабочей поверхности определение величины $w_{1\max}$ производится при всех интересующих ЛПР комбинациях параметров w_{2o}, \dots, w_{po} .

Рабочая поверхность, рассматриваемая как функция одного из своих аргументов, называется рабочей характеристикой. Таким образом, можно составить $p-1$ рабочую характеристику. Доказано, что рабочая поверхность содержит все точки, принадлежащие оптимальной поверхности. Необходимым и достаточным условием совпадения рабочей и оптимальной поверхностей является монотонно убывающий характер всех соответствующих этой поверхности рабочих характеристик. Поэтому после отыскания рабочих характеристик необходимо исключить из них все возрастающие участки.

Суть метода состоит в том, что в прямоугольной системе координат определяется зависимость одного параметра эффекта от другого параметра эффекта при неизменных значениях всех остальных параметров оптимизируемого объекта. При изучении влияния структурного, кинематического или геометрического элемента из базы данных для данного технологического объекта его фиксированное значение изменяется ступенчато при постоянных значениях остальных элементов. Получается система зависимостей первого параметра эффекта от второго, разнящихся значениями исследуемого элемента и образующими координатную сетку другой системы координат, в которой переменной является этот элемент.

По математической модели, описывающей процесс функционирования технологического объекта, проводится вычислительный эксперимент. По результатам вычислений строится поверхность рабочих характеристик объекта. Введя ограничения параметров эффекта, можно определить область оптимальных значений параметров эффекта.

Анализ результатов предопределен программой вычислений, когда вместе с вычислением внутренних параметров большой системы вычисляются параметры эффекта и ограничиваются допустимыми значениями параметров эффекта.

До начала оптимизации ЛПР должен определить ограничения параметров эффекта в виде (1.2), (1.3), или (1.4). При построении рабочих характеристик первого, второго, третьего и так далее до l -го параметра необходимо включать эти ограничения в число определяемых значений, причем таким образом, чтобы в область допустимых значений попало достаточное число функциональных зависимостей рабочих характеристик.

Тогда в принятой системе координат функциональные зависимости на рабочей поверхности ограничат оптимальный участок, если таковой имеется. В случае

необходимости оптимальный участок может быть ограничен значениями первого и второго основных параметров эффекта в виде $w_{O1} = const$ и $w_{O2} = const$.

По результатам оптимизации, полученным аналитически, производится графическая интерпретация полученных результатов. При этом на рабочей поверхности должен быть выделен участок, оптимальный по исследуемому параметру, если таковой имеет место.

Графическое представление зависимостей полученных результатов имеет более наглядный вид взаимосвязи между интересующими ЛПР параметрами.

3.5. Особенности вычислительного эксперимента

Идентификация математической модели. Важным этапом создания адекватной математической модели является ее идентификация, то есть определение внешних величин, описывающих свойства моделируемого процесса. Большинство внешних величин идентифицируется ЛПР. К таким величинам относятся все элементы множеств K , G и большая часть элементов множества P . С другой стороны все элементы множества M подлежат экспериментальному определению.

Можно выделить следующие три способа определения внешних величин:

- решение задачи о минимизации отклонений имеющихся экспериментальных значений выходных величин от тех, которые дает математическая модель при совпадающих начальных и граничных условиях;

- непосредственное экспериментальное определение внешних величин;

- использование значений внешних величин из литературных источников.

Строгую границу между этими способами провести затруднительно, так как все они в той или иной степени используют элементы математического моделирования.

Первый способ может быть применен в целом для математической модели функционирования технологического объекта, определяющей его параметры эффекта, если неизвестна одна внешняя величина. Если неизвестно несколько внешних величин, следует выделить из модели функционирования технологического объекта подсистемы, таким образом, чтобы в каждой подсистеме имелась только одна неизвестная внешняя величина. Если количество неизвестных внешних величин больше возможного числа подсистем, необходимо создавать специальные математические модели, не входящие в систему основной модели, функционирования технологического объекта.

Второй способ обладает простотой и наглядностью, однако требует использования специальной аппаратуры для проведения физических экспериментов, позволяющей непосредственно измерять внешнюю величину и при этом фиксировать с достаточной степенью точности условия проведения эксперимента. Такая

возможность бывает редко. Обычно в распоряжении ЛПР имеются косвенные методы, а результаты экспериментов требуют достаточно сложной обработки методами математической статистики.

Третий способ имеет наименьшую трудоемкость, однако при его использовании следует убедиться, что используемые значения внешних величин адекватны исследуемому процессу.

Общая стратегия определения внешних величин должна обеспечивать минимум физических экспериментов, включая определение параметров эффекта и определение непосредственно внешних величин модели.

В результате обработки результатов определения неизвестной внешней величины для нее может быть установлена значимая функциональная зависимость от других параметров, входящих во внутреннюю характеристику математической модели. В этом случае можно использовать кусочно-постоянное представление внешней величины в достаточно малом интервале изменения каждой из независимых переменных этой функции, то есть использовать ее табличное представление. Если такое представление неудобно, полученную функцию можно включить в математическую модель внутренней характеристики, если она не зависит от использованных в модели постоянных интегрирования. Другое требование к виду функции состоит в том, что ее применение не должно увеличивать количество корней уравнений внутренней характеристики. В противном случае может возникнуть проблема отбора «правильных» значений внутренней характеристики системы.

Тестирование модели на адекватность реальному объекту и программного средства на точность решения (верификация модели).

Начинать верификацию следует с проверки адекватности описания моделью ранее установленных свойств исследуемого процесса. Этот этап верификации должен проводиться сразу после отладки программного средства и заключается установлении качественного совпадения свойств объекта, полученных из анализа расчетных зависимостей, с наблюдаемыми свойствами. Нельзя допускать, чтобы внутренние величины модели принимали невероятные значения, или характер изменения внутренней величины в модели противоречил наблюдениям в реальном процессе.

Стандартной процедурой, завершающей верификацию модели, является сравнение параметров эффекта, которые могут быть измерены непосредственно из физического эксперимента, с вычисленными параметрами эффекта при совпадающих граничных условиях и оценка совпадения этих величин методами математической статистики. Такую процедуру следует проводить по всем параметрам эффекта, которые допускают экспериментальное определение. Если отклонения не превосходят допустимой величины, модель можно считать верифицированной в данном интервале режимов исследуемого процесса. Если модель не удается верифицировать на всем интересующем ЛПР интервале режимов, можно сделать

попытку выбрать часть этого интервала, и верифицировать модель с учетом введенных ограничений. В случае успеха этой верификации модель принимается адекватной для данного участка необходимого интервала параметров, а для режимов, не вошедших в этот участок, разрабатываются новые модели.

3.6. Варианты технологии утилизации органических отходов

С учетом изложенного выше проведена разработка технологии ресурсосберегающей переработки пивной дробины и спиртовой барды в белково-витаминные кормовые продукты. Такая технология должна быть малоотходной для обеспечения охраны окружающей среды. Конечным продуктом этой технологии является сухое вещество, выделенное из высоковлажных отходов. В том числе должны быть сохранены водорастворимые вещества этих отходов. Для удобства дальнейшего использования конечный продукт должен быть гранулированным. Для образования гранул в конечном продукте имеется связующий компонент.

Была выдвинута гипотеза о том, что повышения потребительских свойств высоковлажных отходов бродильных производств можно добиться, смешивая их с капиллярно-пористым наполнителем, имеющим адекватный химический состав. Для предлагаемой технологии наполнителем и связующим компонентом могут быть отходы переработки зерна, в частности пшеничные отрубей.

Простое смешение высоковлажных отходов с зерноотходами не облегчает решения задачи съема влаги, так как насыпь влажных зерноотходов невозможно продуть потоком атмосферного воздуха. Чтобы продукт можно было продувать атмосферным воздухом при небольшом давлении, следует придать насыпи порозность. Необходимо придать продукту форму небольших по размерам кусочков с развитой поверхностью и капиллярно-пористой структурой. Этого можно достигнуть, увлажняя зерновые отходы отходами бродильного производства с последующим формованием. Это совпадает с требованием к получению конечного продукта в виде гранул.

Таким образом, за счет кондуктивного массообмена получается полуфабрикат – смесь с заданной технологической (удобной для дальнейшей обработки) влажностью. В нем сохраняются все водорастворимые вещества. Последующим экструдированием полуфабрикату можно придать форму с большой удельной поверхностью, выгодной для последующей конвективной сушки. Придание полуфабрикату технологической влажности и формы обеспечивает стабильность процесса конвективной сушки в наперед заданных наиболее экономичных режимах высушивания, обеспечивающих требуемое качество продукта.

В результате проведенного системного анализа установлены основные технологические процессы: кондуктивный влагообмен высоковлажных отходов с наполнителем при их смешении; формообразование полуфабриката; сушка полуфабриката.

Предварительный структурный синтез позволил выделить три варианта схемы реутилизации высоковлажных отходов бродильных производств и зерновых отходов в качестве наполнителя (рисунок 3.3).

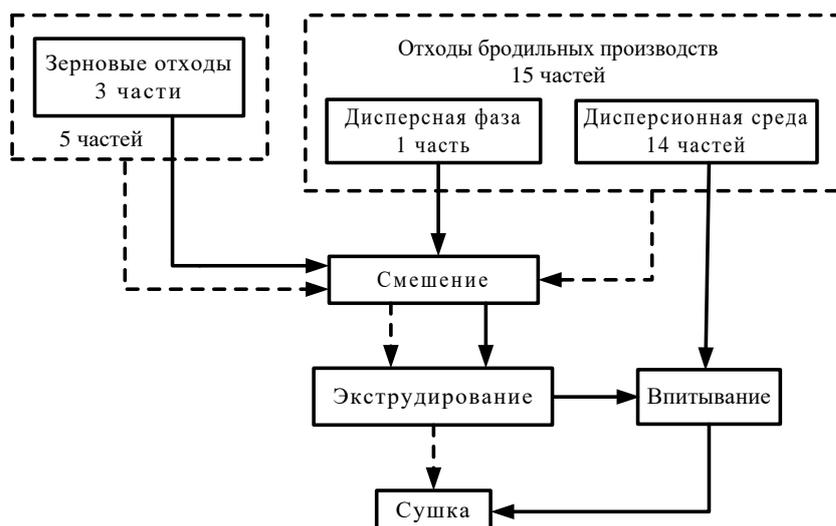


Рисунок 3.3. Схема центра системы получения кормового продукта утилизацией отходов бродильного производства и зерновых отходов

Имеется три варианта реализации этой схемы:

- с поглощением дисперсионной среды экструдатом непосредственно из отходов (показано сплошными линиями);
- с промежуточным отделением дисперсионной среды с последующей впитыванием ее экструдатом (показано сплошными линиями);
- непосредственный ввод дисперсионной среды в полуфабрикат при смешении (показано пунктиром).

Первая две технологии требует использования в 1,6 раза меньшего количества зерновых отрубей, чем третья.

Однако они имеют, по крайней мере, одну дополнительную операцию: впитывание экструдированным полуфабрикатом дисперсионной среды высоковлажных отходов.

Зерноперерабатывающей промышленностью вырабатывается большое количество отходов, пригодных для приготовления полуфабриката. Однако для уменьшения количества используемых зерновых отрубей к ним могут быть добавлены идентичные отходы бродильного производства, например, для пивоварения это сплав ячменя и отходы его полирования.

Описанные технологии защищены патентами РФ № 2248720 и № 2266677.

4. Обзор процессов, реализующих технологию утилизации

Анализ литературных данных показывает, что, несмотря на широкий спектр существующих методов утилизации отходов пивоваренного и спиртового производства, практически отсутствуют ресурсосберегающие технологии, с полной утилизацией пивной дробины и спиртовой барды, в том числе их водорастворимых компонентов, и получением кормового продукта, пригодного к длительному хранению. Наиболее перспективным направлением является применение физико-механических процессов обработки. В предыдущей главе показано что, центром системы, реализующей требуемую технологию утилизации, могут быть процессы экструдирования, кондуктивного влагообмена и сушки. Поскольку, как отмечалось в главе 2, предпринимались попытки использования кондуктивного влагообмена, обработки давлением (в частности экструдирования) и сушки рассматриваемого сырья, рассмотрим перспективные варианты реализации этих процессов.

4.1. Основные режимы и способы экструдирования пищевых масс

Полуфабрикаты растительного происхождения обычно прессуют штемпельными брикетными прессами, прессами-грануляторами и шнековыми экструдерами. Использование штемпельных брикетных прессов и прессов-грануляторов ограничено тем, что они эффективно работают только при небольшой влажности полуфабриката. Например, грануляторы работают эффективно при относительной влажности прессуемого материала до 18 %. Кроме того, брикетные прессы и грануляторы ограничивают форму получаемого полуфабриката. Гранулы имеют цилиндрическую форму с диаметром от 2 до 20 мм и длиной от 1 до 2 диаметров, а брикеты имеют квадратное или прямоугольное сечение значительно больших размеров. Шнековые экструдеры лишены указанных недостатков.

Все перечисленные прессы реализуют процесс экструдирования. Однако обычно экструдированием называют формование полуфабрикатов с помощью экструдеров, имеющих шнековые прессующие механизмы. По температуре экструдированной массы различают три режима экструдирования: холодный, теплый и горячий (варочный).

При холодном режиме относительная влажность экструдированного материала составляет от 30 до 60 %. При этом материал обладает повышенной пластичностью и низкой вязкостью. В нем происходят только структурно-механические изменения. Температура экструдата на выходе из экструдера не более 60 °С, давление перед матрицей достигает 6 ... 10 МПа.

При теплом режиме относительная влажность экструдруемого материала составляет от 20 до 30 %. Температура экструдата на выходе из экструдера за счет работы сил трения возрастает до 70 ... 110 °С. Давление перед матрицей составляет 8 ... 14 МПа. Высокие давление и температура приводят не только к структурно-механическому, но и к химическому преобразованию продукта.

При горячем режиме относительная влажность экструдруемого материала составляет от 10 до 20 %. Температура продукта на выходе из экструдера достигает 110 ... 200 °С, при давлении перед матрицей 12 ... 25 МПа. При таких высоких температуре и давлении экструдат подвергается глубочайшим физико-химическим изменениям.

При экструдировании высоковлажных материалов, наиболее вероятно возникновение холодного или теплого режимов.

Основными узлами экструдера являются: шнековый корпус, один или несколько шнеков, размещенных в корпусе, загрузочное устройство и формирующая головка, установленные на корпусе, а также привод. При необходимости корпус может быть оснащен нагревающими или охлаждающими элементами, а также системами задания и поддержания температурного режима и другими контрольно-измерительными и регулируемыми устройствами.

Формирующий узел является частью корпуса и включает матрицу с фильерами разнообразного сечения: прямоугольного (от квадратного до щелевого), круглого, или фигурного.

Наибольшее распространение получили одношнековые и двухшнековые экструдеры.

Двухшнековые экструдеры в свою очередь делятся на самоочищающиеся со шнеками, входящими в зацепление друг с другом, и экструдеры со шнеками, не входящими в зацепление. Экструдер с двумя шнеками, не входящими в зацепление друг с другом, в свою очередь, подразделяются на экструдеры с вращающимися в противоположных направлениях шнеками и экструдеры со шнеками, вращающимися в одном направлении. Шнеки, входящими в зацепление, также могут вращаться как в одном направлении, так и в противоположных.

Одношнековые экструдеры делятся на: экструдеры с неизменными шагом и диаметром вала шнека; экструдеры с уменьшающимся шагом витка шнека; экструдеры с увеличивающимся диаметром вала шнека; экструдеры, имеющие шнек с уменьшающимся шагом витка и увеличивающимся диаметром вала; экструдеры с коническим корпусом и шнеком с равномерным шагом; экструдеры, имеющие конический корпус и уменьшающийся шаг винта шнека.

В одношнековых экструдерах для улучшения смешивания экструдата требуется устанавливать специальные конструктивные элементы (насадки типа «торпедо», компрессионные затворы), самоочистка в них отсутствует, масса может задерживаться в витках, создавая разрыв потока. При высокой температуре

возникает опасность спекания массы, а при высоком содержании массовой доли жира и воды наблюдается неравномерный выход продукта. Эти недостатки не имеют места в самоочищающихся двухшнековых экструдерах. Однако технология изготовления двухшнековых экструдеров значительно сложнее, чем одношнековых. Поэтому и стоимость их намного больше. Кроме того, в двухшнековых экструдерах происходит износ шнеков более интенсивный чем в одношнековых, что, во-первых, сказывается на качестве получаемого продукта, во-вторых, требует значительных затрат на восстановление шнеков.

При точном соблюдении технологических режимов одношнековые экструдеры экономичнее двухшнековых.

В настоящее время около сорока ведущих зарубежных фирм выпускают и поставляют на мировой рынок экструдеры различных конструкций производительностью от 30 до 11000 кг/ч.

В ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» разработаны две конструкции экструдеров малой производительности. В универсальном прессе-экструдере конструкция позволяет реализовать все три температурных режима экструзии. В другой конструкции прессы-экструдера малой производительности использован привод с импульсной передачей крутящего момента шнеку. Он позволяет осуществить режим виброэкструзии. Предполагается, что энергоемкость виброэкструзии ниже, чем у обычных экструдеров. Ведутся исследования по применению виброэкструзии для утилизации спиртовой барды.

При перемещении продукта в рабочей зоне экструдера он уплотняется, прогревается за счет когезионно-адгезионных взаимодействий между ним и рабочими органами экструдера и перемешивается. В результате перерабатываемый материал подвергается фазовым превращениям: из сыпучего состояния в высоко-эластичное, а затем в вязко-текучее.

На основе фазовых переходов материала шнековую камеру экструдера разделяют на ряд технологических зон: зона загрузки, зона транспортирования, зона сжатия, зона гомогенизации и зона формования. В зоне загрузки не наблюдается каких-либо значительных изменений в продукте. В зоне транспортирования происходит интенсивное смешение исходных компонентов, удаляется воздух и другие газообразные включения.

Далее перерабатываемый материал попадает в зону сжатия, где происходит его интенсивная обработка под действием деформаций сдвига. Материал уплотняется, температура его повышается. Происходит разрушение структуры перерабатываемого материала, его белкового и углеводного комплексов.

В зоне гомогенизации происходят структурные преобразования белков и крахмала, глубина которых зависит от режима экструдирования. Перерабатываемый материал переходит в вязко-текучее состояние.

В зоне формования также наблюдаются значительные изменения, При выходе материала из фильеры происходит релаксация деформаций, продукт разбухает, влага частично испаряется.

При экструзии перерабатываемая масса подвергается интенсивному гидро-термо-механо-химическому воздействию, в результате чего энергия связи молекул воды с частицами сырья снижается. Молекулы воды свободно перемещаются внутри экструдированной массы, превращают ее в упруго-вязко-пластичную массу с непрерывной тестообразной структурой.

Показано, что при экструдировании растительного сырья происходят изменения в составе и свойствах белков, углеводов, жиров и витаминов, определяющих его пищевую и биологическую ценность. Глубина этих изменений определяется параметрами экструзии.

4.2. Основные режимы и способы увлажнения и сушки пищевых масс

Впитывание влаги в коллоидно-капиллярно-пористые материалы является сложным процессом, при котором вода вступает с увлажняемым полуфабрикатом в различные формы взаимодействия. Процесс впитывания аналогичен процессу сорбции.

Процесс увлажнения может быть реализован двумя способами: подводом к полуфабрикату капельной жидкости и окутанием полуфабриката в жидкость. Выбор между этими способами определяется требованиями к технологическому оборудованию, реализующему процесс.

В связи с тем, что пока еще не накоплено необходимого количества данных о действительных значениях кинетических коэффициентов процесса увлажнения, в инженерной практике используются эмпирические и полуэмпирические методы расчета времени увлажнения.

Одним из возможных способов определения времени увлажнения до необходимой величины является построение кривых увлажнения.

Отличие процесса сушки от процесса увлажнения состоит в том, что он аналогичен процессу десорбции и, следовательно, протекает в условиях подвода энергии извне, то есть является энергозатратным процессом. Поэтому энергосбережение является главным требованием к процессу сушки.

Для сушки жидких продуктов наибольшее применение получили распылительные и вальцевые сушилки.

Распылительные сушилки позволяют получить высокое качество сухого продукта, но их недостатком является большая ресурсоемкость процесса, которую можно уменьшить распылением продукта высокотемпературным теплоносителем. Однако при высокой температуре теплоносителя возможно нежелательное разложение входящих в продукт химических соединений.

Действие кондуктивных сушилок основано на кондуктивном подводе тепла. Процессы кондуктивной сушки отличаются сравнительно низкими затратами тепловой энергии. Они особенно эффективны для сушки жидких продуктов, благодаря интенсивной теплоотдаче, возникающей вследствие плотного контакта греющей поверхности с наносимым на нее слоем продукта. Однако эффективность сушки и качество сухого продукта сильно зависят от равномерности толщины нанесенного слоя продукта и полноты его удаления с греющей поверхности.

Обезвоживание жидких продуктов в псевдооживленном слое. Получили распространение два варианта процесса обезвоживания: грануляция в псевдооживленном слое, когда высушенный продукт получают в виде гранул, и сушка в слое гранул инертного материала, когда его получают в виде порошка.

Обезвоживание происходит в камере, в условиях псевдооживления гранулируемого продукта или инертных тел. Высушиваемый продукт вводится в слой и попадает на поверхность частиц. Здесь он высушивается за счет теплоты псевдооживляющего сушильного агента. При грануляции частицы, достигшие заданного размера, выводятся из слоя. При сушке на инертных гранулах высушенный продукт отделяется от их поверхности и уносится потоком воздуха в циклон.

Благодаря активной гидродинамике псевдооживленный слой дает высокую эффективность сушки, что обуславливает высокие технико-экономические показатели установки. Это позволяет создавать малогабаритные сушилки с небольшой металлоемкостью и стоимостью.

К преимуществам процесса грануляции следует отнести получение непылящего продукта с высокой насыпной массой, возможность обработки широкого круга материалов. При сушке на инертных гранулах псевдооживленный слой обладает большей гидродинамической устойчивостью, так как инертные гранулы постоянно находятся в сушильной камере; нет необходимости подачи в слой мелких частиц ретур (затравки), получаемых дроблением готового продукта, с целью поддержания стационарного режима или создания условий, обеспечивающих образование внутреннего ретур.

При сушке на инертных гранулах продолжительность пребывания продукта в аппарате составляет от долей минуты до нескольких минут в отличие от грануляторов, где время пребывания достигает нескольких часов. В связи с этим сушилки с инертными гранулами более приспособлены для обезвоживания термочувствительных пищевых продуктов.

В литературе приводятся описания конструкции аппаратов с кипящим слоем в цилиндрической, цилиндроконической камере и с фонтанирующим слоем.

Сравнение различных конструкций аппаратов показывает, что наиболее интенсивное псевдооживление создают аппараты с фонтанирующим или вихревым слоем, а также виброкипящим слоем. В последнем типе аппаратов, где газораспределительная решетка совершает колебательные движения, сочетается

достаточно высокая интенсивность движения частиц с небольшими затратами на псевдооживление.

Сушка жидких продуктов в псевдооживленном слое происходит в условиях теплообмена при стохастическом характере движения частиц. Поэтому ее исследуют, в основном, экспериментально.

Имеется методика расчета газораспределителей и устройств ввода жидких продуктов в псевдооживленный слой. Разработана методика расчета сушилок с псевдооживленным слоем инертного материала.

Сушка экструдатов растительного происхождения. Среди экструдированных материалов наиболее разработан процесс сушки макаронных изделий. Наибольшее распространение получила конвективная сушка. По температуре сушильного агента различают низкотемпературный (меньше 60 °С), высокотемпературный (70...90 °С) и сверхвысокотемпературный (больше 90 °С) режимы сушки.

При низкотемпературном режиме можно сушить макаронные изделия на открытом воздухе в течение 3 ... 5 суток. Однако обычно этот режим реализуют в шкафовых безкалориферных сушилках. Время сушки при этом сокращается до 5 ... 8 часов для коротких и до 16 ... 24 часа для длинных макарон. Помимо большой длительности сушки влага с поверхности экструдата удаляется неравномерно, что может привести к сильному искривлению изделий во время сушки.

В настоящее время предложены различные варианты высокотемпературных режимов сушки. Они основаны на том, что повышение температуры сушки макаронных изделий должно сопровождаться повышением относительной влажности агента сушки и обеспечиваться автоматическим управлением процессом сушки.

Сверхвысокотемпературные режимы, которые сокращают время сушки по сравнению с высокотемпературными режимами, не могут быть реализованы конвективным способом. Для их реализации необходимо воздействие на экструдат энергетического поля – терморadiационная сушка или сушка в электромагнитном поле высокой и сверхвысокой частоты.

В отличие от терморadiационной и тем более конвективной сушки особенностью сушки в электромагнитном поле токов сверхвысокой частоты (СВЧ) являются прогрев влажного материала на всю глубину независимо от его толщины. Использование СВЧ энергии сокращает длительность термической обработки продуктов в 5 ... 10 раз, уменьшая энергозатраты на единицу продукции в 1,5 ... 2,5 раза.

Использование конвективного способа сушки сохраняет в натуральном виде все питательные вещества, содержащиеся во влажных отходах бродильных производств, и уменьшает энергопотери по сравнению с другими видами сушки.

5. Оптимизация работоспособности предложенной технологии

Обязательным условием создания новой технологии является проверка в лабораторных условиях реализуемости выбранных технологических процессов обработки данных полуфабрикатов для определения их свойств. Необходимость таких исследований диктует отсутствие достаточных сведений о свойствах полуфабрикатов в процессе их обработки. Применительно к рассматриваемой технологии — это процессы центра системы: экструдирование смеси зерновых отходов с дисперсной фазой отходов бродильных производств и впитывание дисперсионной среды этих отходов. Необходимо установить, будет ли полуфабрикат экструдироваться с необходимой производительностью, сохранять приданную ему при экструдировании форму и впитывать достаточное количество влаги.

5.1. Исследование свойств экструдата смеси зерновых отходов с высоковлажными органическими отходами

Подготовка смеси высоковлажных отходов с зерновыми отходами.

Исследована возможность экструдирования смесей пивной дробины или спиртовой барды с зерновыми отходами, а также поглощающей способности зерновых отходов в отношении пивной дробины и спиртовой барды.

Эксперимент имел следующие этапы:

- разделение отходов на дисперсионную среду и дисперсную фазу;
- увлажнение зерноотходов дисперсной фазой (взвешенные частицы, находящиеся в отходах) до заданной влажности;
- экструдирование полученной смеси через щелевую фильеру или цилиндрическую фильеру;
- увлажнение экструдированных полуфабрикатов дисперсионной средой (водой отходов с растворенными в ней сухими веществами);
- высушивание атмосферным воздухом.

Качество экструдатов растительных отходов высокой влажности.

Для получения экструдата с круглым поперечным сечением использовали фильеру матрицы диаметром 10 мм и длиной 70 мм, поскольку круглое поперечное сечение сохраняет форму лучше, чем другие. Для получения экструдатов в виде полос на фильеру надевали резиновую трубку, увеличивающую длину канала до 140 мм и изогнутую по радиусу вниз под прямым углом (патент РФ № 2240918). Выходной конец трубки деформировали до получения щели с поперечным сечением размерами 3×25 мм. Было произведено экструдирование смеси пивной дробины и отрубей исходной

влажностью соответственно 90 и 14,5 % через фильеры с круглым и щелевым поперечным сечением. Влажность этой смеси изменяли в пределах от 51,5 до 74,6 % за счет изменения процентного содержания зерноотходов.

Прочностные характеристики полуфабриката определяли по нормальным и касательным напряжениям в выходном сечении фильеры, которые выдерживает полуфабрикат на выходе из фильеры. Результаты определения напряжений представлены в таблице 5.1, а органолептические свойства экструдата в таблице 5.2. Данные таблиц 5.1 и 5.2 коррелируют.

Таблица 5.1

Напряжения в экструдате на выходе из матрицы.

Параметры напряженного состояния			Относительная влажность, %			
			51,5	57,0	64,3	74,6
Нормальное напряжение, кПа	Максимальное, достигнутое в эксперименте	в	–	13,5	13,3	–
	Разрушающее	Среднее значение	8,9	–	–	7,1
		Доверительный интервал с надежностью 0,95	с	±1,5	–	–
Напряжение сдвига, кПа	Максимальное, достигнутое в эксперименте	в	–	13,6	13,4	–
	Разрушающее	Среднее значение	7,3	–	–	5,8
		Доверительный интервал с надежностью 0,95	с	±0,9	–	–

Таблица 5.2

Органолептические свойства экструдата.

Показатели качества	Относительная влажность, %			
	51,5	57,0	64,3	74,6
Состояние поверхности	Шероховатая с надрывами	Гладкая	Гладкая	Липкая с образованием трещин после высыхания
Цвет	Темно-коричневый с белесым оттенком	Темно-коричневый	Темно-коричневый	Серо-коричневый
Характер излома	Частично стекловидный. с пузырьками воздуха	Стекловидный	Стекловидный	Частично стекловидный. Со следами непромеса

Разрушение плети экструдата при влажности 51,5 % объясняется возникновением надрывов на поверхности экструдата, которые уменьшают фактическую площадь его сечения по сравнению с площадью сечения фильеры. При влажности 74,6 % экструдат становится липким, что свидетельствует об усилении в нем свойств вязкой жидкости. При этом ухудшается качество продукта после сушки.

Снижение вязкости обеспечивает быструю деформацию, уменьшающую площадь поперечного сечения экструдата, что приводит к его обрыву.

Для экструдатов, полученных при влажности менее 55 %, характерна шероховатость поверхности и меньшая прочность после высушивания.

Для экструдатов, полученных при влажности более 70 %, характерна частичная потеря формы и слипание получаемых изделий между собой.

Полученные данные свидетельствуют о возможности переработки высоковлажных отходов путем совместного экструдирования с зерноотходами при высокой влажности перерабатываемой смеси с последующим высушиванием отформованных продуктов.

Определение режимов экструдирования полуфабриката.

Первоначально было исследовано влияние влажности экструдруемой смеси на производительность экструдера.

Экструдирование производили через матрицу с одной фильерой с протяженностью формирующего канала 10 мм и поперечным сечением 3×25 мм. Увлажнение зерноотходов производили дисперсной фазой. Влажность экструдруемой смеси меняли в пределах от 20 до 34 %. Зависимость производительности экструдера ПЭШ-30/4 от влажности экструдруемой смеси представлена на рисунке 5.1.

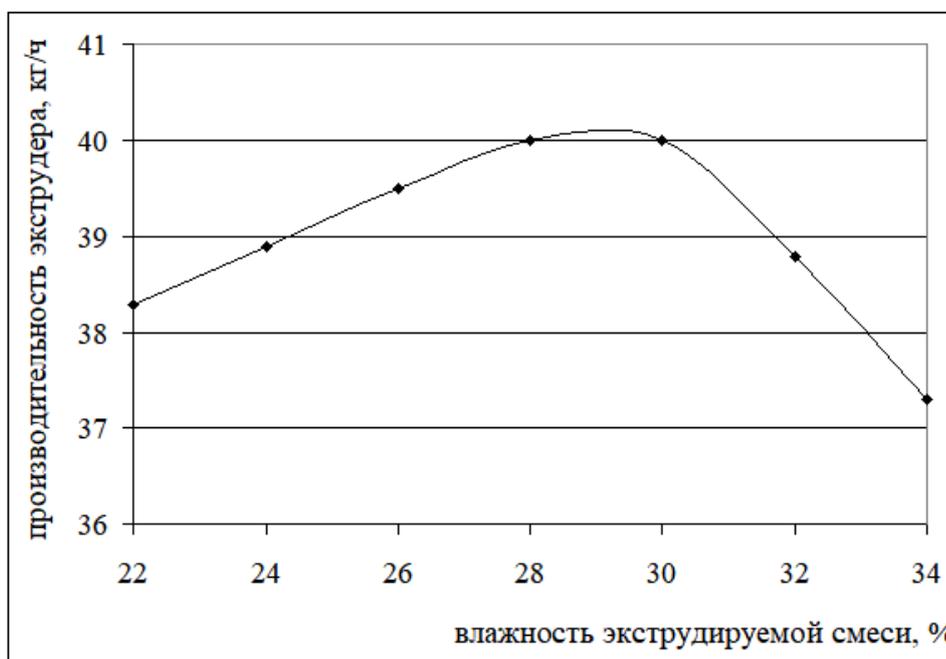


Рисунок 5.1. Зависимость производительности экструдера от влажности экструдруемой смеси

Из рисунка 5.1 видно, что наибольшая производительность наблюдается при влажности экструдруемой смеси от 28 до 30 %. При этом величина производительности соответствует техническим характеристикам применяемого экструдера.

В дальнейших исследованиях зерноотходы увлажняли дисперсной фазой дробины перед экструдированием до влажности 28 %.

Следующая серия экспериментов была посвящена изучению влияния высоты формирующего отверстия целевой фильеры на производительность экструдера.

Высоту формующего отверстия изменяли в пределах от 5 до 0,5 мм. Ширина формующего отверстия, выполненного в резиновой трубке, при этом изменялась незначительно. Все остальные параметры экструдирования оставили прежними.

Результаты исследований представлены на рисунке 5.2.

Из рисунка 5.2 видно, что не следует уменьшать высоту формующего отверстия менее 2 мм из-за резкого снижения производительности до величины, меньшей указанной в технической характеристике экструдера.

С другой стороны, увеличение высоты формующего отверстия может увеличить время сушки полуфабрикатов.

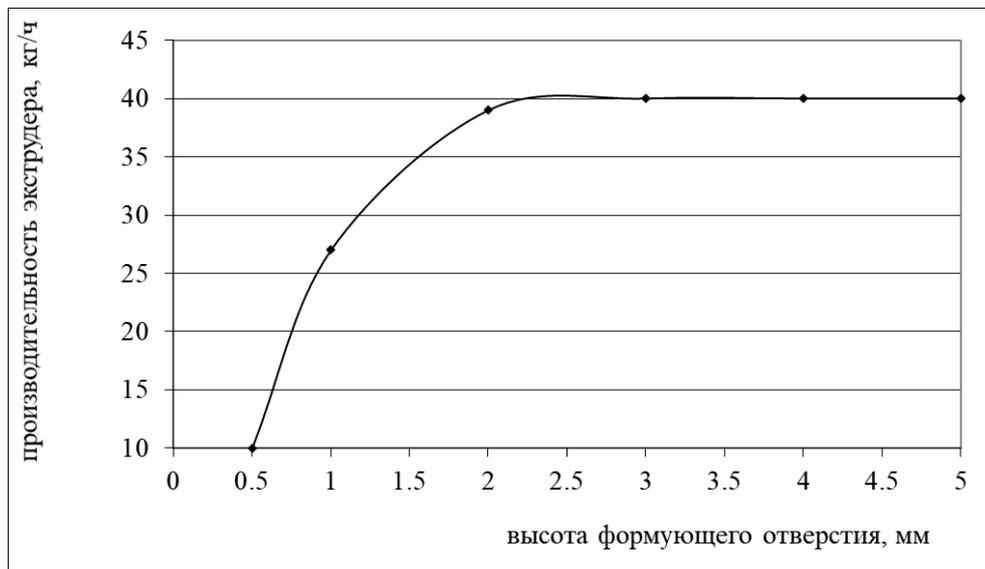


Рисунок 5.2. Влияние высоты формующего отверстия на производительность экструдера

Оценка экологической безопасности экструдирования отходов пищевых производств.

Для этого было исследовано влияние процесса экструдирования на содержание тяжелых металлов в зерноотходах, результаты которого приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3

Результаты испытаний на изменение содержания токсичных элементов при экструзионной обработке зерноотходов

Наименование характеристики		Наименование НД (нормативных документов) на методы испытаний	Обозначение НД на продукцию	Значение характеристики		
				По НД (мг/кг)	При испытаниях (мг/кг)	
Вид отходов	Токсичный элемент				До экструдирования	После экструдирования
Пшеничные отходы	кадмий	ГОСТ 26932-86 26934-86	-	-	36,5	34,0
	свинец			-	0,44	0,44
Отруби пшеничные	кадмий	ГОСТ 26932-86 26934-86	ГОСТ 7169-66	130,0	46,87	46,6
	свинец			1,0	0,21	0,25

Объектом для исследования были пшеничные зерноотходы и пшеничные отруби.

Исследования также проведены на экструдере ПЭШ-30/4.

В качестве режима обработки была выбрана горячая экструзия, которая оказывает наибольшее воздействие как на металл, контактирующий с экструдатом, так и на сам экструдат. Наличие кадмия и свинца в исходных и проэкструдированных продуктах определено различными методами химического анализа, а именно: методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии ГОСТ 7169-66 и способом мокрой минерализации ГОСТ 26574-85.

Данные таблицы 5.3 показывают, что экструдирование зерновых отходов не оказывает заметного влияния на содержание в них тяжелых металлов.

Оценка впитывающей способности полученных экструдатов.

Было произведено исследование процесса увлажнения дисперсионной средой пивной дробины полуфабрикатов, полученных при экструдировании пшеничных отрубей и дисперсной фазы дробины влажностью 28 % через фильеру протяженностью 140 мм с поперечным сечением 3×25 мм. Увлажнение производили в течение часа с добавлением к 0,03 кг полуфабриката различного количества дисперсионной среды дробины.

Полученные кривые увлажнения представлены на рисунке 5.3.

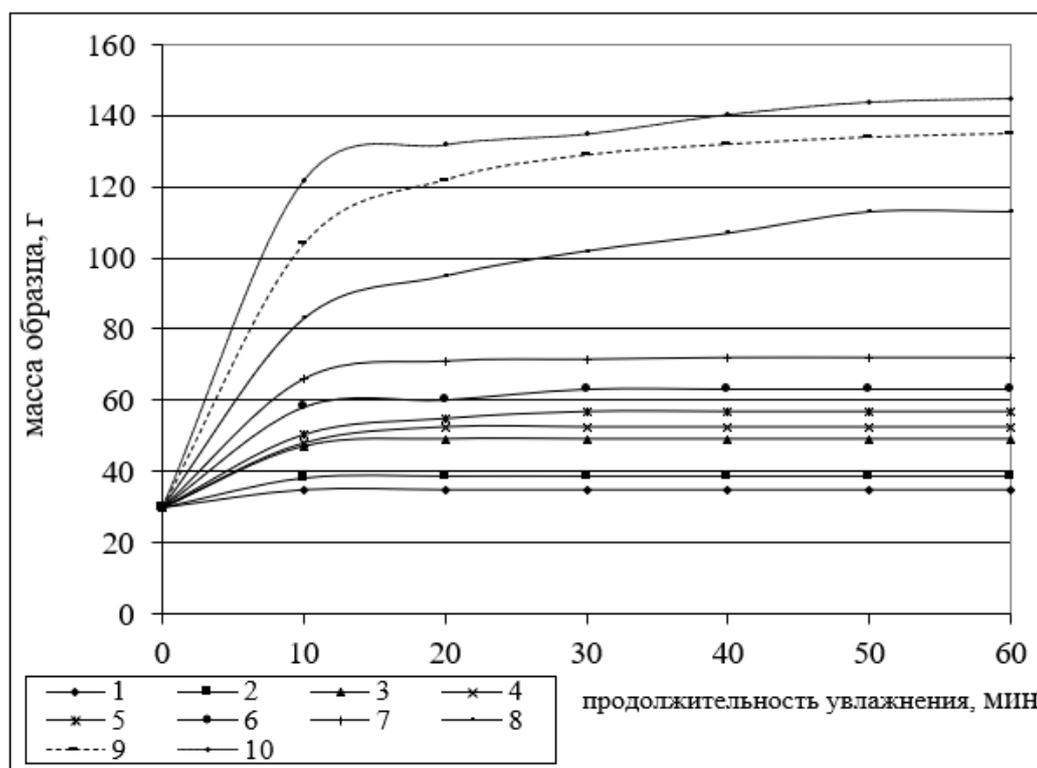


Рисунок 5.3. Кривые увлажнения экструдированных полуфабрикатов дисперсионной средой дробины

На рисунке 5.3 кривая 1 соответствует добавлению 0,005 кг дисперсионной среды дробины; 2 – 0,01 кг; 3 – 0,02 кг; 4 – 0,03 кг; 5 – 0,04 кг; 6 – 0,05 кг; 7 – 0,06 г; 8 – 0,09 кг; 9 – 0,12 кг; 10 – 0,15 кг. Из рисунка видно, что наибольший прирост влажности в течение часа наблюдался в образцах с добавлением к 0,03 кг полуфабриката 0,12 и 0,15 кг дисперсионной среды (соответственно кривые 9 и 10). Наилучшим следует считать увлажнение полуфабрикатов, демонстрируемое кривой 8, при котором форма полуфабриката сохраняется, а масса увлажняемого полуфабриката нарастает за 50 минут до 0,113 кг и далее не увеличивается, то есть 0,03 кг полуфабриката поглощает 0,083 кг дисперсионной среды. Однако увлажнение по кривым 9 и 10 можно использовать, если его продолжительность не превышает 20 ... 25 мин. За это время полуфабрикат еще не теряет форму.

В дальнейшем полуфабрикат был эффективно просушен до критической влажности воздухом помещения. Таким образом, предлагаемый метод увлажнения позволяет утилизировать совместно с единицей массы зерноотходов от 5 до 5,25 единиц массы дробины, что примерно соответствует 0,3 ... 0,4 единицы массы сухой дробины и представляется достаточно выгодным.

Экструдированные зерноотходы обладают большой водопоглощающей способностью и могут быть использованы в качестве поглотителя для высоковлажных скоропортящихся отходов.

5.2. Использование альтернативных наполнителей для утилизации высоковлажных органических отходов

Был исследован процесс получения полуфабрикатов вспученных экструдатов на основе крошки из некондиционного хлеба первого сорта с добавлением винных выжимок. Изучено влияние количества добавленных винных выжимок на производительность пресса-экструдера, энергоемкость процесса экструдирования, внешний вид сухих полуфабрикатов вспученных экструдатов, их влажность и кислотность, свойства при фритировании (количество поглощенного во время фритирования растительного масла, степень вспучивания при фритировании) и прочность отфритированных изделий.

Крошку из хлеба готовили следующим образом. Хлеб резали на куски, измельчали в дробилке ножевого типа до размеров частиц не более 7 мм, сушили полученную крошку в конвективной сушилке до влажности 12 ... 14 % и домалывали в той же дробилке до размеров частиц не более 2 мм.

Винные выжимки изготавливали из 95 % винной мезги и 5 % дрожжевого осадка, которые были получены при производстве десертного вина из тернослива по стандартной технологии в лабораторных условиях. Показатели качества винных выжимок и хлеба, определенные по стандартным методикам, представлены в таблицах 5.4 и 5.5. Остальные показатели качества соответствовали ГОСТ 28808-90.

Таблица 5.4

Показатели качества винных выжимок из тернослива

Наименование показателя	Характеристика показателя
Внешний вид	Однородная тонко измельченная масса без остатков косточек, плодоножек и веточек
Вкус и запах	Специфический свойственный винным выжимкам с явным привкусом и запахом тернослива, спирта, сивушных масел и дрожжей
Цвет	Серо-синий, тусклый, характерный для винных выжимок из тернослива
Влажность, %	70
Остаточные сахара, % на сухое вещество	0,3
Зольность, % на сухое вещество	5,2

Таблица 5.5

Показатели качества используемого некондиционного пшеничного хлеба 1-го сорта

Наименование показателя	Характеристика показателя
Влажность мякиша, %	45 ... 50
Кислотность мякиша, град	3 ... 6
Пористость мякиша, %	60 ... 70

Замес теста и приготовление сырых полуфабрикатов вспученных экструдатов осуществляли на универсальном прессе-экструдере ПЭШ-30/4, в лабораторных условиях. Полуфабрикаты экструдировали в виде ленты с шириной 15 мм и толщиной 1 мм.

Сушку полуфабрикатов вспученных экструдатов осуществляли воздухом помещения на стеллажах до влажности 9 ... 11 %.

Вспучивали полуфабрикат погружением в растительное масло температурой 185 ... 190 °С на 20 ... 30 с. Степень вспучивания полуфабрикатов определяли отношением толщины вспученного экструдата к толщине исходного полуфабриката. Прочность отфритированных изделий определяли на приборе Строганова по методике определения прочности макаронных изделий, изменяя расстояние между опорами стоек со 150 до 70 мм. Определяли скорость выпрессовывания и производительность экструдера.

Предварительно было установлено, что нецелесообразно добавлять в полуфабрикаты вспученных экструдатов на основе хлебной крошки винные выжимки в количестве превышающем 15 % к массе смеси хлебной крошки с винными выжимками (в пересчете на сухое вещество), а влажность смеси перед экструдированием 28 % обеспечивает стабильный процесс экструдирования и получение продуктов хорошего качества. В ходе основных экспериментов винные выжимки добавляли в количестве 0; 3; 6; 9; 12 и 15 % по отношению к смеси хлебной крошки с винным осадком. Влажность смеси перед экструдированием была равна 28 %. Результаты экспериментов, обработанные по стандартной методике, представлены в таблице 5.6.

Из таблицы видно, что наилучшими показателями качества обладают полуфабрикаты вспученных экструдатов полученные при содержании 6 % винных выжимок (в пересчете на сухие вещества).

Из таблицы 5.6 следует, что с увеличением количества добавляемых винных выжимок в пределах от 0 до 6 % к массе смеси в пересчете на сухие вещества производительность и скорость прессования возрастают, а энергоемкость процесса снижается. При этом кислотность, количество поглощенного во время фритирования растительного масла и усилие разрушения вспученных экструдатов снижаются, а степень вспучивания увеличивается, цвет улучшается. То есть при увеличении количества добавляемых винных выжимок от 0 до 6 % к массе смеси наблюдается интенсификация процесса прессования и улучшение качества выпускаемых изделий.

При дальнейшем увеличении количества добавляемых винных выжимок производительность и скорость прессования возрастают, а энергоемкость снижается, что говорит о дальнейшей интенсификации процесса.

Таблица 5.6

Параметры процесса экструдирования и показатели качества получаемых полуфабрикатов

Параметр процесса (показатель качества)	Количество добавляемых винных выжимок в % к массе смеси винных выжимок и хлебной крошки (в пересчете на сухие вещества)					
	0	3	6	9	12	15
Производительность, кг/ч	20	26	30	32	33	34
Скорость прессования, мм/с	125	140	150	155	160	165
Цвет	Бледно-белый	Белый	Золоти-сто-белый	Золоти-сто-корич-невый	Светло-корич-невый	Корич-невый
Излом	Стекловидный				Частично-стекловидный	
Влажность, %	12	12	12	12	12	12
Кислотность, град	4,0	3,7	3,5	3,2	3,0	2,7
Количество поглощенного за время фритирования растительного масла, % к массе вспученных экструдатов	36	33	30	28	27	27
Степень вспучивания при фритировании	2,2	2,3	2,4	2,2	1,9	1,5
Усилие разрушения отфритированных изделий, Н	0,70	0,60	0,52	0,55	0,60	0,75

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о целесообразности применения винных выжимок в качестве источника пищевых волокон при производстве полуфабрикатов вспученных экструдатов на основе крошки из некондиционного хлеба.

6. Описание процесса экструдирования

6.1. Аналитическое описание процесса экструдирования

Наибольшее распространение при экструдировании сырья растительного происхождения получили одношнековые экструдеры с постоянными по длине параметрами шнека. Поскольку экструдирование высоковлажного сырья не требует создания высоких давлений, будем считать эти конструкции адекватными разрабатываемой технологии. Схема такого экструдера показана на рисунке 6.1.

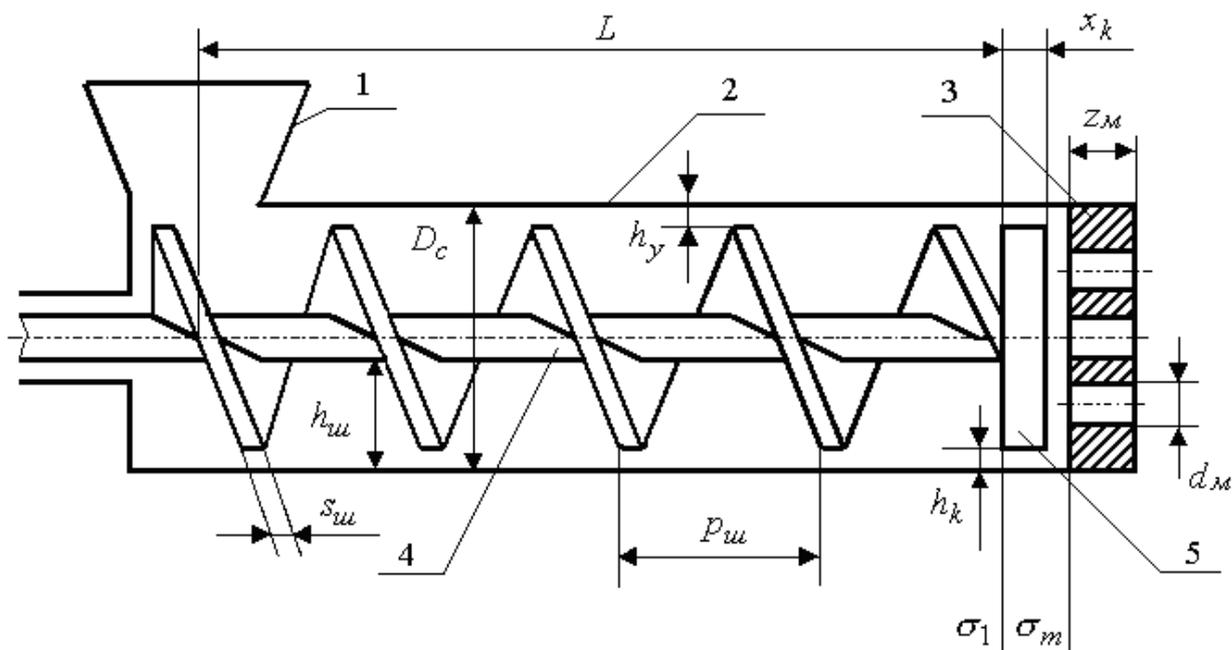


Рисунок 6.1. Схема прессующего механизма:

- 1 – загрузочное устройство; 2 – шнековый корпус;
- 3 – матрица; 4 – шнек; 5 – насадка на конце шнека.

Рабочее пространство можно разделить на четыре зоны: канал шнека глубиной $h_{ш}$; полость насадки на конце шнека высотой $h_{\hat{e}}$; полость утечек высотой $h_{у}$; фильера матрицы диаметром $d_{м}$.

Взаимодействие прессуемого материала с рабочими органами вызывает движение материала в рабочем пространстве. Сложность геометрии рабочего пространства, образованного цилиндрическими и винтовыми поверхностями затрудняет описание поведения экструдированного материала. Поэтому часто используется свойство цилиндрических поверхностей разворачиваться на плоскость. Представим рабочее пространство системой нескольких пар параллельных между собой плоскостей, которые будем полагать неограниченными. Прессуемый материал расположен между каждой парой рассматриваемых плоскостей. При этом

сохраняется свойство непрерывности объемной производительности в шнековом механизме. Исключение составляют осесимметричные каналы фильер, которые имеют собственное решение задачи течения экструдированного материала.

Будем для простоты приписывать сжимающим напряжениям в материале, находящемся в рабочем пространстве, положительное значение.

Движение материала в канале шнека. Пренебрегая влиянием лопастей шнека, заменим канал шнека моделью из двух неограниченных параллельных пластин, расположенных на расстоянии, равном глубине канала шнека $h_{ш}$. Расположим систему координат xOy как показано на рисунке 6.2.

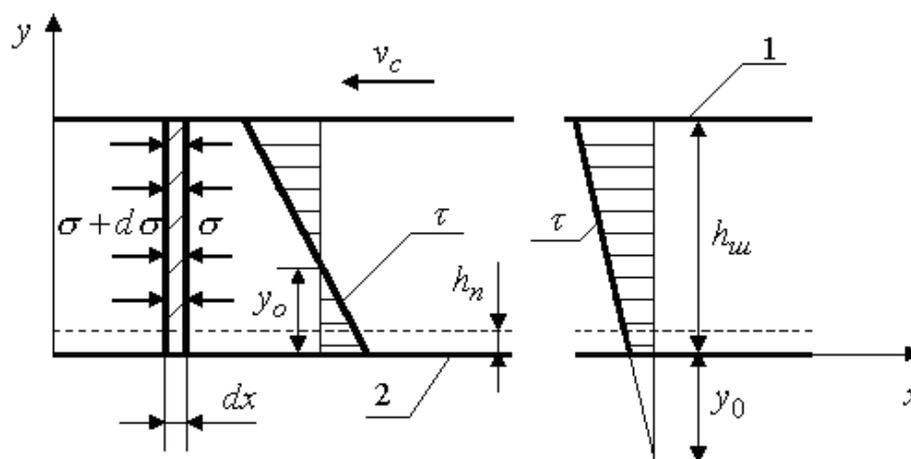


Рисунок 6.2. Схема модели шнекового канала:

- 1 – плоскость, замещающая шнековый корпус;
- 2 – плоскость, замещающая дно шнекового канала.

Верхняя пластина 1 движется со скоростью v_c относительно нижней 2. Напряжения сжатия возрастают в направлении вектора скорости v_c . Скорость материала на поверхности пластины совпадает со скоростью этой пластины. Будем придерживаться гипотезы, что вблизи пластины 2 имеется слой проскальзывания с реологическими свойствами, отличными от свойств остального материала в канале шнека. Граница слоя толщиной h_n обозначена на рисунке 6.2 пунктирной линией. Поскольку мы описываем поведение при экструдировании высоковлажного материала, будем считать, что реологические свойства этого слоя не отличаются от свойств воды.

Уравнение равновесия для данного случая имеет вид

$$\tau = \frac{d\sigma}{dx}(y - y_0), \quad (6.1)$$

где τ – напряжение сдвига в прессуемом материале;
 $d\sigma/dx$ – градиент нормальных напряжений в прессуемом материале;

y_0 – координата плоскости, на которой касательные напряжения $\tau = 0$.

Будем считать, что зависимость напряжения сдвига τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ (градиента скорости dv/dy) в слое проскальзывания удовлетворительно описывается уравнением ньютоновской жидкости

$$\tau = \mu \dot{\gamma} = \mu \frac{dv}{dy}, \quad (6.2)$$

где μ – абсолютная вязкость материала в слое проскальзывания.

Подставив (6.2) в (6.1), проинтегрировав, и приняв граничное условие $v = 0$ при $y = 0$, имеем скорость материала на границе слоя проскальзывания

$$v_n = \frac{1}{2\mu} \frac{d\sigma}{dx} \left[(h_n - y_0)^2 - (-y_0)^2 \right]. \quad (6.3)$$

Проведя преобразования выражения (6.3) и пренебрегая величиной h_n^2 ввиду ее малости, получим

$$v_n = -\frac{1}{\mu} \frac{d\sigma}{dx} h_n y_0. \quad (6.4)$$

Сравнение результатов вычислений по уравнениям (6.3) и (6.4) дает малую погрешность для существующих конструкций экструдеров.

Из (6.4) следует, что скорость проскальзывания направлена в сторону, v_c , если $y_0 < 0$, и в сторону, противоположную v_c , если $y_0 > 0$.

Будем полагать, что вне слоя проскальзывания в канале шнека, а также в других полостях рабочего пространства реологические свойства материала постоянны, и описываются уравнением Оствальда-де Виля

$$\tau = \mu' \dot{\gamma}^n, \quad (6.5)$$

где μ' – коэффициент консистенции материала;

n – индекс течения, характеризующий отклонение свойств данного материала от свойств ньютоновской жидкости.

Подставив значение напряжения сдвига из (6.5) в (6.1), можно получить распределение скорости между пластинами.

Вид решения уравнения (6.1) при использовании уравнения Оствальда-де Виля зависит от величины y_0 . Если $0 < y_0 < h_{ш}$, направление касательных напряжений изменяется в канале шнека (рисунок 6.2) и решение уравнения (6.1) имеет вид

$$v_1 = v_n + \frac{a_{ш}}{m+1} [(y_0 - h_n)^{m+1} - (y_0 - y)^{m+1}]; \quad h_n \leq y \leq y_0; \quad (6.6)$$

$$v_2 = v_c + \frac{a_{uu}}{m+1} [(h_{uu} - y_0)^{m+1} - (y - y_0)^{m+1}]; \quad h_{uu} \geq y \geq y_0; \quad (6.7)$$

где

$$a_{uu} = \left(\frac{1}{\mu'} \right)^m \left| \frac{d\sigma}{dx} \right|^m, \quad m = \frac{1}{n}.$$

Если $y_0 < 0$, касательные напряжения не изменяют направления в канале шнека (рисунок 6.2) и для описания распределения скоростей достаточно уравнения (6.7).

Ввиду малой толщины слоя h_n по сравнению с величиной h_{uu} распределение скорости движения материала в слое проскальзывания интереса не представляет.

Если $h_n \leq y_0 \leq h_{uu}$, используя условие непрерывности скорости в канале шнека $v_1 = v_2$ при $y = y_0$, можно определить из уравнений (6.6) и (6.7) величину y_0 , задавшись скоростью верхней пластины v_c и градиентом давления $d\sigma/dx$. Получим

$$\frac{a_{uu}}{m+1} [(h_{uu} - y_0)^{m+1} - (y_0 - h_n)^{m+1}] + v_c - v_n = 0. \quad (6.8)$$

Если $y_0 < 0$, аналогичное решение можно получить из уравнений (6.7) и (6.3) или (6.4), используя граничное условие $v_n = v_2$ при $y = h_n$. Получим после преобразований

$$\frac{a_{uu}}{m+1} [(h_{uu} - y_0)^{m+1} - (h_n - y_0)^{m+1}] + v_c - v_n = 0. \quad (6.9)$$

Исследуя область определения функции (6.8) с учетом (6.4), можно получить условие попадания координаты y_0 на отрезок $h_n \leq y_0 \leq h_{uu}$. Пренебрегая, как и ранее, членом, содержащим h_n^2 , получим

$$-\frac{a_{uu}}{m+1} (h_{uu} - h_n)^{m+1} \leq v_c \leq \frac{a_{uu}}{m+1} (h_{uu} - h_n)^{m+1} - \frac{1}{\mu} \frac{d\sigma}{dx} h_n h_{uu}. \quad (6.10)$$

При этом практический смысл имеет диапазон скорости

$$-\frac{a_{uu}}{m+1} (h_{uu} - h_n)^{m+1} \leq v_c \leq 0. \quad (6.11)$$

Объемный расход прессуемого материала на единичной ширине пространства между пластинами определим без учета влияния слоя проскальзывания. Будем полагать, что проскальзывание со скоростью v_n осуществляется непосредственно по

нижней пластине. Кроме того, для обеспечения положительного значения расхода преобразуем (6.6) и (6.7) так, чтобы приписать скорости v_c положительное значение.

Тогда для $y_0 < 0$ объемный расход на единичной ширине пространства между пластинами имеет вид при проскальзывания по нижней пластине

$$Q = \int_0^{h_{uu}} v_2 dy = v_c h_{uu} + a_{uu} \left[\frac{(h_{uu} - y_0)^{m+2} - (-y_0)^{m+2}}{(m+1)(m+2)} - \frac{h_{uu}(h_{uu} - y_0)^{m+1}}{m+1} \right]. \quad (6.12)$$

Для случая $0 \leq y_0 \leq h_{uu}$ уравнение, определяющее v_1 , с указанными выше допущениями примет вид

$$v_1 = v_n + \frac{a_{uu}}{m+1} [(y_0 - y)^{m+1} - y_0^{m+1}]. \quad (6.13)$$

С учетом (6.13) объемный расход на единичной ширине пространства между пластинами

$$Q = \int_0^{y_0} v_1 dy + \int_{y_0}^{h_{uu}} v_2 dy = v_c (h_{uu} - y_0) + v_n y_0 - a_{uu} \frac{(h_{uu} - y_0)^{m+2} + y_0^{m+2}}{m+2}. \quad (6.14)$$

Объемный расход материала в канале шнека составит

$$Q_{uu} = k_{un} k_f (p_{uu} - q s_{uu}) Q \cos \alpha, \quad (6.15)$$

где k_{un} – коэффициент искажения пространства, учитывающий изменение объема пространства канала шнека при разворачивании на плоскость, определенный зависимостью $k_{un} = 1 - h_{uu}/D_c$;

k_f – коэффициент формы канала шнека, учитывающий отклонение площади поперечного сечения канала от площади описанного прямоугольника;

p_{uu} – осевой шаг винтовой лопасти шнека на цилиндрической поверхности диаметром D_c ;

q – число заходов шнека;

s_{uu} – осевая толщина винтовой лопасти шнека на цилиндрической поверхности диаметром D_c ;

α – угол подъема винтовой линии лопасти шнека.

Движение материала в полости насадки на конце шнека и полости утечек.

Рассмотрим плоскую модель кольцевого пространства между шнековым корпусом и насадкой на конце шнека, представленную на рисунке 6.3 в системе прямоугольных координат $Oxyz$.

В этой модели пластины находятся на расстоянии зазора компрессионного затвора h_k . Нижняя пластина неподвижна, а верхняя пластина движется вдоль оси Oz со скоростью u_c , равной окружной скорости шнекового корпуса в обратном движении.

Рассмотрим вначале движение прессируемого материала вдоль оси Ox между двумя неподвижными пластинами. Будем считать, что материал имеет те же реологические параметры, что и в канале шнека, то есть справедливо уравнение (6.5), прилипает к обеим пластинам, и касательные напряжения τ_{xy} определяются уравнением (6.1).

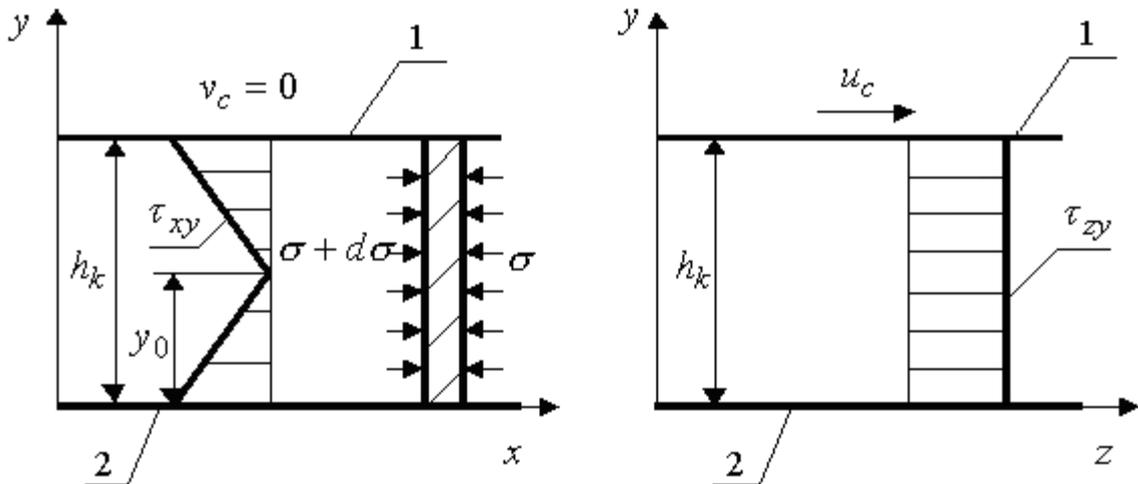


Рисунок 6.3 – Схема модели компрессионного затвора:

1 – плоскость, замещающая шнековый корпус;

2 – плоскость, замещающая поверхность насадки на конце шнека.

В силу симметрии картины течения распределение касательных напряжений τ_{xy} в канале фильеры симметрично относительно срединной плоскости, поэтому $y_0 = h_k/2$. Тогда

$$\tau_{xy} = \frac{d\sigma}{dx} \left| y - \frac{h_k}{2} \right|. \quad (6.16)$$

Распределение скоростей на участке $h_k \leq y \leq h_k/2$ определяется аналогично зависимости (6.7) с учетом условия $v_c = 0$. Получим

$$v_2 = \frac{a_k}{m+1} \left[\left(\frac{h_k}{2} \right)^{m+1} - \left(y - \frac{h_k}{2} \right)^{m+1} \right], \quad (6.17)$$

где

$$a_k = \left(\frac{1}{\mu'} \right)^m \left| \frac{d\sigma}{dx} \right|^m.$$

Величина a_k содержит градиент напряжений для полости насадки.

Объемный расход материала на единичной ширине развертки полости насадки с учетом симметрии картины скоростей определен зависимостью

$$Q = 2 \int_{\frac{h_k}{2}}^{h_k} v_2 dy = \frac{2a_k}{m+1} \left(\frac{h_k}{2} \right)^{m+2}. \quad (6.18)$$

Объемная производительность через полость насадки составит

$$Q_k = \pi D_c Q. \quad (6.19)$$

Движение материала в направлении оси Oz происходит в отсутствии градиента давления, то есть

$$\tau_{zy} = const. \quad (6.20)$$

Из (6.20), используя (6.5), можно определить напряжения сдвига, задаваясь величиной u_c .

Движение материала в полости утечек описывается аналогичным полости насадки распределением напряжений с учетом различия геометрических размеров и градиента напряжений. При определении геометрии полости утечек будем предполагать, что лопасть шнека на протяжении одного ее шага заменяется шайбой с диаметром равным внешнему диаметру лопасти шнека. При этом высота полости будет равна h_y , а ее осевая протяженность будет

$$x_y = q s_{nc} \frac{L}{P_{ш}}, \quad (6.21)$$

где L – рабочая длина шнека;

s_{nc} – нормальная толщина лопасти на наружном диаметре шнека

$$s_{nc} = s_{ш} \cos \alpha.$$

Объемный расход материала на единичной ширине развертки полости утечек определяется аналогично (6.20), однако градиент давления и высота зазора утечек h_y в этом случае имеют другое значение

$$Q = 2 \int_{\frac{h_y}{2}}^{h_y} v_2 dy = \frac{2a_y}{m+1} \left(\frac{h_y}{2} \right)^{m+2}, \quad (6.22)$$

где

$$a_y = \left(\frac{1}{\mu'} \right)^m \left| \frac{d\sigma}{dx} \right|^m.$$

Объемная производительность зазора утечек с учетом (6.22) составит

$$Q_y = \pi D_c Q. \quad (6.23)$$

Напряжение сдвига τ_{zy} в полости утечек также может быть вычислено по известной скорости u_c .

Движение материала в канале фильеры матрицы. Для экструдирования высоковлажных продуктов растительного происхождения предложены конструкции фильер в упругих оболочках, формирующие полуфабрикат в виде тонкой ленты.

Возможная конструкция такой фильеры показана на рисунке 6.4.

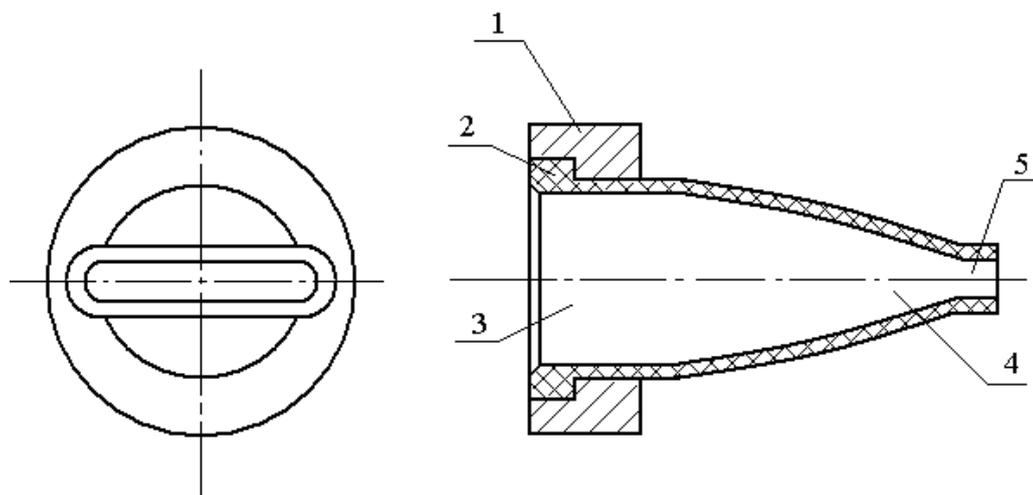


Рисунок 6.4. Схема фильеры переменного профиля сечения:
1 – матрица; 2 – упругая оболочка фильеры; 3 – цилиндрический канал;
4 – конфузор; 5 – плоская щель.

Для упрощения описания процесса течения через канал переменной формы и сечения заменим этот канал расчетной схемой, представляющей собой систему из двух каналов: цилиндрического и плоской щели, как показано на рисунке 6.5.

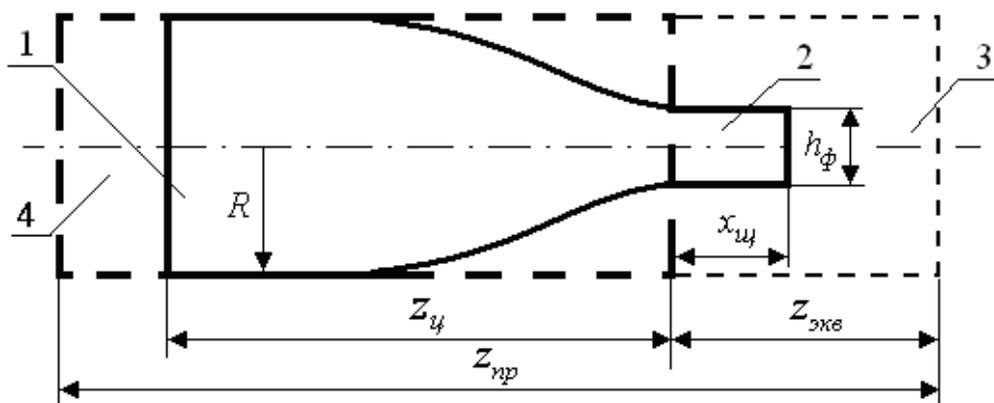


Рисунок 6.5. Расчетная схема фильеры переменного профиля сечения:

- 1 – участок цилиндрического канала фильеры с конфузуром;
- 2 – плоская щель;
- 3 – участок цилиндрического канала эквивалентный плоской щели;
- 4 – участок цилиндрического канала эквивалентный цилиндрическому каналу с конфузуром.

Предположим, как и ранее, что реологическая модель экструдруемого материала описывается уравнением Оствальда-де Виля (6.5).

Объемный расход материала через цилиндрический канал Q_ϕ связан с градиентом давления в канале $d\sigma/dz$ уравнением Рабиновича-Муни

$$Q_\phi = \left(\frac{1}{2\mu'} \right)^m \left| \frac{d\sigma}{dz} \right|^m \frac{\pi R^{m+3}}{m+3}, \quad (6.24)$$

где R – радиус канала фильеры.

При постоянном градиенте давления можно записать

$$\left| \frac{d\sigma}{dz} \right| = \frac{\Delta\sigma}{z_\phi}, \quad (6.25)$$

где $\Delta\sigma$ – перепад давления в цилиндрическом канале фильеры;

z_ϕ – осевая протяженность цилиндрического канала с учетом длины конфузора (рисунок 6.5).

Введя относительную длину цилиндрического канала

$$\lambda = \frac{z_\phi}{R} \quad (6.26)$$

и считая ее приведенной относительной длиной для учета влияния местных сопротивлений, вызванных отклонением истинной формы канала от цилиндрической, запишем

$$Q_{\phi} = \left(\frac{\Delta\sigma}{2\mu'} \right)^m \frac{\pi R^3}{\lambda_{np}^m (m+3)}. \quad (6.27)$$

Обычно m значительно больше единицы, тогда оценивать отклонение формы канала от цилиндрической удобнее коэффициентом отклонения формы

$$c_{\phi} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_{np}} \right)^m. \quad (6.28)$$

С учетом c_{ϕ} формула (6.27) примет вид

$$Q_{\phi} = \left(\frac{1}{2\mu'} \frac{\Delta\sigma}{z_{\psi}} \right)^m \frac{c_{\phi} \pi R^{m+3}}{m+3}. \quad (6.29)$$

Коэффициент c_{ϕ} будем экспериментально определять в виде

$$c_{\phi} = f \left[\frac{b_{\phi}}{R}; \left(\frac{h_{\phi}}{R} \right)^{m+2}; \frac{1}{m} \right]. \quad (6.30)$$

Формующий участок фильеры выполнен в виде плоской щели, ширина которой намного больше высоты. Поэтому влиянием боковых стенок можно пренебречь и рассматривать движение экструдата как течение между параллельными пластинами.

Решение такой задачи совпадает с полученным ранее решением для полости насадки и зазора утечек шнекового прессующего механизма.

Рассмотрим модель плоской щели, представленную на рисунке 6.6 в системе прямоугольных координат $Oxyz$.

В этой механической модели обе пластины, находящиеся на расстоянии высоты щели фильеры h_{ϕ} , неподвижны.

В силу симметрии картины течения распределение касательных напряжений τ в канале фильеры симметрично относительно срединной плоскости, поэтому $y_0 = h_{\phi}/2$

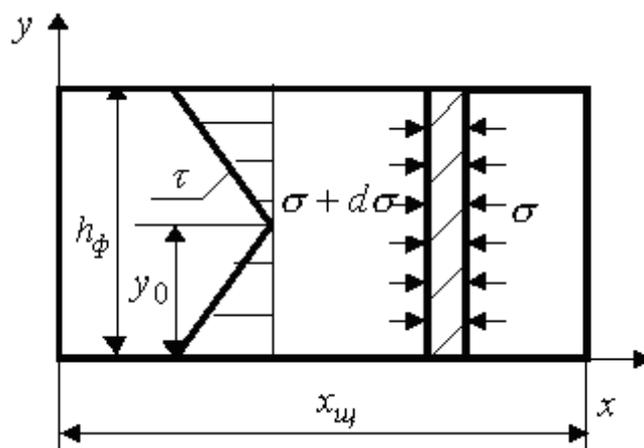


Рисунок 6.6. Схема модели плоской щели.

Тогда уравнение движения можно записать в виде

$$\tau = \frac{d\sigma}{dx} \left| y - \frac{h_\phi}{2} \right|. \quad (6.31)$$

Перепишем уравнение (6.31) с учетом (6.5) для области, где $y \geq h_\phi/2$,

$$\frac{dv_2}{dy} = \left[\frac{1}{\mu'} \left| \frac{d\sigma}{dx} \right| \left(y - \frac{h_\phi}{2} \right) \right]^m. \quad (6.32)$$

Проинтегрировав уравнение (6.32), получим, приняв на пластинах условие прилипания материала к пластине

$$v_2 = \frac{1}{m+1} \left(\frac{1}{\mu'} \left| \frac{d\sigma}{dx} \right| \right)^m \left[\left(\frac{h_\phi}{2} \right)^{m+1} - \left(y - \frac{h_\phi}{2} \right)^{m+1} \right]. \quad (6.33)$$

Объемный расход материала на единичной ширине плоской щели определим интегрированием скорости материала по высоте щели с учетом симметрии картины скоростей

$$Q = 2 \int_{\frac{h_\phi}{2}}^{h_\phi} v_2 dy = \frac{2}{m+2} \left(\frac{1}{\mu'} \left| \frac{d\sigma}{dx} \right| \right)^m \left(\frac{h_\phi}{2} \right)^{m+2}. \quad (6.34)$$

Предположив постоянство градиента давления в плоской щели получим

$$\left| \frac{d\sigma}{dx} \right| = \frac{\sigma_{щ}}{x_{щ}}, \quad (6.35)$$

где $\sigma_{щ}$ – перепад давления в плоской щели;

$x_{щ}$ – осевая протяженность щели.

Объемная производительность материала, экструдированного через щель шириной b_{ϕ} , составит

$$Q_{\phi} = \frac{2b_{\phi}}{m+2} \left(\frac{1}{\mu'} \frac{\sigma_{щ}}{x_{щ}} \right)^m \left(\frac{h_{\phi}}{2} \right)^{m+2}. \quad (6.36)$$

Учитывая, что полное сопротивление системы каналов $\sigma_m = \Delta\sigma + \sigma_{щ}$, используя выражения (6.29) и (6.36), получим после преобразований

$$Q_{\phi} = \left(\frac{1}{2\mu'} \frac{\sigma_m}{z_{np}} \right)^m \frac{\pi R^{m+3}}{m+3}, \quad (6.37)$$

где

$$z_{np} = \frac{x_{щ}}{c_{щ}^n} + \frac{z_{\phi}}{c_{\phi}^n}. \quad (6.38)$$

Формула (6.37) может быть использована для приближенного определения объемного расхода через фильеру сложной формы.

Анализируя выражение приведенной длины фильеры (6.38) можно получить выражение для $c_{щ}$ – коэффициента приведения осевой длины плоской щели к длине цилиндрического канала радиуса R , создающего такое же сопротивление как данная плоская щель

$$c_{щ} = \frac{1}{2\pi} \frac{m+3}{m+2} \frac{b_{\phi}}{R} \left(\frac{h_{\phi}}{R} \right)^{m+2}. \quad (6.39)$$

На рисунке 6.5 пунктиром показан участок цилиндрического канала эквивалентный по сопротивлению плоской щели, причем $z_{эkv} = x_{щ} / c_{щ}^n$.

Величина эквивалентной длины цилиндрического канала может быть использована для анализа влияния сопротивления плоской щели на общее сопротивление фильеры.

Таким образом, для определения сопротивления фильер, представляющих собой каналы с плавным переходом от круглой формы поперечного сечения к плоской щели достаточно использовать приведенную длину цилиндрического канала радиуса R , вычисленную по зависимости (6.38).

Алгоритм определения параметров процесса экструдирования. Для шнекового механизма, схема которого изображена на рисунке 6.1, система уравнений

неразрывности объемной производительности, определяемой уравнениями (6.15), (6.19), (6.23) и (6.37), имеет вид

$$\begin{cases} Q_{ш} - Q_y = Q_k, \\ Q_k = k_\phi Q_\phi, \end{cases} \quad (6.40)$$

где k_ϕ – число фильер в матрице.

Приняв градиенты напряжений сжатия во всех полостях постоянными, запишем с учетом обозначений напряжений в сечениях на границах полостей, приведенных на рисунке 6.1:

$$\text{- для канала шнека} \quad \left| \frac{d\sigma}{dx} \right| = \frac{\sigma_1}{L} \sin \alpha; \quad (6.41)$$

$$\text{- для полости утечек с учетом (6.21)} \quad \left| \frac{d\sigma}{dx} \right| = \frac{\sigma_1}{x_y}; \quad (6.42)$$

$$\text{- для полости насадки на конце шнека} \quad \left| \frac{d\sigma}{dx} \right| = \frac{\sigma_1 - \sigma_m}{x_k + cR_k}. \quad (6.43)$$

В зависимости (6.43) учтено наличие местных сопротивлений на входе в полость насадки через гидравлический радиус канала R_k и коэффициент местных сопротивлений c .

Подставив вместо градиентов напряжений их значения по зависимостям (6.41), (6.42), (6.43) можно численными методами найти из системы (6.40) напряжения σ_1 и σ_m , которые позволяют вычислить все параметры процесса экструдирования.

Параметры эффекта процесса экструдирования. Оценку эффективности процесса экструдирования удобно производить по параметрам эффекта. Можно выделить три группы параметров эффекта.

На первом уровне находятся параметры эффекта, определяемые непосредственно из внутренней характеристики системы: производительность, мощность сил полезного сопротивления, усилие, действующее на матрицу. На втором уровне – параметры эффекта, определяемые с помощью параметров эффекта первого уровня. На третьем уровне расположены параметры, определяемые с помощью параметров эффекта первого и второго уровня.

Производительность шнекового экструдера Q_m . Определена количеством продукта, проходящего через формующие каналы матрицы в единицу времени. Поэтому с учетом (6.37) и (6.40)

$$Q_m = \rho k_\phi \left(\frac{1}{2\mu'} \frac{\sigma_m}{z_{np}} \right)^m \frac{\pi R^{m+3}}{m+3}, \quad (6.44)$$

где ρ – плотность экструдруемого материала.

Мощность сил полезного сопротивления шнекового прессующего механизма. Она определяется напряжениями сдвига на контактной поверхности ведущего звена прессующего механизма (в принятой модели – шнекового корпуса) и равна

$$N = N_{ш} + N_y + N_k, \quad (6.45)$$

где $N_{ш}, N_y, N_k$ – соответственно мощности сил полезного сопротивления в канале шнека, зазоре утечек и полости насадки.

Мощность сил полезного сопротивления в канале шнека определена интегрированием касательных напряжений на контактной поверхности шнекового цилиндра

$$N_{ш} = \frac{D_c \omega}{2} (p_{ш} - q s_{ш}) \sigma_1 (h_{ш} - y_0). \quad (6.46)$$

Мощность, расходуемая в полости утечек, определяется из соотношения

$$N_y = \frac{D_c \omega}{2} q s_{ш} \mu' \left(\frac{D_c \omega}{2h_y} \right)^n \frac{L}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (6.47)$$

Мощность, расходуемая в полости насадки на конце шнека, определяется аналогично зазору утечек с учетом геометрических параметров полости

$$N_k = \pi \frac{D_c^2 \omega}{2} x_k \mu' \left(\frac{D_c \omega}{2h_k} \right)^n. \quad (6.48)$$

В уравнениях (6.46), (6.47), (6.48) ω – угловая скорость шнека.

Энергетическая оценка воздействия на обрабатываемый материал в шнековом прессующем механизме. Мощность N , передаваемая плоскостью 1 экструдруемому материалу на единичной ширине пространства между плоскостями, определяется выражением

$$N = v_c \frac{d\sigma}{dx} (h_{ш} - y_0) x_{ш}, \quad (6.49)$$

где $x_{ш}$ – рабочая длина развертки канала шнека на диаметре D_c .

Механическую мощность, передаваемую единице объема экструдированного материала в канале шнека, можно охарактеризовать отношением мощности по выражению (6.49) к расходу Q по формулам (6.12) или (6.14), которое обозначим $(N/Q)_{ш}$. Величина $(N/Q)_{ш}$ имеет размерность давления, поэтому назовем ее эффективным давлением в канале шнека.

Проанализируем характер движения материала между плоскостями в зависимости от расстояния между плоскостями, градиента давления и скорости движения верхней плоскости. В расчетах примем $h_n = 0,00007$ м, $\mu' = 0,052$ МПа·сⁿ; $n = 0,25$; $\mu = 0,0001$ МПа·с; $x_{ш} = 2,1$ м.

На рисунках 6.7 и 6.8 приведены диаграммы зависимостей эффективного давления от этих параметров при расчетных условиях, указанных выше.

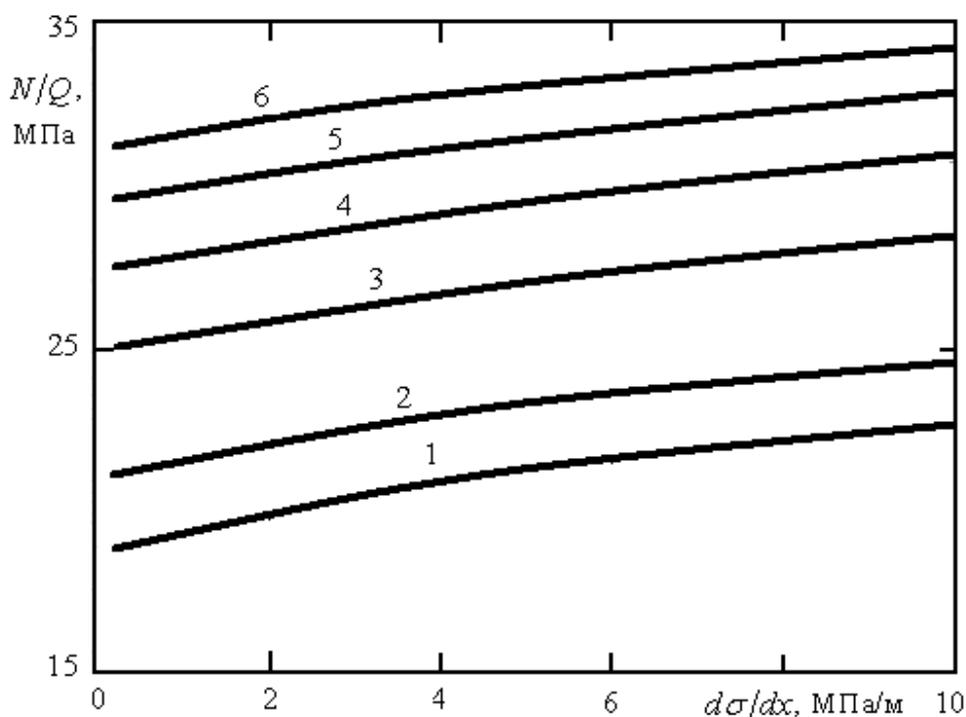


Рисунок 6.7. Зависимость эффективного давления от градиента напряжений

при $h_{ш} = 0,0075$ м для скоростей $|v_c|$:

1 – 0,10 м/с; 2 – 0,15 м/с; 3 – 0,30 м/с;

4 – 0,45 м/с; 5 – 0,60 м/с; 6 – 0,75 м/с.

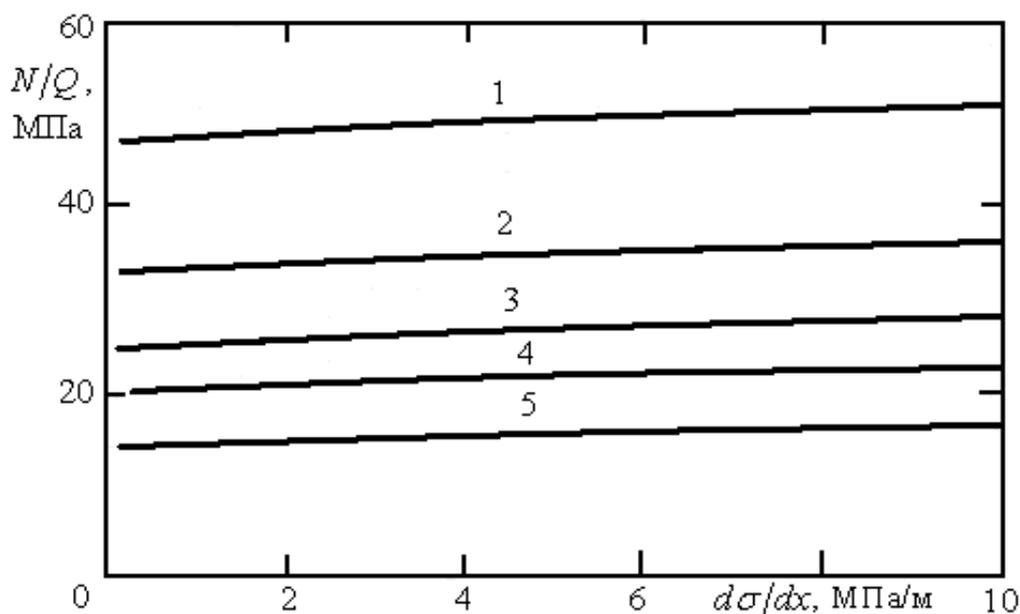


Рисунок 6.8 – Зависимость эффективного давления от градиента напряжений для скорости $|v_c| = 0,30$ м/с при:

1 – $h_{uu} = 0,0045$ м; 2 – $h_{uu} = 0,0060$ м; 3 – $h_{uu} = 0,0075$ м; 4 – $h_{uu} = 0,0090$ м; 5 – $h_{uu} = 0,0120$ м.

Приведенные выше диаграммы свидетельствуют, что увеличение градиента давления незначительно повышает эффективное давление, причем с ростом градиента давления его влияние снижается.

Таким образом, эффективное давление можно использовать как критерий оптимальности глубины шнекового канала и скорости вращения шнека.

Мощность N , передаваемая плоскостью 1 экструдированному материалу на единичной ширине полости насадки, определяется выражением

$$N = \mu' \left(\frac{u_c}{h_k} \right)^n u_c x_k. \quad (6.50)$$

Механическую мощность, передаваемую единице объема экструдированного материала в полости насадки, можно охарактеризовать отношением мощности по выражению (6.50) к расходу по выражению (6.18), которое обозначим $(N/Q)_k$.

Величина $(N/Q)_k$ также имеет размерность давления, поэтому назовем ее эффективным давлением в полости насадки.

Проанализируем характер движения материала между плоскостями в зависимости от расстояния между плоскостями, градиента давления и скорости движения верхней плоскости u_c . В расчетах примем $\mu' = 0,020$ МПа·сⁿ; $x_k = 0,05$ м; $n = 0,24$.

На рисунках 6.9 и 6.10 приведены диаграммы зависимостей эффективного давления от этих параметров при расчетных условиях, указанных выше.

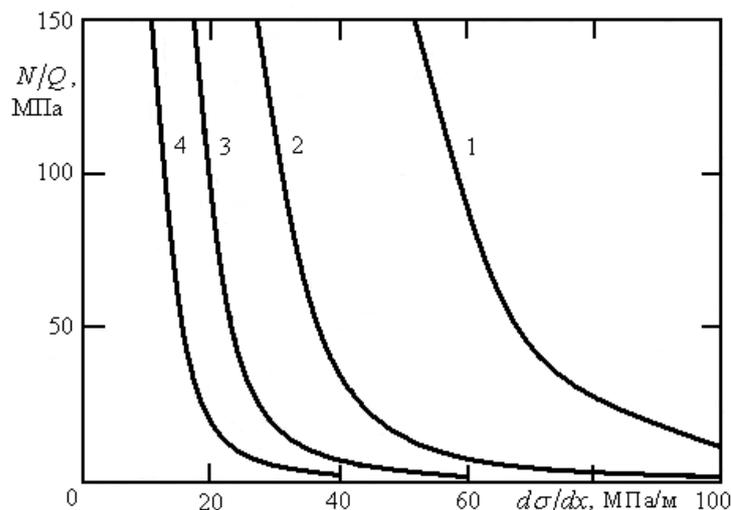


Рисунок 6.9. Зависимость эффективного давления от градиента напряжений

при $v_c = 0,08$ м для высоты полости h_k :

1 – 0,002 м; 2 – 0,003 м; 3 – 0,004 м; 4 – 0,005 м.

Диаграммы свидетельствуют, что увеличение градиента давления резко снижает эффективное давление, которое с ростом градиента давления стремится к нулю. Эффективное давление растет с уменьшением высоты h_k причем интенсивность его возрастания при малых h_k больше.

При увеличении скорости движения плоскости 1 эффективное давление растет, однако с ростом скорости ее влияние уменьшается.

С увеличением глубины канала шнека эффективное давление снижается. С ростом глубины канала его влияние на эффективное давление также снижается.

Следует иметь в виду условность приведенных диаграмм, так как они построены при одинаковой температуре, тогда как интенсивный ввод энергии в экструдруемый материал должен вызывать его нагрев и изменение реологических параметров.

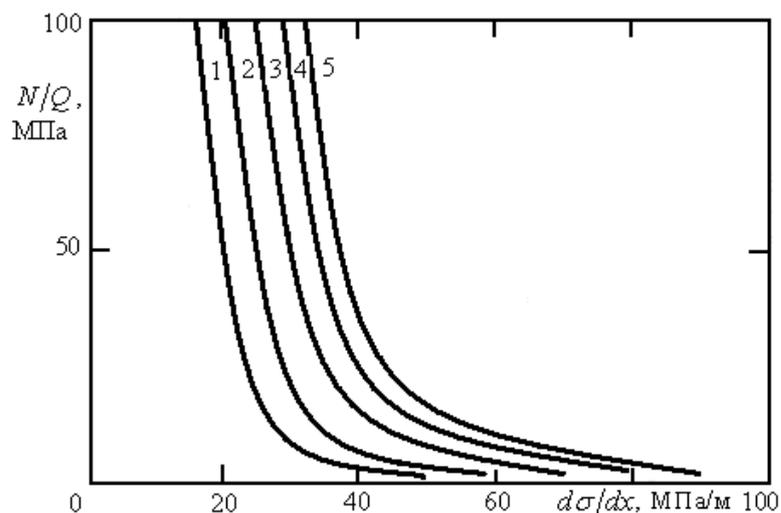


Рисунок 6.10. Зависимость эффективного давления от градиента напряжений при высоте полости $h_k = 0,003$ м для скоростей v_c : 1 – 0,1 м/с; 2 – 0,2 м/с; 3 – 0,4 м/с; 4 – 0,6 м/с; 5 – 0,8 м/с.

Эффективное давление может быть использовано в качестве критерия оценки оптимальности высоты полости насадки и скорости вращения шнека после установления связи этого параметра с температурой экструзии.

Эффективное давление $(N/Q)_k$ можно использовать как критерий оценки оптимальности высоты полости насадки и скорости вращения шнека.

Следует иметь в виду, что эффективное давление должно вычисляться с учетом реальных реологических параметров экструдруемого материала, определяемых с учетом достигнутой материалом температуры.

Эффективные давления могут быть использованы в качестве параметров эффекта второго уровня

Предположив, что давление σ_1 , развиваемое шнеком, расходуется на формообразование полуфабриката, можно оценить энергию, затрачиваемую на другие виды его обработки, используя эффективное давление в канале шнека $(N/Q)_{ш}$ и эффективное давление в полости насадки $(N/Q)_k$. Назовем коэффициентом обрабатывающего воздействия экструдера величину

$$\chi = \frac{(N/Q)_{ш} + (N/Q)_k - \sigma_1}{(N/Q)_{ш} + (N/Q)_k}. \quad (6.51)$$

Его можно использовать как критерий качества полученного экструдата после проведения соответствующих экспериментальных исследований.

Коэффициент χ является параметром эффекта третьего уровня.

6.2. Методика определения неизвестных внешних величин процесса экструдирования

Этот процесс был исследован на лабораторном стенде, разработанном на основе пресса-экструдера ПЭШ-30/4.

Лабораторный стенд позволяет измерять возникающее давление в материале перед насадкой на конце шнека и после нее, угловую скорость шнека, потребляемую электрическую мощность, производительность экструдера. Он оснащен аналого-цифровым преобразователем (АЦП) LC-212F.

Техническая характеристика и геометрические параметры пресса, которые оставались постоянными в экспериментах, приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1

Техническая характеристика экструдера ПЭШ-30/4

Наименование показателя	Значение
Габариты, длина×ширина×высота, м	1,705×0,73×1,505
Масса, кг	480
Производительность паспортная не ниже, кг/ч	30
Мощность электродвигателя, кВт	7,5
Частота вращения электродвигателя, об/мин	1440
Напряжение сети, В	380
Передаточное число редуктора	10
Угловые скорости шнека, обеспечиваемые сменными шкивами, рад/с	16,8; 22,0; 26,7
Длина рабочей части шнека, м	0,515
Число заходов шнека	1
Внутренний диаметр корпуса, м	0,058
Наружный диаметр шнека, м	0,056
Внутренний диаметр шнека, м	0,042
Шаг винтовой лопасти шнека, м	0,04
Осевая толщина лопасти шнека, м	0,007
Число фильер	1

Пресс имеет сменный шнек, на конце которого укреплен насадка типа «торпедо» с шестью продольными канавками прямоугольного сечения, выполняющая функции компрессионного затвора. Привод шнека осуществляется через редуктор и клиноремennую передачу от асинхронного электродвигателя. Скорость вращения шнека изменяется сменой шкивов клиноремennой передачи. Головка пресса позволяет устанавливать матрицы различной конструкции. Лабораторная установка с измерительной аппаратурой показана на рисунке 6.11.

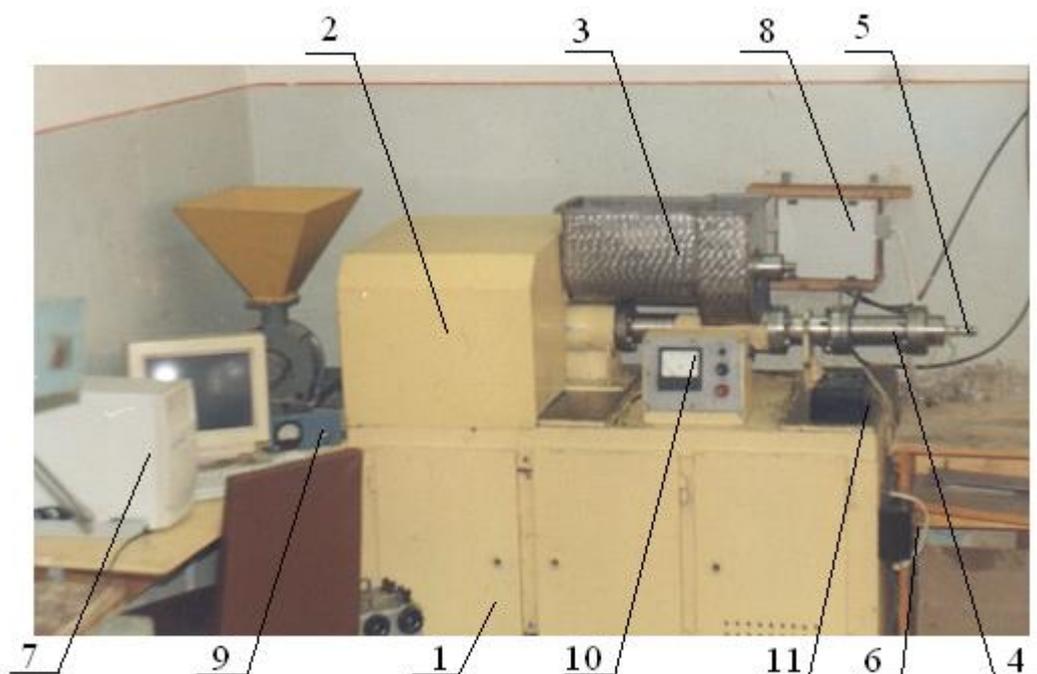


Рисунок 6.11. Общий вид экструдера с измерительной аппаратурой:

- 1 – станина; 2 – редуктор; 3 – загрузочная воронка;
- 4 – цилиндрический шнековый корпус; 5 – формующая головка; 6 – пульт управления; 7 – компьютер; 8 – АЦП;
- 9 – тахометр; 10 – амперметр; 11 – ваттметр.

Питание экструдера осуществляется через смеситель с питающей воронкой 3, соединенный непосредственно со шнековым корпусом, расположенным на станине 1. От тихоходного вала редуктора 2 вращение передается на вал смесителя через цепную передачу. Смеситель играет роль побудителя и обеспечивает постоянство подачи прессуемого материала.

Пуск и остановка пресса осуществляется с пульта управления 6. Для регистрации показаний датчиков использован компьютер 7, получающий сигналы от АЦП 8. Угловая скорость шнека измеряется тахометром 9. Параметры электрооборудования измеряют амперметром 10 и ваттметром 11.

Модуль АЦП предназначен для электротензометрии. Он работает с мостовыми и полумостовыми схемами соединения тензодатчиков с сопротивлением от 100 до 1000 Ом при статических и динамических измерениях.

Модуль работает совместно с персональным компьютером, подсоединение модуля осуществляется через LPT порт. АЦП имеет встроенные функции калибровки нуля и диапазона, которые выполняются на цифровом уровне. Параметры калибровки хранятся в памяти модуля до следующей процедуры.

Модуль имеет функцию проверки входных цепей каждого канала на обрыв и короткое замыкание. При запуске этой функции на входы каждого канала подключаются источники постоянного тока величиной 100 мА и затем проводится измерение

входного сигнала. При выходном коде, равном нулю, фиксируется короткое замыкание; при максимальном коде – обрыв.

Выходные сигналы тензодатчиков подаются непосредственно на входы АЦП. Опорное напряжение АЦП является напряжением питания датчиков.

Тензометрическая система измерения давлений в шнековом прессующем механизме. Для определения усилий, развиваемых в процессе работы, имеется два устройства, состоящих из трех втулок каждое, установленных под головки болтов, стягивающих фланцы (рисунок 6.12).

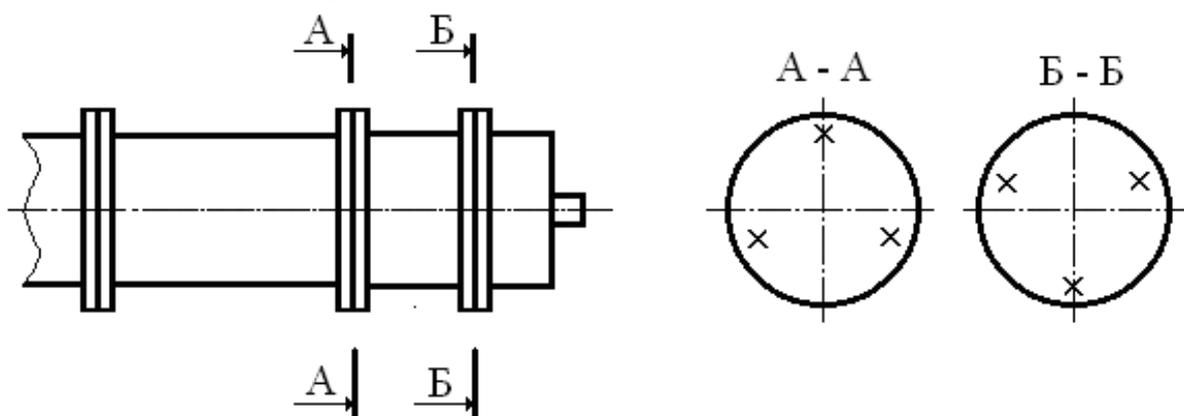


Рисунок 6.12. Схема устройства измерения давлений в шнековом прессе.

В соответствии с рисунком 6.12 втулки расположены в двух сечениях – на конце шнека, перед насадкой, (сечение А-А с максимальным напряжением в прессуемом материале) и непосредственно перед входом в матрицу (сечение Б-Б). Крестиками на рисунке обозначены места расположения втулок.

Втулки были изготовлены из незакаленной стали 45 (ГОСТ 1050-74). На каждой втулке наклеены два датчика – один в меридиональном направлении, а другой в окружном направлении. Оба датчика наклеены симметрично относительно срединной плоскости (рисунок 6.13).

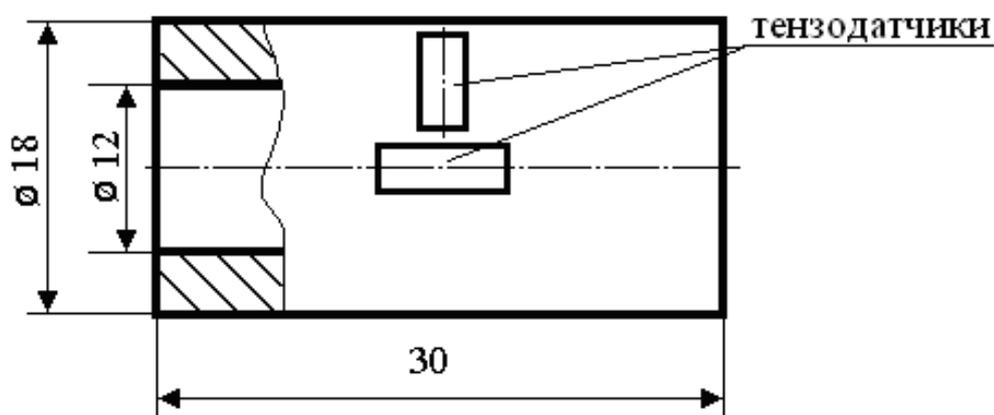


Рисунок 6.13. Схема тензометрической втулки

Датчики были наклеены клеем БФ-2 ТУ 2252-011-4553971-98 по общепринятой технологии.

Подключение меридиональных датчиков R_1 каждого из устройств на фланце произведено последовательным соединением в одно плечо измерительного моста, а окружных R_2 – в другое плечо (рисунок 6.14).

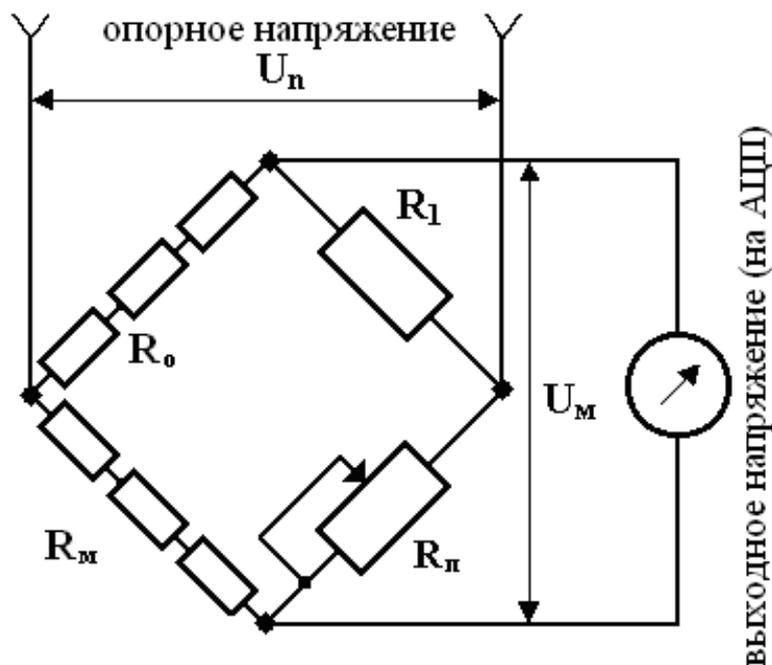


Рисунок 6.14. Схема соединения датчиков в мост

Это позволяет повысить точность измерений за счет увеличения суммарного изменения электрического сопротивления системы тензодатчиков, и компенсировать температурные деформации. Дополнительно в плечи моста подключены элемент постоянного сопротивления R_1 и подстроечный резистор R_{II} для уравнивания моста.

Для экспериментального измерения пользовались тензометрическими датчиками типа 2ПКБ 10-100ГВ (измерительная база 10 мм, номинал $R = 99,7$ Ом, коэффициент чувствительности $S = 2,00$). Сигнал, получаемый с тензодатчиков, регистрируется на АЦП и передается в компьютер, где преобразуется в численные значения измеряемых величин, которые записываются в виде массивов данных и графиков зависимости от времени.

Тарировку каждого комплекта из трех втулок с наклеенными тензодатчиками проводили на прессе ИР5047-50 УХЛ 4.2 ГОСТ 7855-84. Данная модель прессы позволяет задавать нагрузки с пульта дистанционного управления, что значительно снижает погрешность при проведении повторностей тарировки. В результате были

построены тарировочные зависимости напряжения разбаланса моста от осевой нагрузки.

Расчет нормальных напряжений в экструдирваемом материале по осевым усилиям во фланцах. Головка экструдера, позволяющая измерять осевые усилия в корпусе шнека в сечениях А-А на конце шнека и Б-Б на конце насадки представлена на рисунке 6.15.

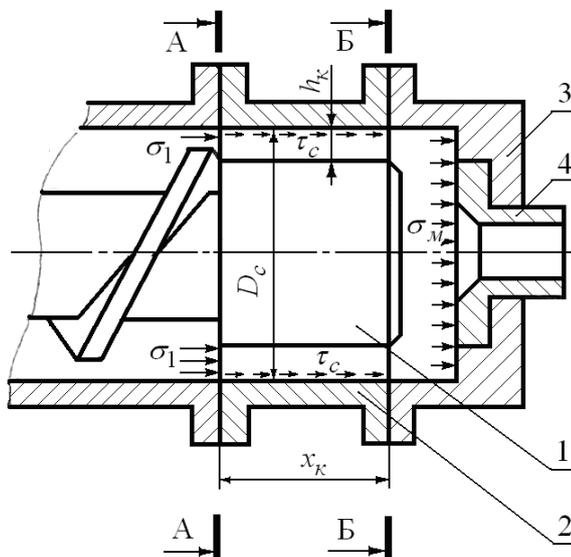


Рисунок 6.15. Схема устройства для измерения осевых усилий в головке экструдера: 1 – насадка типа «торпедо»; 2 – вставка; 3 – матрица; 4 – фильера.

Усилие P_1 во фланце на конце шнека (сечение А-А) связано с усилием P_m во фланце перед матрицей 3 (сечение Б-Б) зависимостью

$$P_1 = P_m + \Delta P, \quad (6.52)$$

где ΔP – разность между усилиями P_1 и P_m , вызванная меридиональными касательными напряжениями τ_c на поверхности вставки 2.

В сечении Б-Б усилие P_m связано с нормальным напряжением в материале σ_m зависимостью

$$P_m = \frac{\pi D_c^2}{4} \sigma_m, \quad (6.53)$$

где D_c – внутренний диаметр корпуса шнека.

Суммируя меридиональные касательные напряжения на корпусе шнека τ_c между сечениями А-А и Б-Б, получим с учетом местных сопротивлений на входе в полость насадки

$$\Delta P = \tau_c \pi D_c (x_k + cR_k). \quad (6.54)$$

Касательное напряжение τ_c для данного случая можно определить выражением

$$\tau_c = \frac{h_k}{2} \frac{d\sigma}{dx}. \quad (6.55)$$

Используя приведенные зависимости, с учетом (6.43) определим напряжение σ_1 по экспериментально измеренным усилиям P_1 и P_m по формуле

$$\sigma_1 = \frac{2}{\pi D_c h_k} \left[P_1 + P_m \left(2 \frac{h_k}{D_c} - 1 \right) \right]. \quad (6.56)$$

Если $2h_k/D_c \ll 1$, выражение (6.56) упрощается

$$\sigma_1 = \frac{2(P_1 - P_m)}{\pi D_c h_k}. \quad (6.57)$$

При отсутствии насадки на конце шнека сечения А-А и Б-Б совпадают и максимальное напряжение в одношнековом прессующем механизме определяется из выражения для P_m .

Система измерения температуры в головке шнекового прессующего механизма. Измерялись температура внешней поверхности головки экструдера и экструдата электронным термометром.

Измерение угловой скорости шнека. Угловая скорость вращения шнека измерялась при помощи тахометра. Вал тахометра посредством резинового ремня соединен с тихоходным валом редуктора, что обеспечивает возможность получения точных значений угловой скорости на валу шнека экструдера.

Измерение мощности сил полезного сопротивления в шнековом прессующем механизме. Мощность сил полезного сопротивления N определяли по формуле

$$N = \eta_{общ} N_2, \quad (6.58)$$

где $\eta_{общ}$ – общий механический КПД, включающий КПД ременной передачи, редуктора и подшипниковой опоры шнека;

N_2 – мощность на роторе электродвигателя.

Мощность на роторе электродвигателя N_2 связана с активной мощностью N_1 , потребляемой электродвигателем выражением

$$N_2 = N_1 - \sum N_{ном}, \quad (6.59)$$

где $\sum N_{ном}$ – суммарные потери в машине.

Суммарные потери определяются следующим образом:

$$\sum N_{ном} = N_{мх} + N_{см} + N_{м1} + N_{м2} + N_{доб}, \quad (6.60)$$

где N_{mx} – механические потери на трение и вентиляционные потери;

N_{cm} – потери в стали ротора и статора;

N_{m1} – электрические потери в обмотке статора;

N_{m2} – электрические потери в обмотке ротора;

$N_{доб}$ – добавочные потери при нагрузке.

Электрические потери в обмотках ротора и статора, а также добавочные потери малы, поэтому ими пренебрегаем, оставшиеся потери можно определить через потери холостого хода:

$$N_{mx} + N_{cm} = N_{xx} - m_1 I_{xx}^2 r_1, \quad (6.61)$$

где N_{xx} – мощность холостого хода электродвигателя;

m_1 – число фаз обмотки статора;

I_{xx} – фазный ток статора при холостом ходе;

r_1 – сопротивление фазной обмотки статора.

Измерение производительности экструдера. Производительность экструдера определяли взвешиванием и находили как массу материала, экструдированного за одну секунду.

Время отбора проб для определения производительности экструдера фиксировалось механическим секундомером.

Производительность экструдера определяли взвешиванием отобранных образцов на электронных весах.

Методика расчета реологических параметров экструдированного материала. В эксперименте использована головка экструдера, которая помимо насадки на конце шнека имеет матрицу с одной цилиндрической фильерой диаметром d_m и длиной z_m .

Массовый расход Q_m через головку экструдера, как следует из второго уравнения системы (6.40), в предположении постоянства градиентов давления с учетом (6.52) и (6.56) примет вид

$$Q_m = \rho E_p (P_1 - P_m)^m = \rho H_p P_m^m, \quad (6.62)$$

где ρ – плотность экструдированного материала;

$$E_p = \frac{\pi (D_c - h_k) h_k^2}{4 [\mu' \pi D_c (x_k + c R_k)]^m (m+1)}; \quad (6.63)$$

$$H_p = \frac{\pi d_m^{m+3}}{8(\mu' \pi z_m D_c^2)^m (m+3)}; \quad (6.64)$$

c – коэффициент местных сопротивлений насадки;

R_k – гидравлический радиус канала компрессионного затвора.

По результатам ранее проведенных исследований для прессующего механизма экструдера ПЭШ-30/4 получено $c = 70$.

Экспериментально измерив величины Q_m , P_1 , P_m , из уравнений (6.62) можно вычислить реологические параметры тела Оствальда-де Виля μ' и n .

В связи со сложной формой компрессионного затвора величину h_k можно рассматривать как эквивалентную величину зазора в компрессионном затворе. Для ее определения следует экспериментально определить величины Q_m , P_1 , P_m при экструдировании одного и того же материала при одинаковой температуре, но различной угловой скорости шнека.

Из второго равенства (6.62) с учетом выражений (6.63) и (6.64) можно получить зависимость между усилиями P_1 и P_m

$$\frac{P_1}{P_m} = 1 + \frac{(x_k + cR_k) d_m}{z_m D_c} \left[\frac{d_m^3 (n+1)}{2(D_c - h_k) h_k^2 (3n+1)} \right]^n. \quad (6.65)$$

Анализ выражения (6.65) показывает, что отношение усилий в головке экструдера зависит только от геометрии рабочего пространства и индекса течения экструдруемого материала. То есть оно является константой для данной конструкции головки экструдера при постоянной температуре, влажности и составе экструдруемого материала. Отношение усилий не зависит от производительности экструдера. Таким образом, эта величина может служить критерием качества ведения технологического процесса экструдирования.

Приближенное определение параметров слоя проскальзывания. Известно условие постоянства знака касательных напряжений в канале шнека

$$h_{ш}^2 \left[\frac{v_c}{h_{ш}} - \frac{a_{ш}^m h_{ш}^m}{m+2} \right] \geq Q. \quad (6.66)$$

Условие (6.66) выполнялось во всех проведенных опытах. Ввиду малости толщины слоя проскальзывания материала по дну канала шнека ее влиянием на объемную производительность Q пренебрегали. Тогда неизвестная величина

координаты y_0 , где напряжения сдвига в экструдиреваемом в канале шнека материале равны нулю, определяется из уравнения (6.12).

Скорость проскальзывания v_n определим из уравнения распределения скоростей в канале шнека (6.9), считая, что слой проскальзывания находится вне пределов канала шнека, то есть

$$\frac{a_{\mu}}{m+1}[(h_{\mu} - y_0)^{m+1} - (-y_0)^{m+1}] + v_c - v_n = 0. \quad (6.67)$$

С другой стороны, предполагая свойства слоя проскальзывания адекватными свойствам воды с вязкостью μ , толщину слоя проскальзывания можно записать из (6.4) с учетом (6.41) и (6.56)

$$h_n = -\frac{v_n \mu}{2y_0} \frac{\pi D_c h_k L}{(P_1 - P_m) \sin \alpha}. \quad (6.68)$$

Вычисление толщины слоя проскальзывания производили с учетом изменения вязкости воды от температуры для тех экспериментальных замеров, которые были проведены при определении реологических параметров.

Определение коэффициента отклонения формы c_ϕ канала фильеры переменного сечения от цилиндрического. Если известны реологические свойства полуфабриката и геометрические размеры канала, величину c_ϕ можно вычислить из выражения (6.37). С учетом (6.38) и (6.52) получим

$$c_\phi = z_\mu^m \left[\frac{2P_m}{\mu' \pi D_c^2} \left(\frac{m+3}{R^{m+3}} \right)^{-(1/m)} \left(\frac{Q_M}{\pi \rho} \right)^{-(1/m)} - \frac{x_{\mu}}{c_{\mu}^{1/m}} \right]^{-m}. \quad (6.69)$$

Обеспечение требуемых режимов экструдирования. Исходную влажность определяли по ГОСТ 14849-69 для трех навесок массой 5 граммов, высушиваемых в электрическом сушильном шкафу в течение 40 минут при температуре 130 °С. Исходную влажность вычисляли по формуле:

$$W_0 = \frac{M_0 - M_c}{M_0} 100, \quad (6.70)$$

где M_0 – масса исходной навески;

M_c – масса навески после сушки.

Исходная влажность продукта W_0 снижается перемешиванием с отрубями влажностью W_1 . Чтобы обеспечить требуемую влажность смеси W , к навеске массой M_0 следует добавить массу отходов M_1 , вычисляемую по формуле:

$$M_1 = M_0 \frac{W_0 - W}{W - W_1} \quad (6.71)$$

Плотность полученного экструдата, определяли по ГОСТ 22163-76. Для вычисления плотности использовали формулу:

$$\rho = \frac{M}{V}, \quad (6.72)$$

где M – масса продукта;
 V – объем продукта.

6.3. Определение параметров процесса экструдирования

В соответствии с методикой, изложенной в параграфе 6.2, были определены параметры процесса экструдирования, необходимые для идентификации математической модели, изложенной в параграфе 6.1.

Эксперименты произведены при экструдировании смесей пшеничных отрубей с пивной дробинкой и спиртовой бардой в различной пропорции, имеющими соответственно разную влажность.

Для исследуемых материалов получена статистически значимая зависимость их плотности ρ [кг/м³] от относительной влажности W [%], приведенная ниже соответственно для смесей со спиртовой бардой

$$\rho = 1191,5 - 3,2W, \quad (6.73)$$

и пивной дробинкой

$$\rho = 1001,0 - 0,7W. \quad (6.74)$$

Параметры прессующего механизма и исследуемого материала для экспериментального определения его реологических свойств при экструдировании приведены в таблице 6.2.

Таблица 6.2

Параметры эксперимента по определению реологических свойств экструдированных смесей

Наименование параметра		Размерность	Величина
Относительная влажность смеси	Со спиртовой бардой	%	28 ... 70
	С пивной дробинкой	%	26 ... 70
Температура смеси		°С	25 ... 100
Плотность смеси	Со спиртовой бардой	кг/м ³	970 ... 1100
	С пивной дробинкой	кг/м ³	952 ... 983
Диаметр цилиндрической фильеры		м	0,014
Длина фильеры		м	0,055
Осевая протяженность насадки на конце шнека		м	0,04
Внутренний диаметр корпуса шнека		м	0,058
Величина зазора между корпусом и насадкой		м	0,008
Угловые скорости шнека		рад/с	16,8;22,0;26,7

Обработка результатов экспериментов проведена средствами электронных таблиц Microsoft Excel. Оценка точности аппроксимации оценена доступным в таблицах Excel коэффициентом детерминации R^2 .

Экспериментально измерив Q_m , P_1 , P_m , из (6.62) вычислили реологические параметры тела Оствальда-де Виля μ' [Па·сⁿ] и n .

Получены следующие зависимости от относительной влажности W [%] и температуры t [°C] для определения коэффициента консистенции смеси со спиртовой бардой

$$\mu' = 7,2 \cdot 10^{13} W^{-4,6} t^{-1,5}; \quad R^2 = 0,95; \quad (6.75)$$

и пивной дробинкой

$$\mu' = 1,0 \cdot 10^{14} W^{-4,7} t^{-1,4} \quad R^2 = 0,97. \quad (6.76)$$

Для индекса течения эти же зависимости имеют соответственно вид

$$n = -0,31 + 0,015W + 0,0031t; \quad R^2 = 0,99; \quad (6.77)$$

$$n = -0,38 + 0,016W + 0,0032t \quad R^2 = 0,97. \quad (6.78)$$

Высокое значение достоверности аппроксимации, выраженное величиной коэффициента R^2 , позволяет использовать полученные зависимости в дальнейших исследованиях.

Определение реологических параметров экструдированной смеси дает возможность вычислить для нее толщину слоя проскальзывания материала в канале шнека на основе следующего подхода.

Толщину слоя проскальзывания вычисляли с учетом изменения вязкости воды от температуры для тех экспериментальных замеров, которые были проведены для определения реологических параметров.

Параметры прессыющего механизма и исследуемого материала для определения толщины слоя проскальзывания приведены в таблице 6.3.

Таблица 6.3

Параметры определения толщины слоя проскальзывания по дну канала шнека для экструдированных смесей

Наименование параметра		Размерность	Величина
Относительная влажность смеси	Со спиртовой бардой	%	28 ... 70
	С пивной дробинкой	%	26 ... 70
Температура смеси		°C	25 ... 100
Плотность смеси	Со спиртовой бардой	кг/м ³	970 ... 1100
	С пивной дробинкой	кг/м ³	952 ... 983
Величина зазора между корпусом и насадкой		м	0,008

Зависимости от относительной влажности W [%] и температуры t [°C] и относительной скорости движения шнекового корпуса вдоль оси канала шнека v_c [м/с] для определения толщины слоя проскальзывания h_n [м] соответственно имеют вид при экструдировании смеси со спиртовой бардой

$$h_n = 1,2 \cdot 10^{-8} W^{0,44} t^{-0,72} |v_c|^{1,3}; \quad R^2 = 0,93; \quad (6.79)$$

и пивной дробинкой

$$h_n = 6,2 \cdot 10^{-11} W^{1,4} t^{-0,39} |v_c|^{0,27} \quad R^2 = 0,91. \quad (6.80)$$

Высокое значение достоверности аппроксимации, выраженное величиной коэффициента R^2 , позволяет использовать полученные зависимости в дальнейших исследованиях.

Для матрицы с фильерой в упругой оболочке был определен коэффициент c_ϕ приведения осевой длины участка канала с плавным переходом от круглой формы поперечного сечения до плоской щели высотой h_ϕ к длине цилиндрического канала исходного диаметра d_m , создающего такое же сопротивление как данный участок канала.

Для вычисления c_ϕ из (6.69) нужно экспериментально определить реологические параметры и плотность экструдата, а также величины P_m и Q_ϕ .

Экспериментальное определение перечисленных выше параметров было выполнено на смеси спиртовой барды с отрубями при их экструдировании через матрицу с одной фильерой, образованной стальным патрубком, на котором закреплена трубка из армированной резины. Выходной конец трубки сжат струбциной до получения щели заданной высоты.

Параметры прессующего механизма и исследуемого материала для определения коэффициента c_ϕ приведены в таблице 6.4.

Таблица 6.4

Параметры определения коэффициента c_ϕ при экструдировании смеси спиртовой барды с отрубями

Наименование параметра	Размерность	Величина
Относительная влажность смеси	%	28 ... 70
Температура смеси	°C	25 ... 100
Плотность смеси	кг/м ³	970 ... 1100
Радиус цилиндрического канала фильеры	м	0,007
Длина фильеры до плоской щели	м	0,110
Высота плоской щели	м	0,0025; 0,0030
Ширина плоской щели	м	0,0305; 0,0300
Длина плоской щели	м	0,010

Обработка результатов эксперимента позволила получить следующую зависимость

$$c_{\phi} = 2,4 \cdot 10^{-6} n^{9,9} \left(\frac{h_{\phi}}{R} \right)^{\frac{0,73+1,46n}{n}}; R^2 = 0,99. \quad (6.81)$$

Высокое значение достоверности аппроксимации, выраженное величиной коэффициента R^2 , позволяет использовать полученную зависимость в дальнейших исследованиях.

Выполненное определение параметров процесса экструдирования позволяет проводить расчеты технологических режимов процесса экструдирования смесей спиртовой барды и пивной дробины с отрубями.

В соответствии с методикой, изложенной в параграфе 6.2, была произведена оценка энергоемкости процесса экструдирования смесей высоковлажных отходов бродильных производств с пшеничными отрубями. На основании результатов экспериментов построены регрессионные зависимости энергоемкости экструдирования N/Q от параметров, определяющих технологический режим экструдирования. Для примера нами приведены результаты для случая экструдирования смеси спиртовой барды с пшеничными отрубями через цилиндрическую фильеру.

Параметры прессующего механизма и исследуемого материала для определения энергоемкости экструдирования смеси пшеничных отрубей со спиртовой бардой приведены в таблице 6.5.

Таблица 6.5

Параметры экспериментального определения энергоемкости экструдирования

Наименование параметра	Размерность	Величина
Относительная влажность смеси	%	28 ... 70
Температура смеси	°C	25 ... 100
Диаметр цилиндрической фильеры	м	0,014
Длина фильеры	м	0,055
Осевая протяженность насадки на конце шнека	м	0,04
Величина зазора между корпусом и насадкой	м	0,008

Обработка результатов эксперимента средствами электронных таблиц Excel позволила получить следующую зависимость от относительной влажности W [%] и температуры экструдата t [°C], а также относительной скорости движения рабочих органов v_c [м/с] для определения энергоемкости процесса экструдирования N/Q [кДж/кг]:

$$N/Q = 9,0 \cdot 10^4 W^{-1,5} t^{-0,067} v_c^{-0,078}; R^2 = 0,76. \quad (6.82)$$

Для оценки изменения энергоемкости в исследованных диапазонах изменения параметров экструдирования были построены диаграммы изменения относительной энергоемкости $N/Q_{отн}$, которая представляет собой отношение энергоемкости по

формуле (6.82) к единичной, принятой на расчетном диапазоне при $W = 83 \%$; $t = 70$ °C; $v_c = 0,47$ м/с.

Величина единичной энергоемкости составляет 108 кДж/кг.

На рисунке 6.16 показана диаграмма зависимости относительной энергоемкости процесса экструдирования от относительной скорости движения рабочих органов и относительной влажности экструдируемого продукта. Из нее видно, что при заданной температуре процесса увеличение относительной влажности значительно снижает энергоемкость экструдирования.

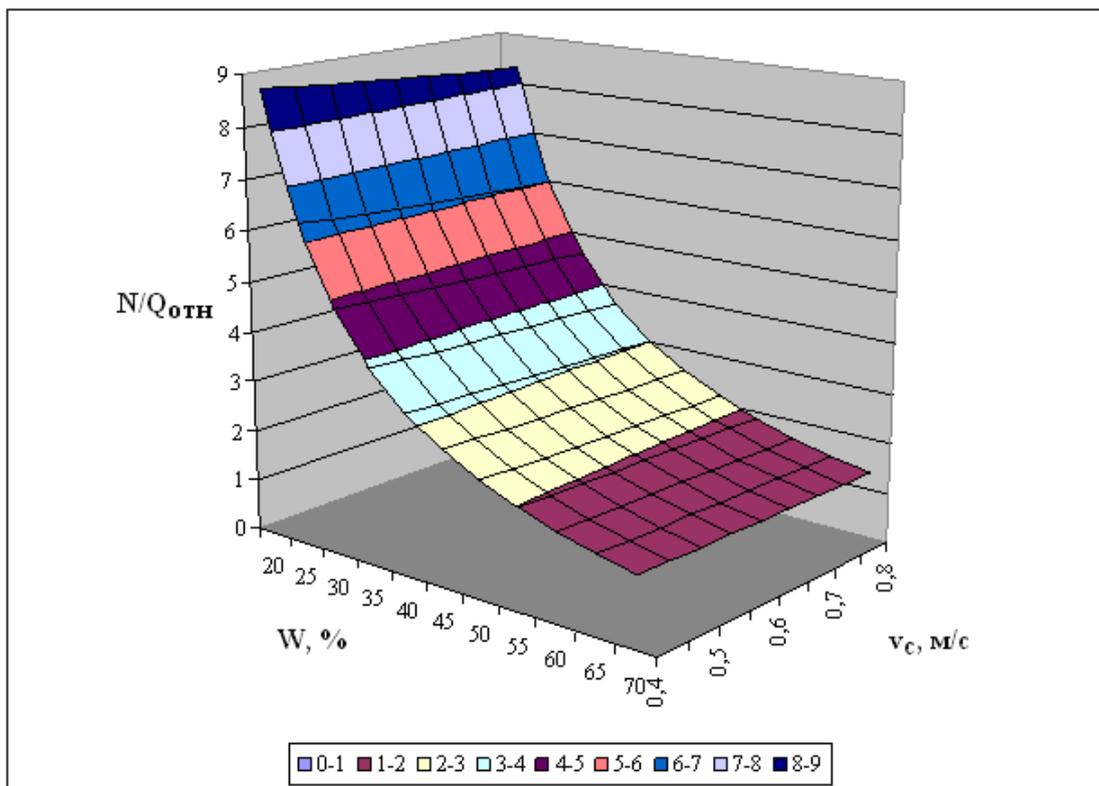


Рисунок 6.16. Диаграмма изменения относительной энергоемкости процесса экструдирования при $t = 30$ °C.

Увеличение скорости движения рабочих органов незначительно уменьшает энергоемкость.

Из диаграммы, приведенной на рисунке 6.17, также следует, что увеличение влажности значительно интенсивнее снижает энергоемкость, чем увеличение скорости движения рабочих органов.

Если технологическими требованиями установлена влажность экструдата, то, как следует из диаграммы на рисунке 6.18, снижения энергоемкости экструдирования можно достичь, как увеличением температуры процесса, так и увеличением скорости рабочих органов экструдера.

Таким образом, если конструктивно ограничена скорость рабочих органов экструдера, снижения энергоемкости следует добиваться увеличением относительной влажности экструдата, а, если задана технологическая влажность экструдата,

снижения энергоемкости следует добиваться увеличением относительной скорости рабочих органов экструдера.

Полученная зависимость (6.82) может быть использована для определения рациональных режимов процесса экструдирования смеси пшеничных отрубей с высоковлажными отходами бродильных производств.

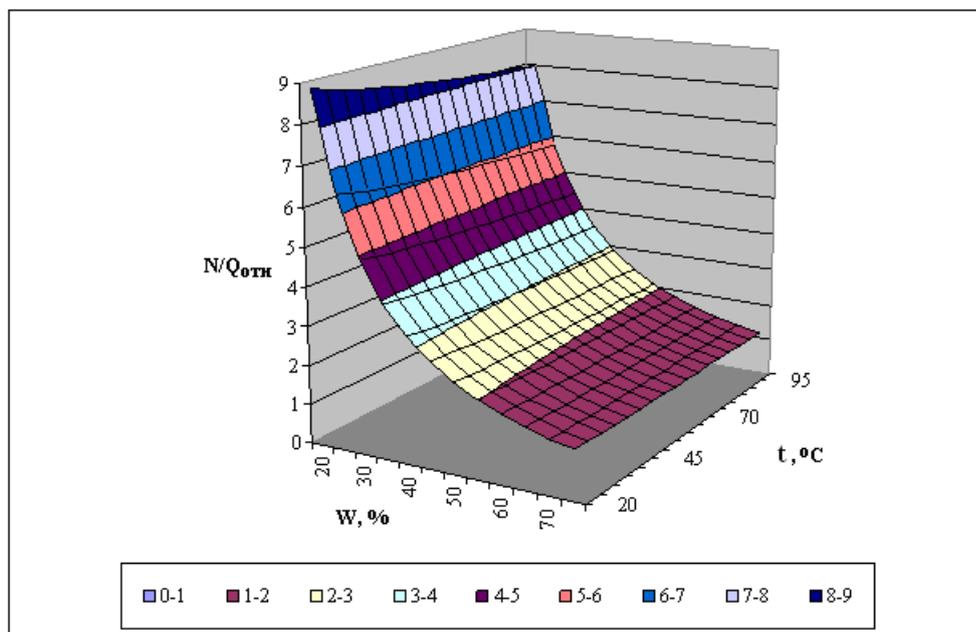


Рисунок 6.17. Диаграмма изменения относительной энергоемкости процесса экструдирования при $v_c = 0,47$ м/с.

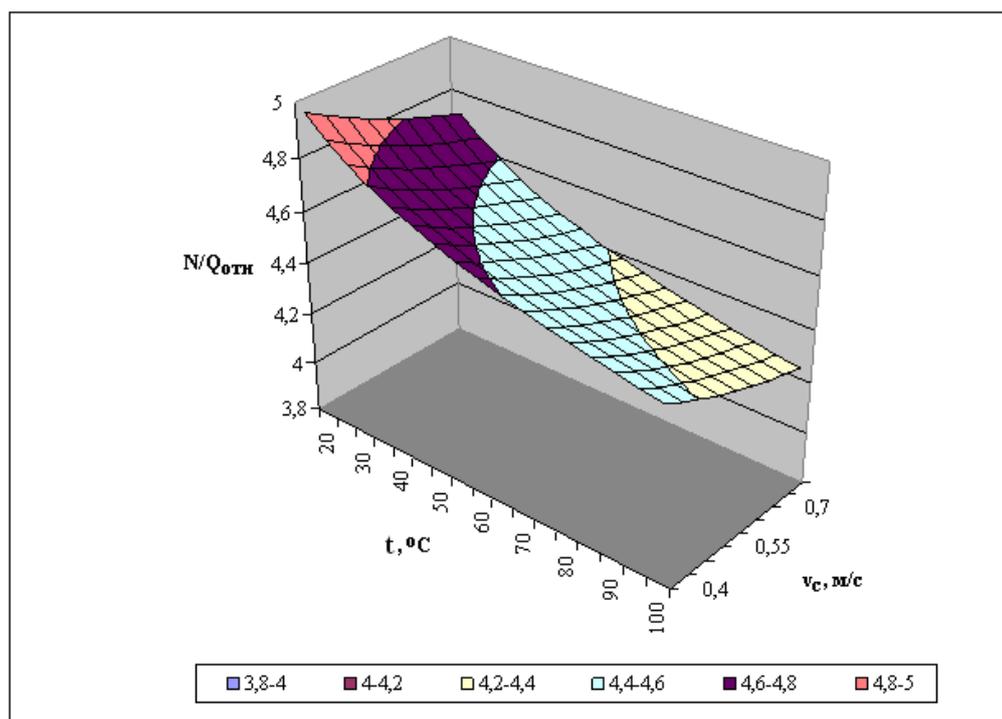


Рисунок 6.18. Диаграмма изменения относительной энергоемкости процесса экструдирования при $W = 30$ %.

7. Новые конструкции экструдированного оборудования

Из основных процессов технологии утилизации отходов бродильных производств определяющим является процесс экструдирования. От его результатов зависит эффективность процессов впитывания дисперсионной среды и последующей сушки полуфабриката. Это приводит к необходимости адаптации конструкции экструдеров к требованиям технологии. Ниже приведены конструктивные решения экструдированного оборудования, использование которых перспективно для данной технологии, в том числе созданные при ее разработке.

7.1. Матрицы с фильерами переменного сечения

В процессе выхода экструдера на технологический режим эксплуатации часто происходит заклинивание фильер экструдруемым материалом, которое трудно преодолеть. Для предотвращения этого явления, а также для упрощения перенастройки на выпуск полуфабриката в виде ленты различного сечения предложена конструкция матрицы экструдера, защищенная патентом РФ № 2092056.

На рисунке 7.1 показан общий вид матрицы, содержащей две фильеры, на рисунке 7.2 показана установка подвижной стенки в матрице.

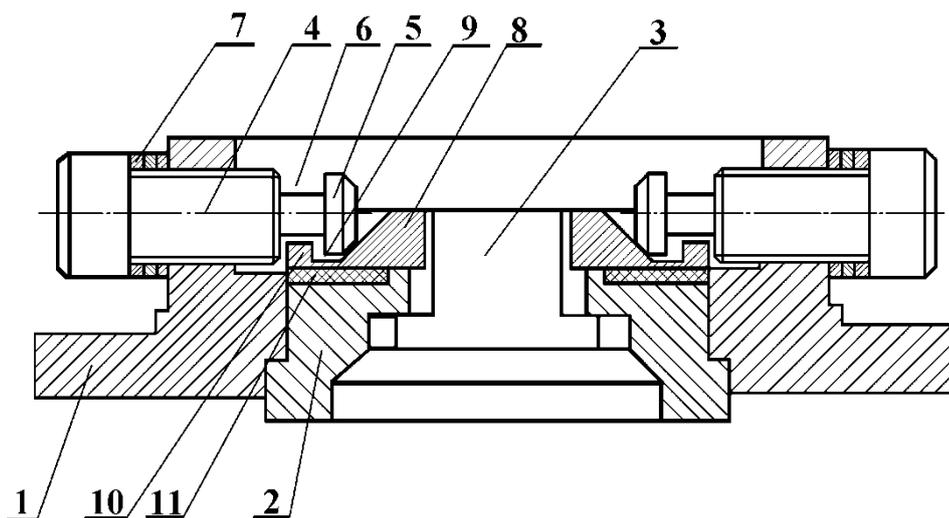


Рисунок 7.1. Общий вид матрицы

В корпусе матрицы 1 помещена вставка 2. Во вставке зафиксирован вкладыш 3, образующий дно прессующего канала. В резьбовом отверстии корпуса установлен регулировочный винт 4 с наконечником 5, имеющим коническую форму и кольцевую канавку 6 вблизи конца.

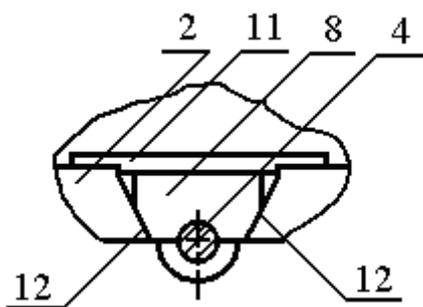


Рисунок 7.2. Подвижная стенка матрицы

Между наконечником регулировочного винта и корпусом установлены быстросъемные регулировочные шайбы 7. Наконечник регулировочного винта входит в паз 9 на подвижной стенке канала 8, имеющей хвостовик 10. Паз имеет форму ласточкиного хвоста. На вставке установлен сухарь 11. Подвижная стенка 8 имеет упор на перпендикулярные ей плоские стенки 12.

Полуфабрикат под давлением подается в матрицу и экструдирован через зазор, отрегулированный по технологическим требованиям. В случае заклинивания пресуемого материала в щели канала посредством регулировочного винта осуществляется отвод подвижной стенки, скользящей по вставке и поверхности сухаря. При поворачивании регулировочного винта происходит силовое размыкание деталей (подвижная стенка, сухарь), что обеспечивает движение подвижной стенки и восстановление нормального течения полуфабриката. После этого осуществляется возвращение подвижной стенки посредством регулировочного винта до упора в регулировочные шайбы с выходом на необходимый технологический зазор. При пуске оборудования зазор устанавливается максимальным с постоянным уменьшением до технологического. Система сил, образуемая действием на подвижную стенку экструдированного материала и конической поверхностью регулировочного винта, образует главный вектор и главный момент, обеспечивающие силовое замыкание на поверхностях ласточкиного хвоста и сухаря, которое препятствует истечению экструдированного материала во все зазоры кроме рабочих.

Вариант этой же матрицы с общим приводом для синхронного перемещения всех подвижных стенок матрицы предложен в конструкции, защищенной патентом РФ № 2154944.

На рисунке 7.3 показан общий вид матрицы, а на рисунке 7.4 – ее разрез А-А, на котором показана подвижная часть, выполненная в форме ласточкиного хвоста.

Устройство содержит корпус матрицы 1, внутри которого помещена вставка 2. В матрице зафиксирован вкладыш 3, образующий дно канала. Подвижная стенка канала 4, выполненная в форме ласточкиного хвоста, снабжена элементом трапецидальной многозаходной резьбы 5. В пазу по вставке размещен сухарь 6.

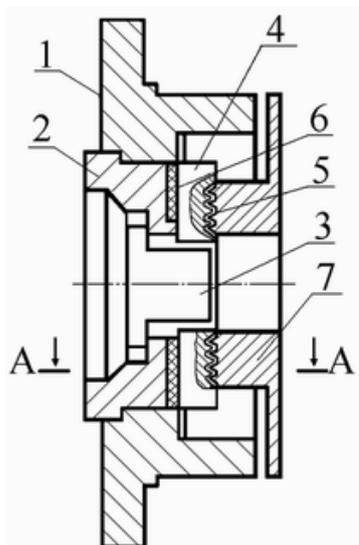


Рисунок 7.3. Матрица с общим приводом перемещения подвижных стенок

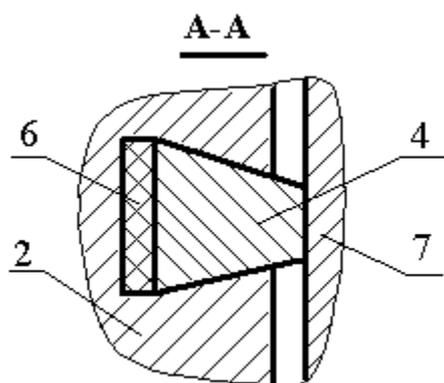


Рисунок 7.4. Расположение подвижной стенки во вставке

В подвижные стенки 4 вворачивается упорная гайка 7 с нанесенной шкалой делений. Осевая подвижность гайки 7 для предотвращения ее выпадения ограничена упорами на корпусе 1, которые условно не показаны.

При вворачивании упорной гайки происходит силовое размыкание деталей (подвижная стенка, сухарь), что обеспечивает движение подвижной стенки и восстановление нормального течения полуфабриката.

Затем осуществляют возврат подвижной стенки посредством упорной гайки с выходом на необходимый технологический зазор. При пуске оборудования зазор устанавливают максимальным с постепенным уменьшением до технологического.

Использование описанных матриц в экструдерах расширяет ассортимент вырабатываемой продукции, снижает время технологических простоев, вызванных заклиниванием выходного отверстия.

Применяемые в пищевой промышленности матрицы экструдеров, в частности для формования экструдата в виде ленты дают возможность получать при использовании одной конкретной матрицы только один типоразмер изделий.

Конструкция по патенту РФ № 2089065 позволяет расширить функциональные возможности матрицы.

На рисунке 7.5 показан фрагмент матрицы для производства лентообразных изделий, на рисунке 7.6 показан профиль паза.

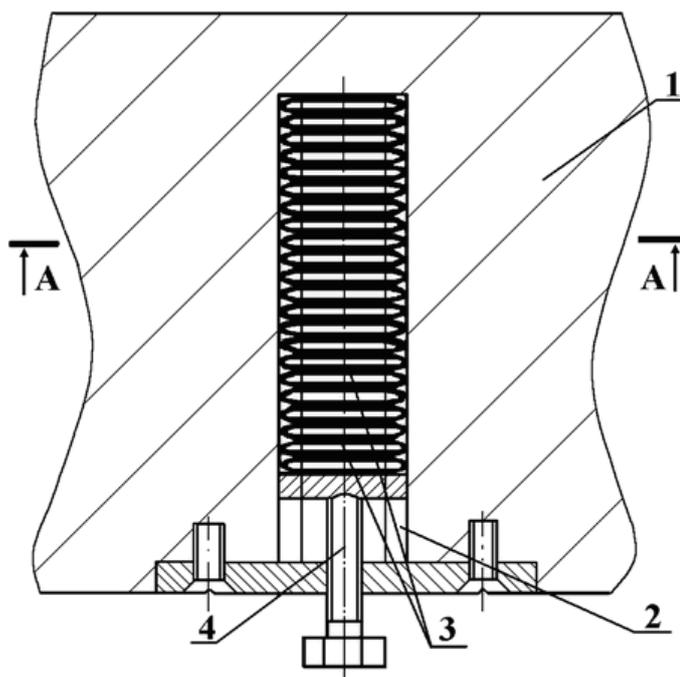


Рисунок 7.5. Фрагмент поперечного сечения матрицы

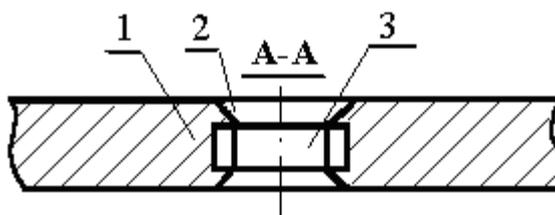


Рисунок 7.6. Профиль паза

В матрице пресса-экструдера 1 сквозные отверстия выполнены в виде прямоугольных пазов 2 с установленными в них плоскими пружинами 3 с регулируемой механизмом 4 степенью сжатия.

Каждая пружина состоит из одинаковых, не связанных друг с другом изогнутых упругих элементов корытообразной формы, причем любые два соседних элемента установлены изгибом в противоположные стороны.

Матрица работает следующим образом. Перерабатываемый материал под давлением подается к матрице и продавливается через паз 2. Пружинные элементы разрезают экструдат на ленты. При этом две торцевые стенки образуются при скольжении материала по стенкам паза, а две боковые стенки ленты образуются при его скольжении по плоским поверхностям двух соседних упругих элементов 3. Упругие элементы объединены в плоскую пружину, степень сжатия которой

регулируется механизмом. При изменении степени сжатия пружины расстояние между стенками двух соседних упругих элементов изменяется, что приводит к изменению толщины выпрессовываемой ленты.

Данная конструкция позволяет вырабатывать на одной матрице лентообразные изделия различных видов, отличающихся толщиной изделия, и обеспечивает быстрый переход с выработки изделий одного вида на выработку изделий другого вида.

7.2. Матрицы с фильерами в упругой оболочке

В процессе работы экструдат не должен проникать в подвижные соединения матрицы, заклинивая их. Это приводит к необходимости остановки экструдера и его разборки для переналадки на другой размер сечения канала. Матрица экструдера по патенту РФ № 2245249 предназначена для придания полуфабрикату необходимой формы поперечного сечения с возможностью его изменения без остановки процесса экструдирования.

Функциональные возможности матрицы расширяются тем, что канал фильеры выполнен в патрубке, имеющем упругую оболочку переменного сечения.

На рисунке 7.7 показан разрез матрицы по оси патрубка. На рисунке 6.8 показан вид на обойму с упорами в форме зуба.

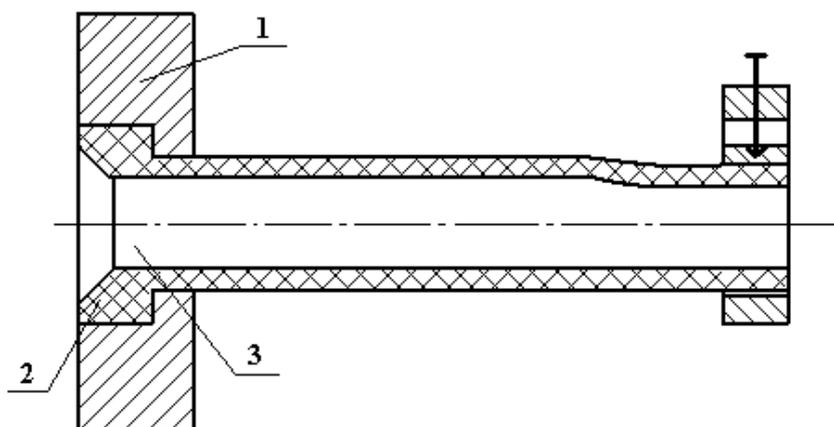


Рисунок 7.7. Схема матрицы с фильерой в упругой оболочке

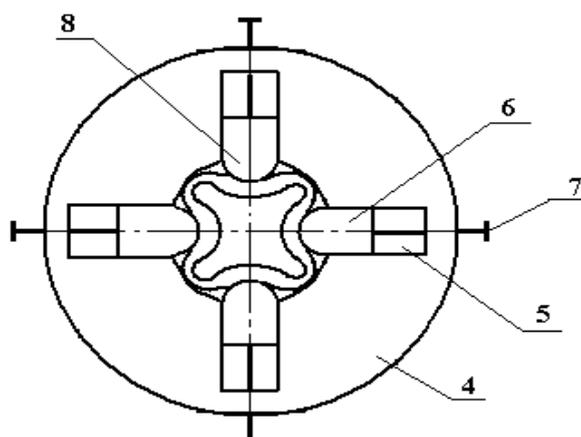


Рисунок 7.8. Обойма с упорами в форме зуба

В корпусе 1 патрубок 2 установлен в гнезде, на дно которого опирается буртиком 3. Конец патрубка помещен в обойме 4, образующей неподвижные упоры, количество и положение которых обеспечивает требуемую форму поперечного сечения выходного отверстия. В направляющих 5 обоймы 4 помещен ползун 6 регулируемого упора, перемещение которого фиксирует установочный винт 7. Зуб 8 на поверхности ползуна 6, контактирующей с патрубком, позволяет получить выпукло-вогнутый профиль выходного сечения.

Матрица работает следующим образом. Запуск экструдера происходит при полностью отведенном в исходное положение регулируемом упоре. При этом выходное сечение патрубка представляет собой круг и имеет максимальную площадь и наименьшее сопротивление. После выхода экструдера на устойчивый режим, регулируемый упор установочным винтом переводят в рабочее положение, которое определено технологическими требованиями к форме и размерам поперечного сечения экструдированного полуфабриката. При экструдировании полуфабриката в форме ленты высота выходного сечения фильеры может быть установлена с учетом компенсации последующей усадки полуфабриката, зависящей от свойств исходного сырья.

В случае закупорки фильеры в процессе работы ее работоспособность восстанавливается без остановки и разборки экструдера. Для этого необходимо отвести регулируемый упор в исходное положение, а после восстановления проходимости фильеры упор возвращают в рабочее положение.

На выходном участке давление в фильере мало, оно достигает в выходном сечении нуля. Это позволяет уменьшить на выходном участке патрубка толщину стенки. При этом повышается ее гибкость, что позволяет более точно выдерживать контур выходного сечения фильеры и использовать более сложную форму этого контура.

Ширина зуба вдоль оси патрубка должна обеспечивать контактные напряжения, исключающие повреждение патрубка, и не позволить патрубку выскользнуть из обоймы.

Если экструдат имеет малую прочность, следует исключить в нем срезающие напряжения. Для этого предложена матрица экструдера для полуфабрикатов малой прочности по патенту РФ № 2240918, придающая полуфабрикату форму тонкой ленты, необходимую для эффективного высушивания полуфабриката потоком воздуха.

Функциональные возможности матрицы расширяются тем, что фильера выполнена в трубке из эластичного материала, загнутой по радиусу вниз, причем выходной конец трубки помещен в регулируемый зажим.

На рисунке 7.9 показан разрез матрицы по оси канала фильеры. Условно не показано крепление зажима и корпуса матрицы к экструдеру.

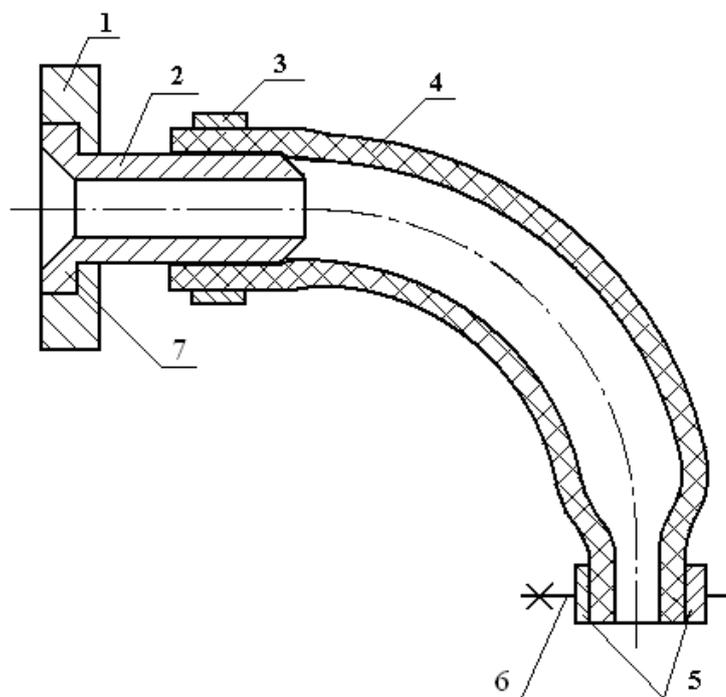


Рисунок 7.9. Схема матрицы с фильерой в упругой оболочке, загнутой по радиусу вниз

На корпусе 1 матрицы выполнен патрубок 2, на котором хомутом 3 закреплена трубка 4. Губки 5 регулируемого зажима связаны резьбовыми соединениями 6. Патрубок 2 выполнен во вставке 7.

Матрица работает следующим образом.

Запуск экструдера происходит при разведенных губках 5 регулируемого зажима. После выхода экструдера на режим губки сдвигают до технологически требуемого зазора.

В случае закупорки фильеры в процессе работы ее работоспособность восстанавливается разведением губок зажима без остановки и разборки экструдера. При этом размер сечения трубки за счет ее упругости восстанавливается. Движение материала в канале фильеры также восстанавливается. После этого губки 5 вновь сдвигают до требуемого зазора.

Трубка из эластичного материала загнута вниз для того, чтобы выходящий из фильеры полуфабрикат находился в однородном напряженном состоянии и был нагружен растягивающими напряжениями. Это позволяет получать ровную ленту полуфабриката и увеличивает возможную длину ленты, поскольку в сечении ленты отсутствуют касательные напряжения.

Выполнение патрубка во вставке обеспечивает технологичность изготовления матрицы для случая, когда в матрице две фильеры или больше.

Трубка, надеваемая на патрубок, может быть выполнена из полимерного материала и армирована стекловолокном для повышения прочности.

Временного увеличения площади поперечного сечения выходного отверстия фильеры можно достичь использованием упругого элемента постоянной или переменной жесткости. Для этого была предложена матрица экструдера по патенту РФ № 2249420, которая предназначена для придания полуфабрикату формы с развитой поверхностью испарения влаги при высушивании полуфабриката воздушным потоком.

Функциональные возможности матрицы расширяются тем, что матрица экструдера, включающая корпус и хотя бы одну фильеру, состоящую из предкамеры и формующего канала, имеет формующий канал и участок перехода от предкамеры к формующему каналу, выполненные в свободно деформируемой упругой оболочке. В одном варианте конструкции по внешнему периметру оболочки на конце формующего канала выполнено ребро жесткости. В другом варианте на внешней поверхности оболочки выполнена полость, имеющая опору на корпус матрицы и нагруженная внутренним давлением. Матрица снабжена устройством измерения деформации оболочки или снабжена устройством для измерения давления в полости.

На рисунке 7.10 показана матрица экструдера с формующим каналом, выполненным в оболочке с ребром жесткости.

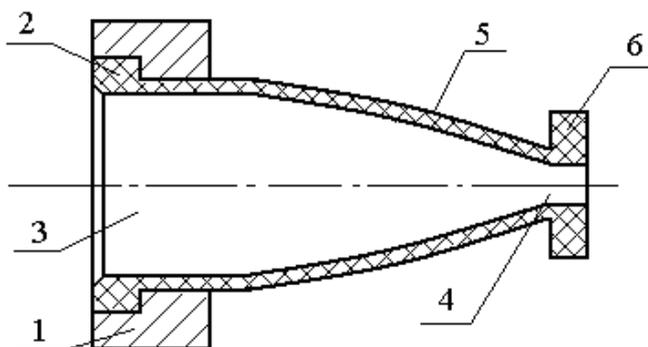


Рисунок 7.10. Схема матрицы с фильерой в упругой оболочке, имеющей ребро жесткости

На рисунке 7.11 показана матрица экструдера с формующим каналом внутри полости оболочки, имеющей опору на корпус матрицы и нагруженной внутренним давлением.

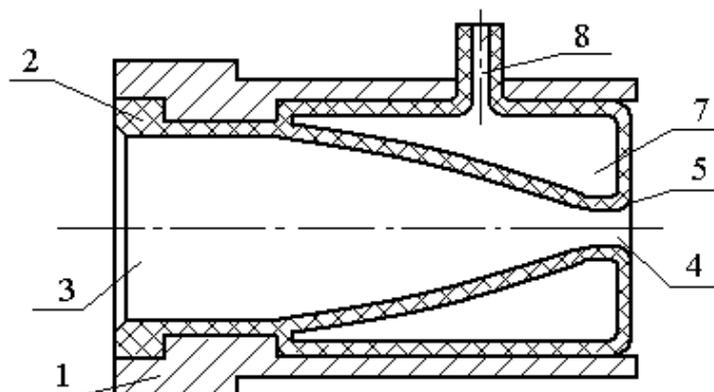


Рисунок 7.11. Схема матрицы с фильерой в упругой оболочке и формующим каналом внутри полости

В корпусе 1 матрицы расположена вставка 2, в которой имеется фильера, включающая предкамеру 3 и формующий канал 4, выполненный в оболочке 5. Оболочка 5 расположена вне корпуса 1 и поэтому жесткость корпуса 1 не препятствует деформации оболочки 5. Предкамера 3 и формующий канал 4 сопряжены участком перехода.

По внешнему периметру оболочки на конце формующего канала может быть выполнено ребро жесткости 6.

На внешней поверхности оболочки 5 может быть выполнена полость 7, имеющая опору на корпус матрицы 1.

Для регулирования давления в полости 7 использован патрубок 8.

При запуске экструдера первая порция материала еще недостаточно разогрета и, как следствие, обладает высокой вязкостью, создавая повышенное давление в области формующего канала 4. При этом оболочка 5 формующего канала упруго деформируется, поперечное сечение формующего канала увеличивается, его сопротивление уменьшается и канал пропускает прессуемый материал, предотвращая забивание матрицы вязким материалом и помпаж.

Максимальный размер поперечного сечения ограничен размером сечения предкамеры 3, что определяет требования к предкамере.

В дальнейшем материал разогревается за счет работы сил трения и экструдер выходит на режим, соответствующий получению полуфабриката оптимального качества. Формующий канал приобретает размеры, соответствующие технологическим требованиям к размеру сечения полуфабриката.

При случайном отклонении свойств экструдированного материала от технологических требований давление прессования может возрасти. Это приведет к увеличению площади поперечного сечения формующего канала. Матрица пропустит порцию некондиционного материала и опять приобретет первоначальную форму после возвращения свойств экструдированного материала к допустимым по технологическим требованиям.

Таким образом, предотвращается закупорка фильеры при запуске экструдера и в ходе его работы.

Ребро жесткости 6 служит для уменьшения податливости стенок оболочки формующего канала, если требуется выдерживать размеры поперечного сечения экструдата при повышенном давлении экструдирования.

Использование ребра жесткости выгодней увеличения толщины всей оболочки, поскольку уменьшает габариты вставки.

Помещение формующего канала в полость 7, нагруженную внутренним давлением, позволяет регулировать податливость оболочки формующего канала в процессе работы экструдера. Поэтому управление давлением в процессе

экструдирования через патрубок 8 позволяет управлять технологическим режимом экструдирования, в частности задавать размеры сечения экструдата.

Измеряя деформацию оболочки или давление в полости, можно оценивать эффективность процесса экструдирования и качество полученного полуфабриката и использовать эти данные в системе управления экструдером.

Таким образом, данная конструкция матрицы позволяет повысить надежность экструдера и качество выпускаемой продукции.

7.3. Экструдеры высоковлажных полуфабрикатов

Кормосмеси и компоненты комбикорма из сырья высокой влажности могут быть высушены в экструдере в процессе экструдирования.

Это достигается тем, что экструдер по патенту РФ № 2243098 имеет корпус с матрицей и шнек с лопастями, разделенный образованными шайбой и кольцом компрессионными затворами, последний из которых на конце шнека. Шнек между компрессионными затворами имеет участок с несплошными лопастями и участок со сплошными лопастями, причем участок со сплошными лопастями размещен после участка с несплошными лопастями в направлении к матрице.

Гидравлический радиус полости каждого последующего компрессионного затвора в этом же направлении увеличивается.

В верхней части корпуса над каждым участком с несплошными лопастями размещен штуцер с клапаном.

Поверхность корпуса покрыта слоем теплопроводящего материала, который покрыт слоем теплоизоляционного материала.

Осевая протяженность каждого последующего компрессионного затвора по направлению к матрице уменьшается.

На рисунке 7.12 показан разрез прессующего механизма экструдера.

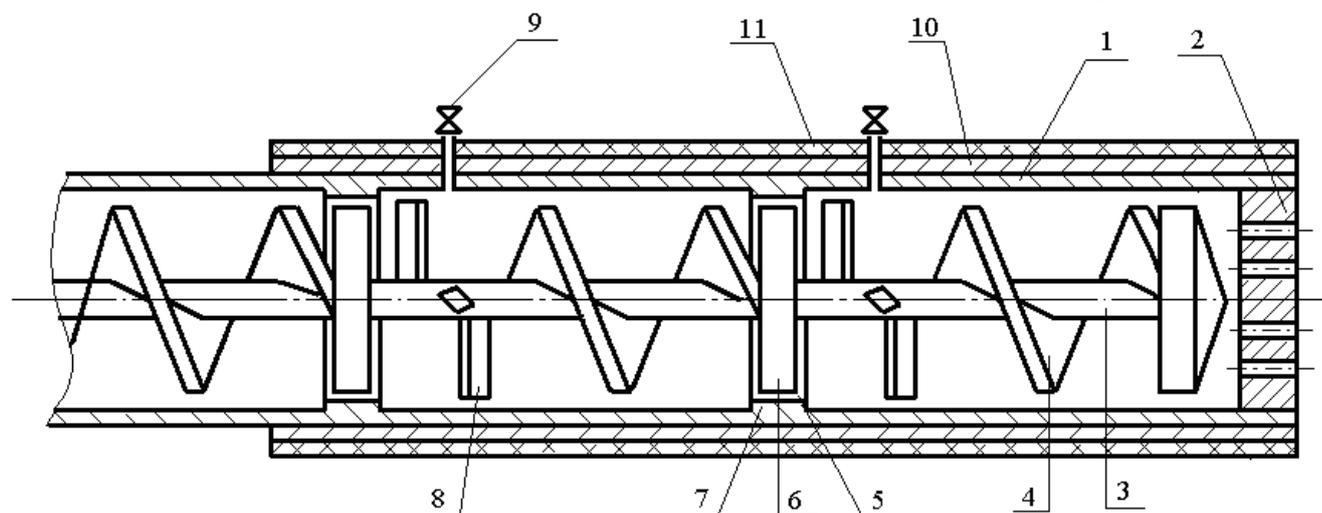


Рисунок 7.12. Схема прессующего механизма экструдера

В корпусе 1, на конце которого закреплена матрица 2, установлен шнек 3 со сплошной лопастью 4, на котором установлены компрессионные затворы с полостью 5, образованной компрессионной шайбой 6 и компрессионным кольцом 7. На участке шнека выполнены несплошные лопасти 8.

Над участком с несплошными лопастями размещены штуцеры с клапанами 9. На корпусе 1 укреплен слой теплопроводящего материала 10, на который установлен теплоизоляционный слой 11.

Экструдер работает следующим образом. Экструдлируемый материал попадает в полость 5 компрессионного затвора, где разогревается в тонком слое от нагретых поверхностей компрессионной шайбы 6 и компрессионного кольца 7. Выйдя из полости компрессионного затвора в виде тонкой ленты материал попадает на участок шнека с несплошными лопастями 8. Поскольку лопасти несплошные, то на этом участке материал не прессуется. Это позволяет влаге испаряться со свободной поверхности ленты материала в пространство на участке с несплошными лопастями 8. Скопившийся пар удаляется из корпуса 1, преодолевая сопротивления клапана на штуцере 9. Клапан предотвращает попадание в корпус холодного воздуха. Несплошные лопасти 8 транспортируют материал на участок со сплошными лопастями 4, где происходит его прессование и выдавливание через полость 5 следующего компрессионного затвора, где происходит дальнейший разогрев материала и удаление пара из корпуса. Сопротивление течению материала через последующую полость компрессионного затвора меньше, поскольку гидравлический радиус полости больше. Поэтому каждый последующий участок шнека может обеспечить большую производительность прессующего механизма, чем предыдущий. Это обеспечивает требуемый разрыв сплошности экструдлируемого материала. Если обеспечивается требуемый в полости компрессионного затвора нагрев материала, осевая протяженность каждого последующего компрессионного затвора может быть уменьшена, что обеспечит дополнительное уменьшение сопротивления полости, ведущее к нарушению сплошности потока на участке с несплошными лопастями.

Для эффективного нагрева компрессионных колец 7 наружная поверхность корпуса покрыта слоем теплопроводящего материала 10, передающего тепло от компрессионного затвора на конце шнека, где выделяется наибольшее количество тепла другим компрессионным затворам. Для предотвращения непроизводительных потерь тепла в атмосферу корпус снаружи покрыт слоем теплоизоляционного материала 11.

Описанная конструкция экструдера позволяет высушивать и экструдировать в варочном и горячем режимах высоковлажные материалы, стерилизуя их, не вводя дополнительной операции предварительной сушки и не затрачивая дополнительной энергии.

Экструдер для утилизации высоковлажных продуктов по патенту РФ № 2251365 позволяет вводить в экструдат дисперсионную среду высоковлажных отходов непосредственно в экструдере.

Это достигается тем, что в экструдере, непосредственно перед насадкой «торпедо» выполнен компрессионный затвор, а сразу после компрессионного затвора выполнено устройство ввода жидкого компонента. Устройство для ввода жидкого компонента выполнено в виде, по крайней мере, одного штуцера в шнековом корпусе. Устройство для ввода жидкого компонента выполнено в виде хотя бы одного установочного винта в корпусе шнека, в стержне которого выполнен сквозной канал.

На рисунке 7.13 изображен экструдер предлагаемой конструкции с устройством для ввода жидкого компонента в виде штуцера в шнековом корпусе.

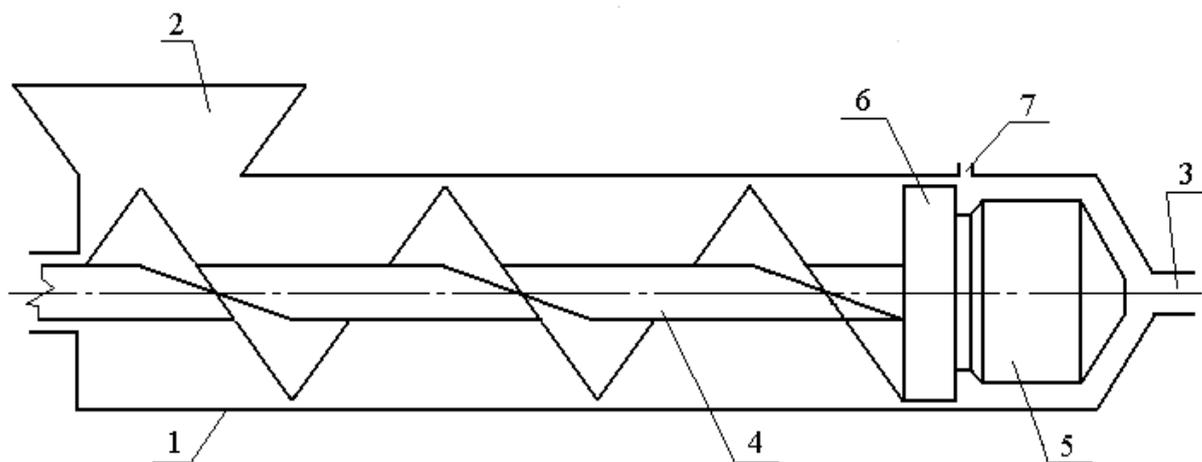


Рисунок 7.13. Схема экструдера

На рисунке 7.14 показан поперечный разрез экструдера по оси установочного винта, в стержне которого выполнен сквозной канал.

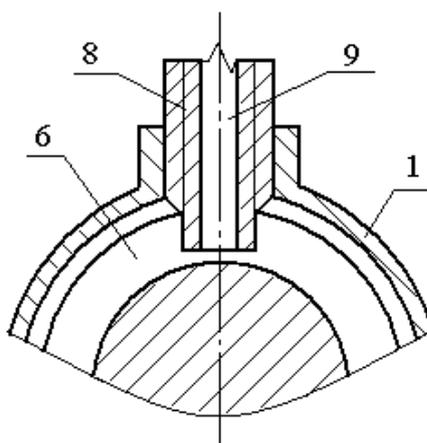


Рисунок 7.14. Штуцер с осевым каналом

На рисунке 7.15 показан поперечный разрез по оси установочного винта с выходным отверстием на боковой поверхности стержня винта (направление вращения шнека показано стрелкой).

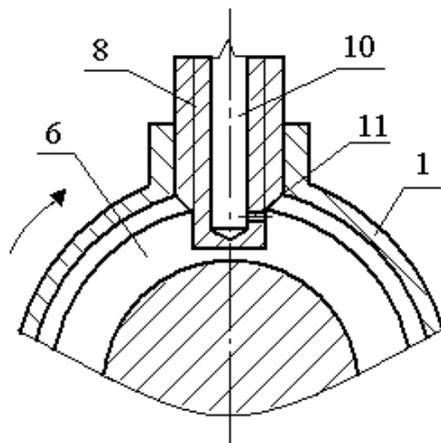


Рисунок 7.15. Штуцер с отверстием на боковой поверхности

Экструдер содержит цилиндрический шнековый корпус 1, который имеет загрузочное устройство 2 и матрицу 3. На конце шнека 4 установлена насадка «торпедо» 5, перед которой установлен компрессионный затвор 6. Между компрессионным затвором и насадкой «торпедо» выполнен штуцер 7.

В корпусе 1 в резьбовом соединении укреплен установочный винт 8, вдоль оси которого выполнен сквозной канал 9, либо канал с боковым выходным отверстием 11.

Полуфабрикат, увлажненный до оптимальной величины по технологическим требованиям, через загрузочную воронку 2 поступает в шнековый корпус 1 и транспортируется к матрице 3. На своем пути полуфабрикат экструдирован через компрессионный затвор 6.

После компрессионного затвора в полуфабрикат через штуцер 7 под давлением вводится жидкий компонент. Расход жидкого компонента обеспечивает конечную влажность полуфабриката в пределах, обеспечивающих устойчивую форму экструдата.

Насадка «торпедо» 5, предназначенная для смешения компонентов экструдата, равномерно распределяет жидкий компонент в полуфабрикate, что обеспечивает его качество на выходе из матрицы. Компрессионный затвор 6 предотвращает попадание жидкого компонента в канал шнека и гарантирует устойчивый режим экструдирования с заданной производительностью.

Применение нескольких точек ввода жидкого компонента повышает равномерность его распределения в экструдированном полуфабрикate.

Расположение устройства ввода жидкого компонента в полуфабрикат в установочном винте позволяет изменять место ввода компонента по радиусу

канала, в котором движется полуфабрикат. Это также повышает равномерность ввода жидкого компонента в экструдат.

Расположение выходного отверстия 11 на боковой поверхности стержня винта, ориентированным в окружном направлении в сторону вращения шнека, предотвращает забивание материалом отверстий 11.

Для лучшего перемешивания водных суспензий с кормом предложен экструдер по патенту РФ № 2266677, в котором суспензия вводится в экструдат в шнековом канале, что дает возможность экструдирования высоковлажных продуктов (с относительной влажностью до 70%).

Это достигается тем, что суспензию предварительно разделяют на дисперсную фазу и дисперсионную среду, дисперсную фазу вводят в корм до экструдирования, а дисперсионную среду в процессе экструдирования.

Экструдер имеет цилиндрический шнековый корпус, оканчивающийся матрицей, и шнек со стержнем и хотя бы одной винтовой лопастью.

Внутри стержня имеется полость, соединенная с каналами подвода и отвода жидкости. В стержне шнека, выполнено хотя бы одно отверстие, соединяющее полость с внешней поверхностью стержня шнека.

Отверстие на поверхности стержня шнека заканчивается прорезью, ориентированной поперек оси шнека, и расположенной от отверстия в направлении, противоположном направлению вращения шнека. Канал отвода жидкости может быть снабжен перепускным клапаном. Отверстие, соединяющее полость с внешней поверхностью стержня шнека, может быть выполнено в сменной резьбовой пробке.

После экструдирования полуфабрикат охлаждают и высушивают в слое, пронизываемом потоком воздуха.

Экструдер для ввода водных суспензий в корма показан на рисунке 7.16.

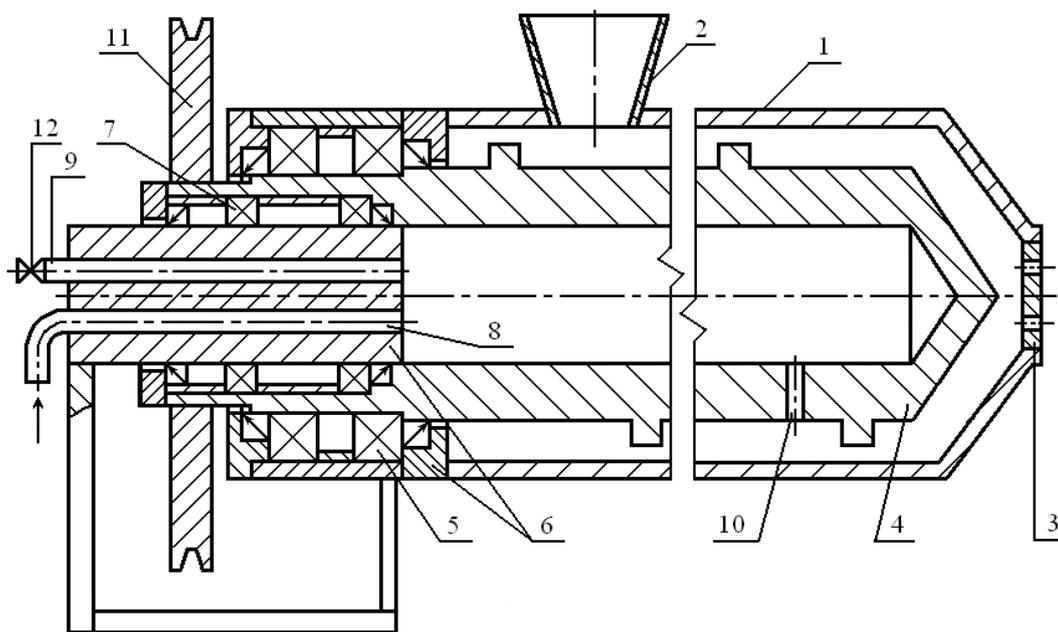


Рисунок 7.16. Схема экструдера

На рисунке 7.17 показан поперечный разрез стержня шнека в месте расположения отверстия, заканчивающегося на внешней поверхности стержня шнека щелью.

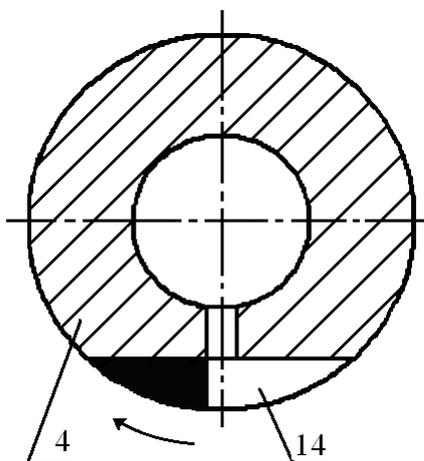


Рисунок 7.17. Поперечный разрез стержня шнека

На рисунке 7.18 показан поперечный разрез шнека в месте расположения отверстия, соединяющего полость с наружной поверхностью стержня шнека при выполнении его в сменной резьбовой пробке.

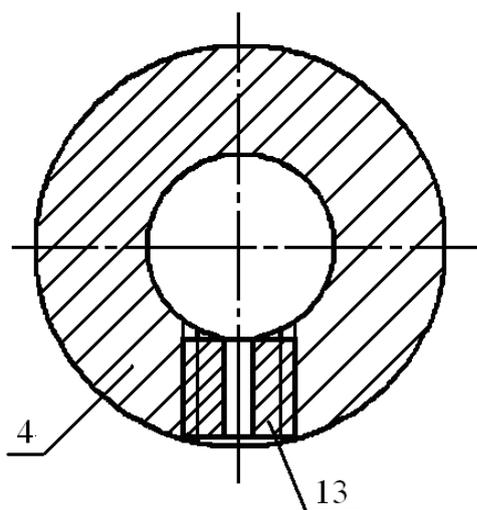


Рисунок 7.18. Поперечный разрез шнека

Экструдер содержит цилиндрический шнековый корпус 1 с загрузочной воронкой 2. Корпус заканчивается матрицей 3 для формования полуфабриката. Внутри корпуса расположен шнек 4 со стержнем и винтовой лопастью, который закреплен в подшипниковой опоре 5 и имеет полость. Полость герметизирует втулка 6, установленная в подшипниках 7. Во втулке выполнен подводный канал 8 и

отводящий канал 9. Стержень шнека имеет отверстия 10, соединяющие полость и наружную поверхность стержня шнека. Вращение шнека осуществляется от закрепленного на нем шкива 11. Втулка 6 соединена со стойкой для предотвращения ее проворачивания. Отводящий канал 9 снабжен перепускным клапаном 12. Отверстия 10 выполнены в сменных резьбовых пробках 13. Отверстия 10 заканчиваются прорезью 14.

В предварительно измельченный для повышения однородности смешения корм вводят дисперсную фазу водной суспензии, предварительно отделенную от дисперсионной среды. Отделение дисперсионной среды, составляющей более 80 % общей массы водной суспензии, производится декантацией (отстаиванием) дисперсной фазы при медленном движении в потоке с последующим отбором дисперсионной среды из потока. После разделения дисперсионная среда представляет собой жидкость, не содержащую твердых частиц. С другой стороны, образуется концентрированная дисперсная фаза, состоящая, в основном, из твердых частиц. В предварительно измельченный для повышения однородности смешения корм вводят дисперсную фазу водной суспензии, предварительно отделенную от дисперсионной среды. Затем корм, увлажненный до оптимальной влажности, через загрузочную воронку 2 поступает в шнековый корпус 1 и транспортируется к матрице 3. За счет сопротивления матрицы полуфабрикат уплотняется. Образуется вязкая «гайка» из экструдированного полуфабриката, взаимодействие которой со шнековым корпусом и шнеком позволяет создавать давление, достаточное для экструдирования полуфабриката с требуемой производительностью. Через отверстия 10 в экструдированный материал вводят дисперсионную среду.

При дальнейшем движении по каналу шнека дисперсионная среда смешивается с кормом. При этом влажность корма может быть доведена до предельной, при которой происходит формообразование (60 ... 70 %).

Полуфабрикат экструдирован через матрицу 3 и приобретает форму, пригодную для дальнейшей обработки.

Расход дисперсионной среды связан с подачей корма в загрузочную воронку и обеспечивается давлением в полости, которое регулируется перепускным клапаном 12.

Если предполагается использование суспензии с дисперсионной средой различной вязкости, отверстия 10 изготавливают в резьбовых пробках 13. Это позволяет использовать различные диаметры отверстий 10, регулируя тем самым расход дисперсионной среды изменением сопротивления отверстия.

Щель 14 между поверхностью стержня шнека и отверстием 10 предотвращает забивание отверстий перерабатываемым материалом и обеспечивает свободный доступ дисперсионной среды к перерабатываемому материалу, увеличивая площадь контакта дисперсионной среды с материалом. Расположение щели 14 относительно отверстия 10 в направлении, противоположном направлению вращения,

предотвращает забивание экструдиремым материалом отверстий в месте их соединения со щелью, поскольку выходное сечение отверстия защищено стенкой щели.

Такой способ ввода водной суспензии в корм позволяет довести влажность полуфабриката до предельной, при которой происходит формообразование без снижения производительности экструдера.

Щелевая фильера позволяет получить полуфабрикат с большой площадью поверхности относительно его объема. Такая форма увеличивает площадь испарения, что ускоряет удаление влаги. Затем экструдат высушивается потоком воздуха в помещении до равновесной влажности 10 ... 12 %.

Таким образом, ввод дисперсной фазы водной эмульсии в корм до экструдирования, а дисперсионной среды в процессе экструдирования позволяют повысить влажность полуфабриката, направляемого на сушку, и, как следствие, увеличить количество вводимой в корм водной суспензии.

Получение высоковлажных полуфабрикатов, отформованных через щелевую фильеру, и затем их сушка воздухом позволяют сохранить в полуфабрикате питательные вещества и витамины и увеличить срок хранения полуфабриката.

Уменьшения нежелательного разложения входящих в продукт химических соединений при нагреве в экструдере можно добиться уменьшением времени воздействия температуры, продувая через слой продукта воздухом окружающей среды. Интенсификации процесса сушки можно добиться, продувая через слой продукта нагретый воздух.

Использование данного способа ввода водных суспензий в корма, по сравнению с известными имеет следующие преимущества:

- увеличение количества вводимой суспензии в корм;
- экструдирование смеси через щелевую фильеру позволит получить быстросохнувший полуфабрикат с большой площадью поверхности, что ускоряет удаление избыточной влаги без потери сухого вещества с последующим получением долго хранящегося продукта.

Для расширения технологических возможностей процесса экструдирования предложен экструдер двойного экструдирования, который защищен патентом РФ № 2261031.

В его шнековом корпусе расположены два шнека. Шнек первой ступени расположен на участке шнекового корпуса, в начале которого выполнено загрузочное устройство, а в конце – промежуточная матрица, привод этого шнека выполнен со стороны загрузочного устройства.

После промежуточной матрицы в шнековом корпусе, который заканчивается головкой с матрицей, размещен шнек второй ступени. Он имеет привод со стороны головки с матрицей.

Промежуточная матрица выполнена в виде установленных с возможностью относительного вращения и имеющих идентичные фильеры двух пластин - неподвижной, которая установлена в корпусе, зафиксирована шпонкой и имеет шип, и подвижной - закрепленной на шипе и имеющей ручку, установленную в пазу.

После промежуточной матрицы в шнековом корпусе выполнено, по крайней мере, одно отверстие.

Экструдер двойного экструдирования изображен на рисунке 7.19.

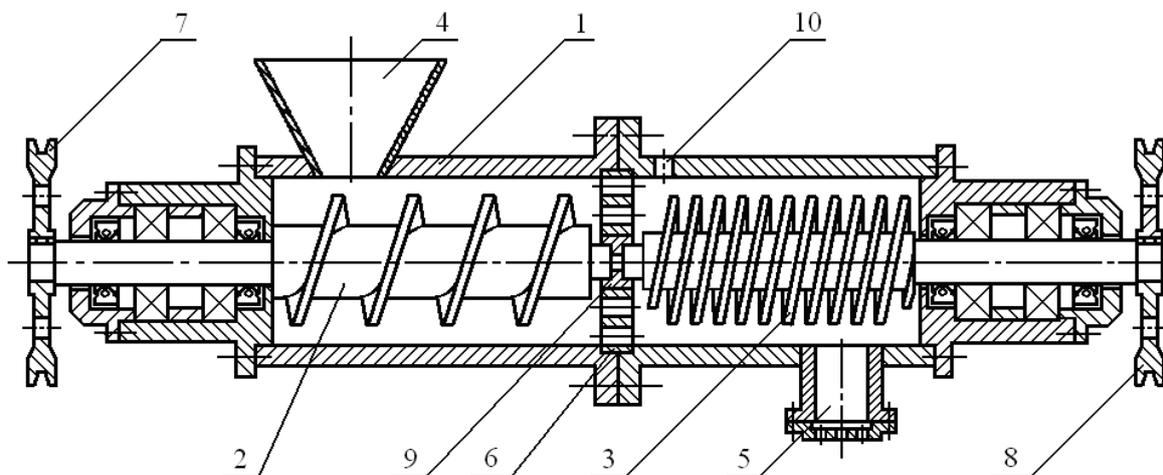


Рисунок 7.19. Схема экструдера

На рисунке 7.20 изображена промежуточная матрица.

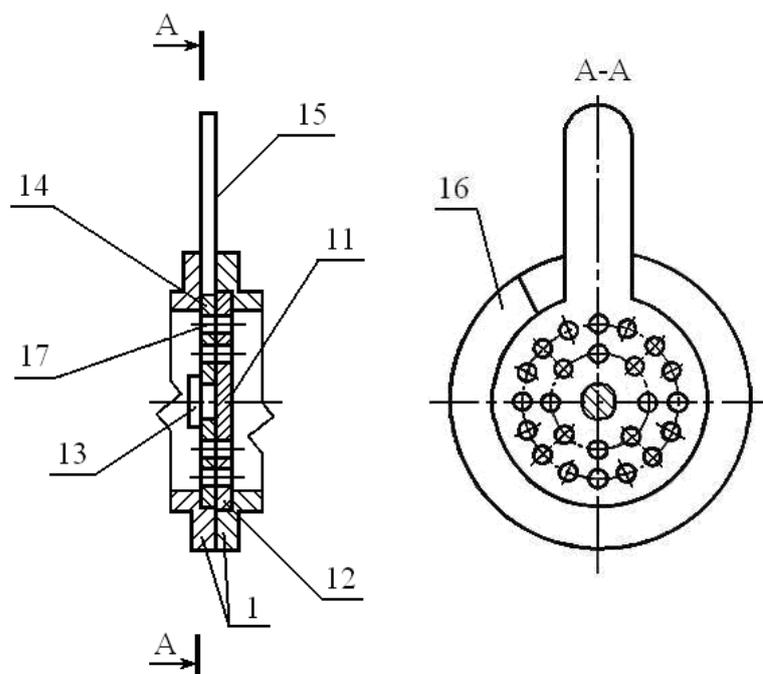


Рисунок 7.20. Промежуточная матрица

Экструдер содержит шнековый корпус 1, шнек первой ступени 2 и шнек второй ступени 3, загрузочное устройство 4, головку с матрицей 5 и промежуточную матрицу

6. Шнек 2 имеет привод 7, а шнек второй ступени 3 имеет привод 8. Шнеки могут опираться на подшипник 9, установленный в промежуточной матрице 6. В корпусе 1 может быть выполнено, по крайней мере, одно отверстие 10. Промежуточная матрица может быть составлена из двух пластин. Неподвижная пластина 11 установлена в корпусе 1 по посадке и зафиксирована от проворачивания шпонкой 12. Неподвижная пластина имеет шип 13, на котором установлена подвижная пластина 14. Пластина 14 имеет ручку 15, помещенную в пазу 16. В пластинах 11 и 14 выполнены фильеры 17, которые совпадают при определенном положении ручки 15 в пазу 16.

Полуфабрикат, предварительно смешанный с водой, через загрузочное устройство 4 поступает в шнековый корпус 1, где шнек 2 производит его предварительную обработку. Интенсивность и продолжительность обработки регулируют угловая скорость шнека 2 и положение пластин 11 и 14 промежуточной матрицы 6 с различным сопротивлением каналов фильер 17. При этом полуфабрикат смешивается и разогревается. Смешанный полуфабрикат при прохождении через отверстия промежуточной матрицы 6 дополнительно гомогенизируется и подается на шнек второй ступени 3, где происходит уплотнение и выпрессовывание через фильеры матрицы в головке 5.

Регулирование величины давления прессования происходит за счет изменения угловой скорости шнека второй ступени 3.

Отверстия 10 могут быть использованы для добавления жидких компонентов для их смешения с полуфабрикатом в шнеке второй ступени 3 и последующего экструдирования через матрицу в головке 5.

Изменение живого сечения промежуточной матрицы 6 за счет поворота пластины 14 ручкой 15 относительно неподвижной пластины 11 позволяет регулировать температурный режим процесса экструдирования и степень смешения экструдированного полуфабриката.

Предлагаемая конструкция экструдера позволяет интенсифицировать процесс смешения полуфабриката и отказаться от использования специальных смесителей. Подбирая частоту вращения шнеков 2 и 3, можно добиться возникновения пустого пространства после промежуточной матрицы 6.

Вакуумируя это пространство через отверстие 10, можно повысить качество вырабатываемых изделий.

Экструдировав прессуемый материал в шнеке первой ступени в горячем режиме, можно производить стерилизацию экструдированного материала с последующим отводом образовавшегося пара и добавлением жидких компонентов, содержащих вещества, разлагающиеся при высоких температурах.

Предлагаемая конструкция позволяет добавлять в экструдированные зерновые отходы пивную дробину или спиртовую барду до получения высоковлажного экструдата с относительной влажностью до 70%.

8. Расчет режимов и оценка эффективности предложенной технологии

8.1. Порядок расчета технологического оборудования

Основные операции, определяющие технологию утилизации высоковлажных отходов пищевых производств, включают процессы экструдирования увлажнения и конвективной сушки.

На основании схемы получения кормового продукта из отходов бродильного производства и зерновых отходов, показанной сплошными линиями, (рисунок 3.3), определены требования к производительности оборудования по отношению к производительности линии по утилизируемым отходам .

Для процесса экструдирования (рисунок 8.1), следует задаться размерами поперечного сечения экструдата и влажностью экструдата.

Зависимости для плотности и реологических параметров экструдруемого материала (6.75) ... (6.80), толщины слоя проскальзывания (6.81), (6.82) и коэффициента отклонения формы канала фильеры от цилиндрической (6.83) идентифицируют математическую модель процесса экструдирования, изложенную в параграфе 6.1.

Из математической модели можно определить необходимую геометрию рабочего пространства экструдера, угловую скорость шнека и температуру экструдата, а также необходимую мощность установленного электродвигателя экструдера.

Температурный режим процесса экструдирования определяется с учетом уравнения (6.83) по итерационному алгоритму.

Для процесса увлажнения (рисунок 8.1) необходимо задать начальную влажность полуфабриката W_0 .

Предельную влажность W_p , исходя из наличия необходимого количества дисперсионной среды, целесообразно задать величиной 70 %.

В результате расчетов определяется время увлажнения экструдата дисперсионной средой. Это позволяет рассчитывать параметры увлажнителя.

Для процесса конвективной сушки (рисунок 8.1) необходимо задать начальную влажность полуфабриката W_{k1}^c и равновесную влажность W_p^c , обеспечивающую длительное хранение продукта.

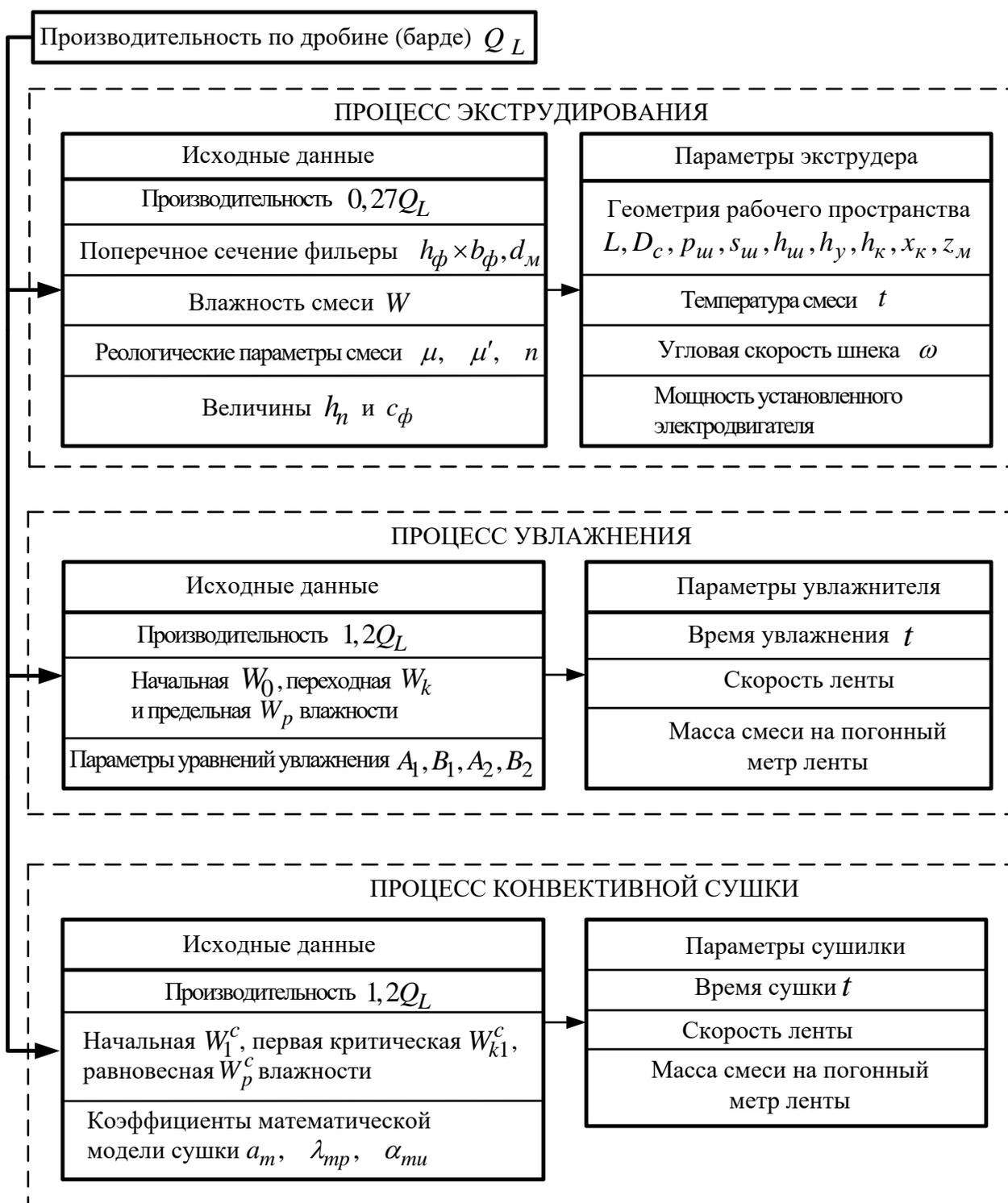


Рисунок 8.1. Схема порядка расчета технологического оборудования.

Из схемы выбора параметров оборудования можно сделать заключение, что имеется достаточно информации для проектирования оборудования предлагаемой технологии или его выбора из существующих изделий.

8.2. Расчет количественного распределения исходных сырьевых компонентов в готовой продукции и отходах

8.2.1. Общие зависимости баланса сухих веществ и воды

Исходные данные для расчета включают качественные и количественные показатели сырья, технологическую схему или операторную модель процесса, ассортимент выпускаемой продукции, нормы потерь различного вида и их качественную характеристику.

Технологический процесс производства любой продукции фактически заключается в перераспределении сухих веществ и влаги, а также в частичном преобразовании их в другие компоненты.

Определение количества сухих веществ, содержащегося в i -ом исходном компоненте, B_{Ci} производится по формуле

$$B_{Ci} = V_i \frac{100 - W_i}{100}, \quad (8.1)$$

где V_i – норма расхода i -го компонента сырья на единицу продукции, кг;

W_i – влажность i -го компонента сырья, %.

Количество влаги, содержащееся в i -ом исходном компоненте, B_i определяется по формуле

$$B_i = V_i - B_{Ci}. \quad (8.2)$$

При объединении компонентов (приготовление сусла, внесение в сусло хмеля и т.д.) подсчитываются отдельно суммы: $\sum V_i$, $\sum B_{Ci}$, $\sum B_i$.

При отделении от смеси j -го отхода в количестве V_j^o с влажностью W_j^o в нем определяются следующие параметры:

- количество сухих веществ

$$B_{Cj}^o = V_j^o \frac{100 - W_j^o}{100}; \quad (8.3)$$

- количество воды

$$B_j^o = V_j^o - B_{Cj}^o. \quad (8.4)$$

Количество сухих веществ B_{Cij}^o , отделенное от i -го компонента смеси, определяется по формуле

$$B_{Cij}^o = \beta_i B_{Cj}^o, \quad (8.5)$$

где $\beta_i = \frac{V_i}{\sum V_i}$ – массовая доля i -го компонента смеси.

Количество перешедшего из смеси в j -ый отход i -го компонента V_{ij}^o определяется по формуле

$$V_{ij}^o = \frac{100B_{Cij}^o}{100 - W_j^o}. \quad (8.6)$$

Количество влаги i -го компонента, перешедшего из смеси в j -ый отход B_{ij}^o , составляет

$$B_{ij}^o = V_{ij}^o - B_{Cij}^o. \quad (8.7)$$

Количество полуфабриката $\Sigma V_i'$, влаги $\Sigma B_{Ci}'$ и сухих веществ $\Sigma B_i'$ в нем после отделения отхода определяется по формулам

$$\Sigma V_i' = \Sigma V_i - V_{ij}^o; \quad (8.8)$$

$$\Sigma B_{Ci}' = \Sigma B_{Ci} - B_{Cij}^o; \quad (8.9)$$

$$\Sigma B_i' = \Sigma B_i - B_{ij}^o. \quad (8.10)$$

Расчет сводится к последовательному добавлению количеств ингредиентов и отнятию количеств отходов согласно технологии производства вплоть до получения готовой продукции.

8.2.2. Расчет баланса сухих веществ и воды при производстве пива

Рассмотрим два варианта технологии производства пива в рамках одной технологической линии.

Первый до внедрения предлагаемой технологии, когда жидкие отходы реализуются непосредственно потребителю.

Второй после внедрения этой технологии, когда солодовая дробина смешивается с отходами при полировке солода и с измельченными зерновыми отходами, экструдирована и высушивается.

Расчет производится на 1 дал товарного пива.

Количество сухих веществ B_{Ci} и влаги B_i , содержащихся в солоде, ячмене и хмеле, определяем соответственно по формулам (8.1) и (8.2).

Количество сухих веществ и влаги в отходах всех видов определяем по формулам (8.3) и (8.4).

Технология производства пива изображена операторной моделью, представленной на рисунке 8.2.

Расшифровка обозначений процессов, использованных в этой операторной модели, приведена в таблице 8.1.

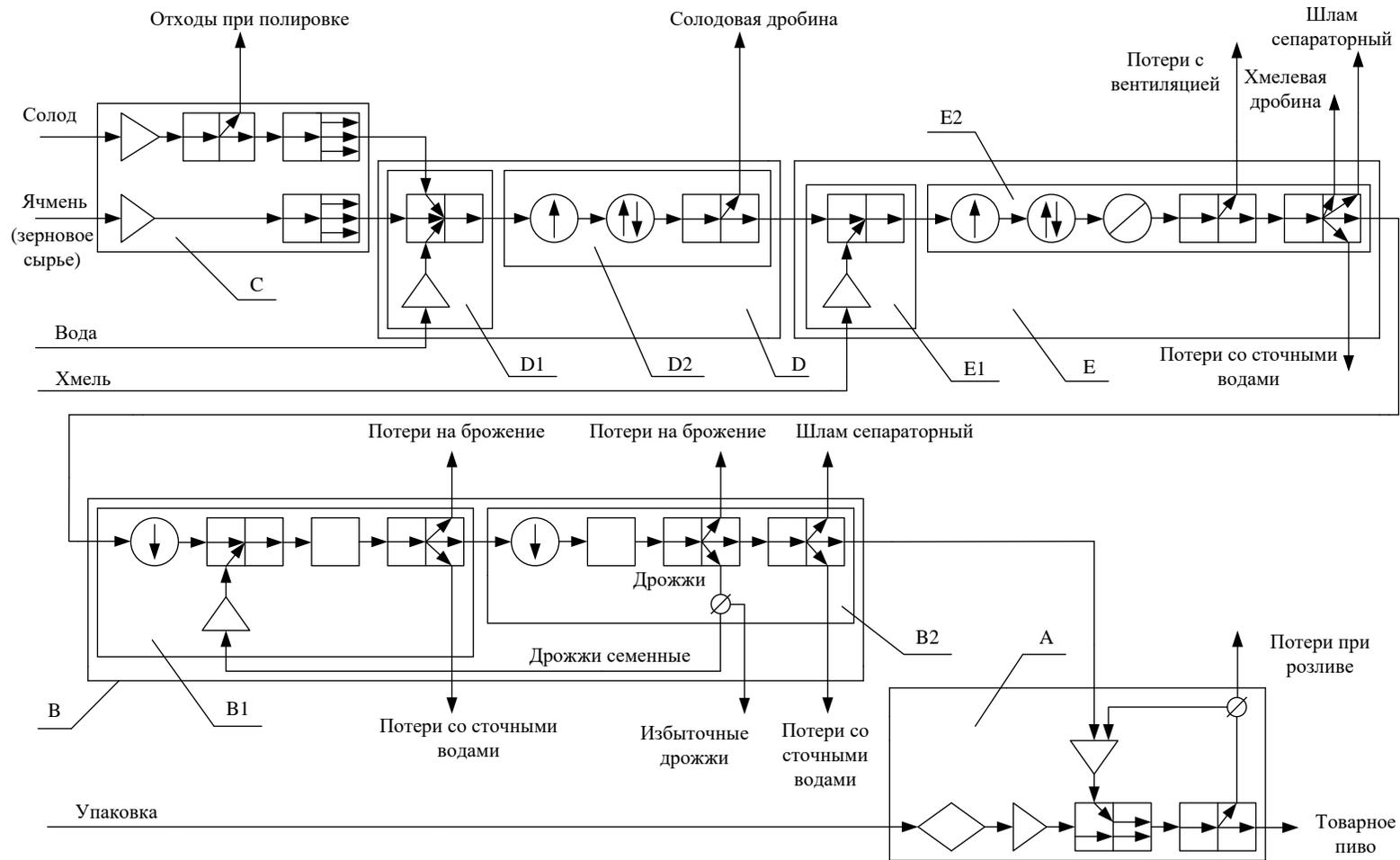


Рисунок 8.2. Операторная модель производства традиционных сортов пива:

А – подсистема формирования товарного пива; В – подсистема сбраживания и осветления пивного сусла; В1 – блок главного брожения пивного сусла; В2 – блок дображивания и осветления; С – подсистема подготовки зернового сырья; D – подсистема подготовки пивного сусла; D1 – блок затирания сусла; D2 – блок соложения сусла; E – подсистема охмеления сусла; E1 – блок введения хмеля в сусло; E2 – блок кипячения сусла с хмелем.

Таблица 8.1

Расшифровка обозначений операторной модели.

Содержание операции	Обозначение
Измельчение	
Экструдирование	
Разделение (отделение)	
Смещение без сохранения поверхности раздела	
Смещение с сохранением поверхности раздела	
Сложный процесс (в данном случае брожение)	
Ориентирование	
Дозирование	
Нагревание	
Охлаждение	
Термостатирование	
Изменение агрегатного состояния	
Изменение направления потока (трехходовой кран)	

В соответствии с операторной моделью первоначально от солода отделяются отходы при полировке (подсистема С).

Количество сухих веществ, отделенное от солода, определяется по формуле (8.5).

Количество солода, перешедшего в отходы при полировке, определяется по формуле (8.6).

Количество влаги, перешедшей в отходы при полировке из солода, определяется по формуле (8.7).

Количество солода после полировки, содержание влаги и сухих веществ в нем определяется по формулам (8.8), (8.9), (8.10).

Далее происходит приготовление исходного сусла (блок D1).

Количество воды, необходимое для приготовления сусла, V_4 находится по формуле

$$V_4 = \frac{\sum V_i (W_{исх.сусла} - W_i)}{100 - W_{исх.сусла}},$$

где V_i , W_i – соответственно количество и влажность компонентов, входящих в сусло, кроме воды.

Количество сточных вод $V_{ст.вод}$ вычисляется по формуле

$$V_{ст.вод} = V_{н.в.} \frac{100 - W_{ст.вод}}{100}.$$

где $V_{н.в.}$ – объем промывных вод,

$$V_{н.в.} = V_{\epsilon} - V_4;$$

V_{ϵ} – общий объем воды, расходуемый на производства 1 дал пива;

V_4 – количество воды, необходимое для приготовления исходного сусла;

$W_{ст.вод}$ – массовая доля воды в сточных водах.

Количество сусла, содержание сухих веществ и воды в нем подсчитывается путем определения сумм ΣV_i , ΣB_{Ci} , ΣB_i .

При отделении солодовой дробины (блок D2) количество сухих веществ, отделенное от солода и ячменя, определяется по формуле (8.5).

Количество солода и ячменя, перешедшего в солодовую дробину, определяется по формуле (8.6).

Количество влаги, перешедшей в солодовую дробину из солода и ячменя, определяется по формуле (8.7).

Количество солода и ячменя, влаги и сухих веществ в них после отделения солодовой дробины определяем по формулам (8.8), (8.9) и (8.10).

Подсчитываются суммы ΣV_i , ΣB_{Ci} , ΣB_i после отделения солодовой дробины.

Далее производится охмеление сусла (подсистема E).

Количество сусла, сухих веществ и воды в нем после внесения хмеля (блок E1), подсчитываются путем прибавления к суммам ΣV_i , ΣB_{Ci} и ΣB_i соответствующих количеств хмеля.

При отделении хмелевой дробины (блок E2) сухие вещества отделяются только от хмеля, так как все остальные нерастворенные в сусле сухие вещества уже отделены. Количество сухих веществ, отделенных от хмеля, определяем по формуле (8.5). Величина коэффициента β_i принимается равной единице.

Количество хмеля, перешедшего в хмелевую дробину, определяется по формуле (8.6). Количество влаги, перешедшей в хмелевую дробину из хмеля, определяется по формуле (8.7).

Количество хмеля, влаги и сухих веществ в нем после отделения хмелевой дробины, влаги и сухих веществ в нем определяется по формулам (8.8), (8.9), (8.10).

Подсчитываем суммы ΣV_i , ΣB_{Ci} , ΣB_i после отделения хмелевой дробины.

Все остальные виды потерь (см. рисунок 10.2), кроме потерь при розливе и отделении избыточных дрожжей, целесообразно учитывать один раз, отделяя (условно) их от сусла после охмеления.

Например, при отделении шлама сепараторного количество сухих веществ, отделенное от солода, ячменя и хмеля, определяется по формуле (8.5).

Количество солода, ячменя и хмеля, перешедшего в шлам сепараторный, определяется по формуле (8.6).

Количество влаги, перешедшей в шлам сепараторный из солода, ячменя и хмеля, определяется по формуле (8.7).

При этом количество хмеля, солода и ячменя определяется по формулам (8.8), (8.9), (8.10), с последующим подсчетом сумм ΣV_i , ΣB_{Ci} , ΣB_i .

При отделении сточных вод общее количество сухих веществ, уносимых со сточными водами, $B_{C_{ст.в}}$ находится по формуле

$$B_{C_{ст.в}} = V_{ст.в} - V_{п.в.}$$

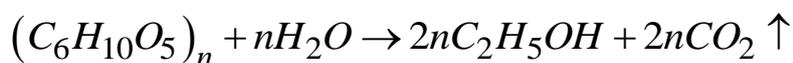
Уточненное количество сточных вод $V'_{ст.в.}$ находится по формуле

$$V'_{ст.в.} = V_{ст.в.} + \Sigma V_{i_{ст.в.}}^o \cdot \frac{W_i}{100},$$

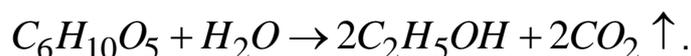
где $V_{i_{ст.в.}}^o$, W_i – количество и влажность компонентов сырья (кроме воды), уносимых со сточными водами.

Расчет потерь с вентиляцией аналогичен расчету потерь со шламом сепараторным.

При учете потерь на брожение величина потерь определяется по количеству выделившегося в процессе брожения диоксида углерода. Брожение происходит по обобщенному уравнению



или



При этом выделяется спирт, который обычно условно присоединяется к сухим веществам, расходуется вода и выделяется диоксид углерода.

Количество выделившегося из сусла диоксида углерода V_{CO_2} вычисляется по формуле

$$V_{CO_2} = (C_1 + C_2) \frac{V_{сусла}}{100\rho_{сусла}},$$

где C_1 и C_2 – потери на брожение по отношению к количеству холодного сусла соответственно на главное брожение и дображивание;

$\rho_{\text{сусла}}$ – плотность суслы.

Потери в сухих веществах на брожение связаны с тем, что в процессе брожения разлагается часть сухих веществ в количестве, пропорциональном выделившемуся диоксиду углерода. При этом к сухим веществам присоединяется спирт, также в пропорциональном выделившемуся диоксиду углерода количеству.

В соответствии с представленным выше уравнением химической реакции потери в сухих веществах на брожение V будут

$$V = V_{CO_2} \frac{2M_{C_6H_{10}O_5} - M_{C_2H_5OH}}{2M_{CO_2}},$$

где $M_{C_6H_{10}O_5}$ – молекулярная масса остатка крахмала;

$M_{C_2H_5OH}$ – молекулярная масса этилового спирта;

M_{CO_2} – молекулярная масса диоксида углерода.

Дальнейший расчет потерь на брожение аналогичен расчету потерь со шламом сепараторным.

После отделения выше перечисленных потерь определяются избыточные дрожжи, а затем потери при розливе.

Расчеты при их отделении аналогичны расчетам при отделении шлама сепараторного.

Количество отрубей, необходимых для кондуктивного массообмена после реконструкции, $V_{отр}$ рассчитывается по формуле

$$V_{отр} = \frac{W_1 V_1 + W_2 V_2 - W_{сыр.э} (V_1 + V_2)}{W_{сыр.э} - W_{отр}},$$

где $W_{сыр.э}$ – влажность сырого экструдата;

$W_{отр}$ – влажность отрубей;

W_1 – влажность отходов при полировке;

W_2 – влажность солодовой дробины;

V_1 – количество отходов при полировке, получающееся при производстве 1 дал пива;

V_2 – количество солодовой дробины, получающееся при производстве 1 дал пива.

Количество воды, уносимое с сушильным агентом, B'_g определяется по формуле

$$B'_g = \frac{W_{сыр.э} - W_{сух.э}}{100} (V_{omp} + V_1 + V_2),$$

где $W_{сух.э}$ – влажность сухого экструдата.

Потери на вентиляцию по второму варианту технологии производства пива увеличиваются на величину потерь с сушильным агентом B'_g по сравнению с потерями на вентиляцию по первому варианту.

Технология переработки солодовой дробины и отходов, получаемых при полировке, осуществляемая по второму варианту технологии производства пива, изображена операторной моделью (рисунок 8.3).

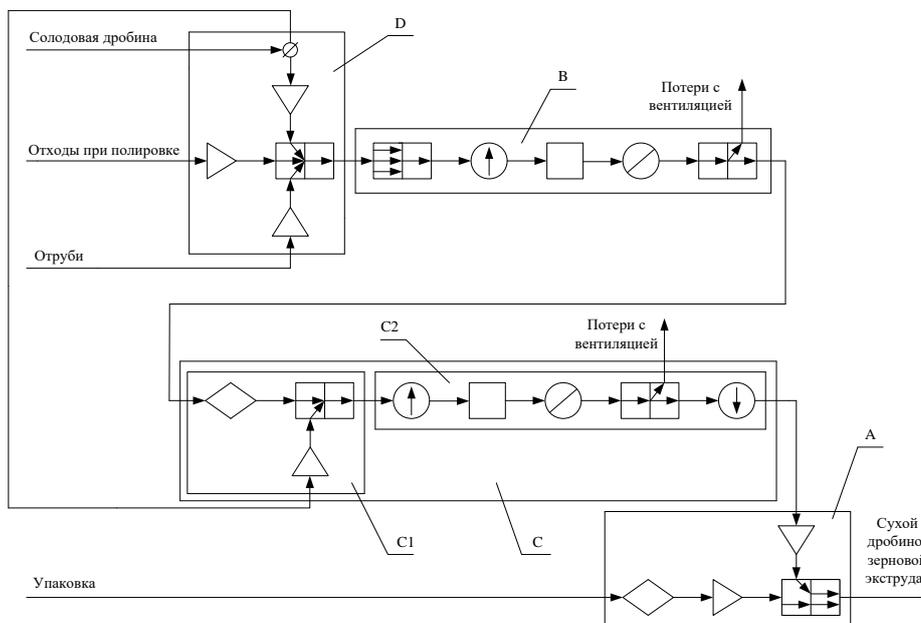


Рисунок 8.3. Операторная модель переработки солодовой дробины и отходов при полировке солода:

А – подсистема формирования сухого дробино-зернового экструдата; В – подсистема экструдирования дробино-зерновой смеси; С – подсистема влаго-воздушно-тепловой обработки дробино-зернового экструдата; С1 – блок увлажнения дробино-зернового экструдата солодовой дробинной; С2 – блок сушки дробино-зернового экструдата; D – подсистема подготовки дробино-зерновой смеси.

Количество вырабатываемого сухого дробино-зернового экструдата $V_{сух.э}$ рассчитывается по формуле

$$V_{сух.э} = V_{omp} + V_1 + V_2 + B'_g.$$

Остальные виды потерь и побочных продуктов остаются прежними.

8.3. Расчет эффективности используемой технологии

Расчет по формулам (1.6), (1.9), (1.11) и (1.13) эффективности предлагаемой технологии утилизации дробины по сравнению с реализацией дробины потребителю в жидком виде был выполнен для условий одного из производителей пива города Оренбурга.

Для расчета по предложенной методике использованы электронные таблицы Excel. Схема заполнения ячеек приведена в таблице 8.2.

Пример расчета приведен в таблице 8.3.

Результаты расчета интегральных стоимостных критериев эффективности технологии производства пива по первому и второму вариантам приведены в таблице 8.4.

Таблица 8.2

Пояснения к заполнению электронной таблицы Excel

Наименование показателя		Коды ячеек		
		Границ поля	Столбца	Ячейки
Расход сырья (кг) на 1 дал пива	солод			В 8
	ячмень			В 13
	хмель			В 20
Общий объем воды, расходуемой 1 дал пива, кг				Г 32
Отходы на 1 дал пива, кг	Дробина солодовая			Е 3
	Дробина хмелевая			Г 3
	Шлам сепараторный			І 3
	Дрожжи избыточные			К 3
	Отходы при полировке			С 3
Потери с вентиляцией на 1 дал пива, кг				Q 3
Потери при розливе в % к товарному пиву				М 35
Потери при брожении (%) к объему холодного сусле	При главном брожении			М 36
	При дображивании			М 37
Плотность холодного сусле, г/см ³				Д 45
Влажности (%) исходных продуктов, полуфабрикатов и отходов			С 34 – С 41	С 43, Е 42, F 44
Влажность отрубей (%), используемых для экструдирования после реконструкции				Г 88
Влажность сырого экструдата (%)				Г 87
Влажность сухого дробино-зернового экструдата (%)				Г 91
Расчет содержания того или иного компонента сырья в готовой продукции и отходах		Д 50 – Q 50, Д 54 – Q 54		
Определение требуемого количества отрубей				Г 89
Количество сухого экструдата				Г 92
Расчет H_i^o для различных видов отходов		В 59 – V 59, В 63 – V 63		
Расчет $\Sigma H_j^o V_j^o$; $\Sigma (H_j^o + H_j^u) V_j^o$; $\Sigma H_j^u V_j^o$ по технологии	Существующей	С 66 – J 66, С 74 – J 74		
	Предлагаемой	Л 66 – R 66, Л 74 – R 74		
Расчет $H_i^c V_i^c$ по технологии	Существующей	А 78 – А 82, Е 78 – Е 82		
	Предлагаемой	М 78 – P 78, М 83 – P 83		
Расчет $H_i^n V_i^n$ по технологии	Существующей	Г 77 – К 77, Г 82 – К 82		
	Предлагаемой	Р 77 – V 77, R 82 – V 82		
Расчет K_6, K_2, K_3 по технологии	Существующей			В 84, Е 84, Н 84
	Предлагаемой			Н 85, Q 85, V 85

Таблица 8.3

Пример расчета в электронных таблицах Excel

	A	B	C	D	E	F	G	H	
1			Перешло						
2			Отходы при полировке		Солодовая дробина		Хмелевая дробина		
3		Всего	0,008	кг	3,72		0,091		
4		Сух.в-в			0,4464		0,01365		
5		Воды			3,2736		0,07735		
6		кг	Перешло	Остаток	Перешло	Остаток	Перешло	Остаток	
7	Солод св.								
8	Всего	1,57	0,008	1,562	0,409193	1,152807		1,152807	
9	Сухих в.			1,474528	0,386278	1,08825		1,08825	
10	Воды			0,087472	0,022915	0,064557		0,064557	
11									
12									
13	Ячмень	0,27		0,27	0,070731	0,199269		0,199269	
14				0,2295	0,060122	0,169378		0,169378	
15				0,0405	0,01061	0,02989		0,02989	
16									
17									
18									
19									
20	Хмель	0,022		0,022		0,022	0,01569	0,00631	
21				0,01914		0,01914	0,01365	0,00549	
22				0,00286		0,00286	0,00204	0,00082	
23									
24									
25							Добавился хмель		
26									
27	Вода			13,65916					
28	Сусло (пиво)								
29	Всего			15,49116	3,72	11,77116	0,091	11,70216	
30	СВ + Спирт			1,704028	0,4464	1,257628	0,01365	1,263118	
31	Вода			13,78714	3,2736	10,51354	0,07735	10,43905	
32	Общий объем воды расходуемой на производство пива, л/дал						50		
33			%						
34	Влажность	Солода	5,6			Молекулярные массы:			
35		Ячменя	15			Спирта	46		
36		Хмеля	13			Остатка крахмала		162	
37		Сусла	89			углекислого газа		44	
38		Солод.др.	88						
39		Хмел.дроб.	85						
40		Шлам сеп	80						
41		Изб.дрож.	88						
42		Потери на брожение		(по суслу)	89				
43		Сточных вод	99,5						

	A	B	C	D	E	F	G	H
44		Отходов, уносимых сточными водами				80		
45	Плотность суслу, кг/куб.см			1,04				

Таблица 8.3

Пример расчета в электронных таблицах Excel (продолжение)

	I	J	K	L	M	N	O
1							
2	Шлам сепараторный		Избыточные дрожжи		Потери на брожение		Сточные воды
3	0,032		0,05		0,371275061	(с учетом	36,34083636
4	0,0064		0,006		0,040840257	образов.	0,181704182
5	0,0256		0,044		0,330434804	спирта)	36,15913218
6	Перешло	Остаток	Перешло	Остаток	Потеряно	Остаток	Перешло
7							
8	0,005841072	1,14696565	0,005476005	1,14149	0,037273574	1,104216	0,165835498
9	0,005513972	1,08273558	0,005169349	1,077566	0,035186254	1,04238	0,15654871
10	0,0003271	0,06423008	0,000306656	0,063923	0,00208732	0,061836	0,009286788
11							
12							
13	0,00100966	0,19825911	0,000946557	0,197313	0,006442935	0,19087	0,028665547
14	0,000858211	0,16852024	0,000804573	0,167716	0,005476495	0,162239	0,024365715
15	0,000151449	0,02973887	0,000141983	0,029597	0,00096644	0,02863	0,004299832
16							
17							
18							
19							
20	3,19734E-05	0,00627837	2,99751E-05	0,006248	0,000204032	0,006044	0,000907766
21	2,78169E-05	0,00546218	2,60783E-05	0,005436	0,000177508	0,005259	0,000789757
22	4,15655E-06	0,00081619	3,89676E-06	0,000812	2,65241E-05	0,000786	0,00011801
23				Фактически ушло на промывку			чистой воды
24							36,15913218
25				Фактически перешло в сточные воды			
26							37,05394846
27							
28							
29	0,032	11,6701636	0,05	11,62016	0,371275061	11,24889	0,908520909
30	0,0064	1,256718	0,006	1,250718	0,040840257	1,209878	0,181704182
31	0,0256	10,4134456	0,044	10,36945	0,330434804	10,03901	0,726816727
32							
33							
34							
35		Потери на исправимый брак, %			2		
36		Потери при главном брожении, %			2,3		
37		Потери при дображивании, %			2,35		
38							
39							
40							

	I	J	K	L	M	N	O
41							
42							
43							
44							
45							

Таблица 8.3

Пример расчета в электронных таблицах Excel (продолжение)

	P	Q	R	S	T	U	V	W
1								
2		Потери с вентиляции		Потери при розливе				
3		0,3		0,196869954				
4		0,033		0,019513207				
5		0,267		0,177356747				
6	Остаток	Перешло	Остаток	Перешло	Товарное			
7					пиво			
8	0,938381	0,030118027	0,908263	0,151377091	0,756885			
9	0,885831	0,028431417	0,8574	0,142899974	0,7145			
10	0,052549	0,00168661	0,050863	0,008477117	0,042386			
11								
12								
13	0,162204	0,005206061	0,156998	0,026166335	0,130832			
14	0,137873	0,004425152	0,133448	0,022241384	0,111207			
15	0,024331	0,000780909	0,02355	0,00392495	0,019625			
16								
17								
18								
19								
20	0,005137	0,000164863	0,004972	0,000828623	0,004143			
21	0,004469	0,000143431	0,004325	0,000720902	0,003605			
22	0,000668	2,14322E-05	0,000646	0,000107721	0,000539			
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29	10,34037	0,3	10,04037	0,196869954	9,843498			
30	1,028174	0,033	0,995174	0,019513207	0,97566			
31	9,312194	0,267	9,045194	0,177356747	8,867837			
32								
33								
34								
35								
36								

	P	Q	R	S	T	U	V	W
37								
38								
39								
40								
41								
42								
43								
44								
45								

Таблица 8.3

Пример расчета в электронных таблицах Excel (продолжение)

	A	B	C	D	E	F	G	H
46								
47		Расход сырья на		Содержание в готовой продукции и отходах				
48		1 дал пива		1 Отходы	2 Солодовая	3 Хмелевая	4 Шлам	5 Избыт.
49	Сырье			при полир.	дробина	дробина	сепарат.	дрожжи
50	1 Солод	1,57		0,008	0,409193276		0,005841072	0,005476
51	2 Ячмень	0,27			0,070731232		0,00100966	0,000947
52	3 Хмель	0,022				0,015689655	3,19734E-05	3E-05
53	4 Вода	49,8183			3,240075492	0,075310345	0,025117294	0,043547
54	Итого	51,6803		0,008	3,72	0,091	0,032	0,05
55								
56	Расчет критериев							
57		Отходы при полировке			2 Солодовая дробина		3 Хмелевая дробина	
58		Hci	Bi	Ho1	Bi	Ho2	Bi	Ho3
59	1	10,5	1	10,5	0,109998193	1,154981021	0	0
60	2	8			0,019013772	0,152110177	0	0
61	3	110			0	0	0,172413793	18,96552
62	4	0,008			0,870988035	0,006967904	0,827586207	0,006621
63	Итого		1	10,5	1	1,314059102	1	18,97214
64		До реконструкции						(Ho1+Ho2+Ho3)*Voj
65		Вид отходов:	Ho1	Voj	Ho1*Voj	Hoj	Hnj	
66	1	При полировке	10,5	0	0	0,01		0
67	2	Солодовая дробин	1,314059	0	0	0,005		0
68	3	Хмелевая дробин.	18,97214	0,091	1,726464552	0,05		1,731015
69	4	Шлам сепараторн.	2,285205	0,032	0,073126552	0,05		0,074727
70	5	Избыточные дрож.	1,374323	0,05	0,068716143	0,05		0,071216
71	6	Потери на брож.	1,260463	0,371275	0,467978334			0,467978
72	7	Сточные воды	0,063814	37,06765	2,36542936	0,01		2,736106
73	8	Потери с вентиляц.	1,260463	0,3	0,378138785			0,378139
74	9	Потери на розлив	5,510352	0	0	0,1		0
75		Сумма			5,079853726			5,45918
76								
77		Вид сырья	Vci	Hci	Hci*Vci		Готовая продукция	
78	1	Солод	1,57	10,5	16,485		1 Пиво	
79	2	Ячмень	0,27	8	2,16		2 Солод.отх.	

	A	B	C	D	E	F	G	H
80	3 Хмель		0,022	110	2,42		3 Жидк.дроб.	
81	4 Вода		49,8183	0,008	0,398546367		4 Потери на розлив	
82	Сумма				21,46354637		Сумма	
83								
84	Кб=	0,763326		Кг=	0,957419417		Кэ=	0,99682
85								
86	Расчет процесса утилизации солодовой дробины и отходов при полировке							
87	Влажность экструдированного полуфабриката до сушки, %						50	
88	Влажность отрубей, %						14,5	
89	Требуемое количество отрубей, кг						3,971966197	
90	Потери воды с вентиляцией при сушке						1,509347155	
91	Влажность сухого зерно-бардяного экстрадата, %						12	
92	Количество сухого зерно-бардяного экстрадата, кг						2,462619042	

Таблица 8.3

Пример расчета в электронных таблицах Excel (продолжение)

	I	J	K	L	M	N	O
46	Газ						
47	Углекислый						
48	6 Потери на брожение	7 Сточные воды	8 Потери с вентиляцией	9 потери на розливе	Итого	Остаток в 1 дал товарного пива	
49							
50	0,037273574	0,1658355	0,030118027	0,151377	0,813114543	0,756885457	
51	0,006442935	0,02866555	0,005206061	0,026166	0,139168327	0,130831673	
52	0,000204032	0,00090777	0,000164863	0,000829	0,017856887	0,004143113	
53	0,327354519	36,8722443	0,264511049	0,164847	41,0130074	8,805288417	
54	0,371275061	37,0676531	0,3	0,343219	41,98314716	9,697148659	
55							
56							
57	Шлам сепараторный		Избыточные дрожжи		Потери на брожение		Сточные воды
58	Вi	Но4	Вi	Но5	Вi	Но6	Вi
59	0,182533496	1,91660171	0,109520098	1,149961	0,100393423	1,054131	0,00447386
60	0,031551885	0,25241508	0,018931131	0,151449	0,017353537	0,138828	0,000773331
61	0,000999169	0,10990864	0,000599502	0,065945	0,000549543	0,06045	2,44894E-05
62	0,784915449	0,00627932	0,87094927	0,006968	0,881703497	0,007054	0,99472832
63	1	2,28520476	1	1,374323	1	1,260463	1
64				После реконструкции			
65		Huj*Voj		Voj	Hoj*Voj	Huj	Hnj
66		0			0	0,01	
67		0			0	0,005	
68		0,00455		0,091	1,726464552	0,05	
69		0,0016		0,032	0,073126552	0,05	
70		0,0025		0,05	0,068716143	0,05	
71		0		0,371275	0,467978334	0	
72		0,37067653		37,06765	2,36542936	0,01	
73		0		1,809347	0,390213562	0	
74		0		0	0	0,1	

	I	J	K	L	M	N	O
75		0,37932653		39,42128	5,091928503		
76							
77	Hnl	Vnl	Hnl*Vnl		Вид сырья	Hci	Vci
78	12,5	9,69714866	121,2143582		1 Солод	10,5	1,57
79	0,1	0,008	0,0008		2 Ячмень	8	0,27
80	0,03	3,72	0,1116		3 Хмель	110	0,022
81	10	0,34321901	3,432190074		4 Вода	0,008	49,81829582
82			124,7589483		5 Отруби	1,5	3,971966197
83					Сумма		
84							
85					Кб=	0,814309	
86							
87							
88							
89							
90							
91							
92							

Таблица 8.3

Пример расчета в электронных таблицах Excel (продолжение)

	P	Q	R	S	T	U	V	W
46								
47								
48	Потери с вентиляцией после реконструкции							
49								
50		0,030118027						
51		0,005206061						
52		0,000164863						
53		1,773858204						
54		1,809347155						
55								
56						Потери с вентиляцией		
57		Потери с вентиляцией		Потери на розлив		после реконструкции		
58	Но7	Вi	Но8	Вi	Но9	Вi	Но8 (после)	
59	0,046976	0,100393423	1,054131	0,441051014	4,631036	0,016646	0,174781	
60	0,006187	0,017353537	0,138828	0,076238011	0,609904	0,002877	0,023019	
61	0,002694	0,000549543	0,06045	0,002414268	0,265569	9,11E-05	0,010023	
62	0,007958	0,881703497	0,007054	0,480296707	0,003842	0,980386	0,007843	
63	0,063814	1	1,260463	1	5,510352	1	0,215665	
64								
65	(Hoj+Huj-Hnj)*Voj		Huj*Voj					
66	0		0					
67	0		0					
68	1,731015		0,00455					
69	0,074727		0,0016					
70	0,071216		0,0025					

	P	Q	R	S	T	U	V	W
71	0,467978		0					
72	2,736106		0,370677					
73	0,390214		0					
74	0		0					
75	5,471255	0	0,379327					
76								
77	Hci*Vci		Готовая продукция		Hnl	Vnl	Hnl*Vnl	
78	16,485		1 Пиво		12,5	9,697149	121,2144	
79	2,16		2 Потери на розлив		10	0,343219	3,43219	
80	2,42		3 Сухой экструдат		6	2,462619	14,77571	
81	0,398546						0	
82	5,957949		Сумма				139,4223	
83	27,4215							
84								
85	Kг=	0,961986635			Kэ=	0,997168		
86								
87								
88								
89								
90								
91								
92								

Таблица 8.4

Оценка эффективности реутилизации пивной дробины

Технология	$K_{\bar{b}}$	K_2	K_3	$K_{m\bar{a}}$
Существующая	0,763	0,957	0,997	0,728
Предлагаемая	0,814	0,962	0,997	0,781

Анализ результатов таблицы 8.4 показывает, что предлагаемая технология повышает эффективность рассматриваемого производства в основном за счет повышения уровня его безотходности. Несколько увеличивается глубина переработки отходов. Экологические показатели остаются на том же уровне.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что предлагаемая технология реутилизации отходов бродильных и зерноперерабатывающих производств соответствует основным направлениям исследований в области переработки ВМР перерабатывающих отраслей АПК. Она реализует принцип единого подхода для всех предприятий отрасли и внедрения новых «экологически чистых» технологий по переработке отходов. Оптимизация процессов основана на комплексной оценке эффективности по безотходности технологических процессов, глубины переработки сырья и экологичности производства.

8.4. Линия для обезвоживания высоковлажных вторичных сырьевых ресурсов

На основании операторной модели (рисунок 8.3), в качестве примера разработана машинно-аппаратурная схема технологической линии по второму варианту топологии, предложенному в параграфе 3.6. Эта схема представлена на рисунке 8.4.

Высоковлажные отходы из емкости 1 подаются в разделитель 3, где дисперсная фаза отделяется от дисперсионной среды. Дисперсная фаза все еще имеющая высокую влажность подается в смеситель 4. Туда же подаются зерноотходы из бункера 2. Полученная в смесителе 4 смесь отходов, с оптимальной для экструдирования влажностью, подается в экструдер 5. Выходящие из экструдера капиллярно-пористые изделия с развитой поверхностью направляются на сетчатый транспортер охладителя-влагосъемника 8. Находящиеся на транспортере изделия обильно поливаются отделенной в разделителе 3 дисперсионной средой, а затем высушиваются в охладителе-влагосъемнике 8 воздухом помещения и поступают в бункер готовой продукции 9. Лишняя дисперсионная среда с частичками дисперсной фазы стекает в поддон 7 и далее направляется в разделитель 3. Для дозирования высоковлажных отходов, зерноотходов и дисперсионной среды применяются дозаторы 10, 11. Предлагаемая технологическая линия имеет следующие преимущества по сравнению с известными аналогами: низкие удельные затраты энергии на осуществление процесса; реутилизация нескольких видов пищевых отходов; сохранение в получаемом продукте витаминов и других полезных веществ, разлагающихся при повышенных температурах.

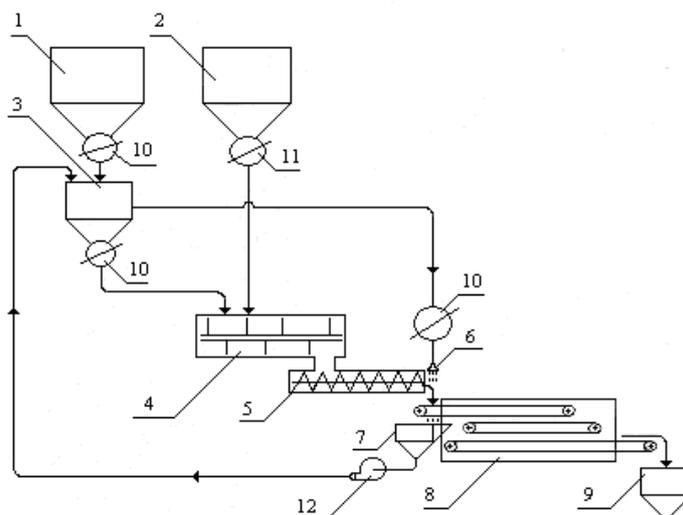


Рисунок 8.4. Машинно-аппаратурная схема реутилизации высоковлажных продуктов: 1 – емкость для высоковлажных продуктов; 2 – бункер зерноотходов; 3 – разделитель высоковлажных отходов; 4 – смеситель; 5 – экструдер; 6 – распылитель; 7 – сборник; 8 – конвективная сушилка; 9 – бункер готовой продукции; 10 – дозатор жидких компонентов; 11 – дозатор сыпучих компонентов; 12 – насос для перекачки жидких компонентов.

Заключение

Изложенные выше результаты являются попыткой использования системного подхода к созданию технологии утилизации отходов бродильных производств. Системность подразумевает создание нового продукта, полученного реутилизацией отходов бродильных производств и пшеничных отрубей, выбор технологических процессов получения этого продукта и определения физико-механических свойств полуфабриката в процессе обработки. Проведенные исследования демонстрируют возможности использования системного анализа и синтеза – мощных современных методов изучения и формирования технологических объектов.

Настоящую работу можно рассматривать как один из возможных вариантов решения задачи синтеза технологии. Авторы сконцентрировали внимание, на основных препятствиях, возникающих в этом процессе.

Источник возникновения таких препятствий – требования технологии, которые основаны на комплексе трудно формализуемых биологических, химических и физико-химических параметров. При решении задачи синтеза их приходится сводить к более узкой области формализованных физико-химических, а в отдельных случаях – только механических параметров.

Особого внимания заслуживает определение требований к процессу экструдирования с учетом качества пищевых и кормовых продуктов, оцениваемого по комплексу критериев. Задача связана с поиском критериальных зависимостей между параметрами качества экструдата и параметрами эффекта экструдера. Это позволит повысить качество системного синтеза процесса экструдирования.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

Описанный выше способ реутилизации отходов бродильных и зерноперерабатывающих производств соответствует основным направлениям развития мало- и безотходных технологий, рекомендуемым единой экономической комиссией ООН.

Предложенный (на основе патентов РФ № 2248720 и № 2266677) способ утилизации отходов бродильных производств и зерновых отходов, включающий экструдирование их смеси и последующую конвективную сушку, позволяет удерживать водорастворимые компоненты сырья в полученном сухом белково-витаминном продукте. Оценка этого способа предложенным интегральным критерием эффективности технологического процесса, включающим критерии безотходности, глубины переработки сырья и экологичности, показала, что в разработанной технологии по сравнению с существующей критерий эффективности возрос за счет роста критерия безотходности.

Использование процесса сорбции дисперсионной среды на 40 % сокращает расход зерновых отходов. Полученные регрессионные зависимости позволяют определить время сорбции. Показана возможность сорбции дисперсионной среды экструдированным полуфабрикатом с исходной влажностью 30 % непосредственно

после экструдирования до влажности 84 % независимо от формы поперечного сечения экструдата и увлажняющей среды.

Специализированное экструдующее оборудование может быть оптимизировано на основе регрессионной зависимости для энергоемкости экструдирования, позволяющей определять температурный режим процесса, и экспериментально определенных реологических параметров полуфабриката как тела Оствальда-де Виля μ' и n ; толщины слоя проскальзывания на дне канала шнека h_n и коэффициента отклонения формы канала фильеры переменного сечения от цилиндрического c_ϕ .

Экспериментально определенные внешние величины математической модели процесса конвективной сушки: коэффициент влагопроводности a_m и коэффициент паропроводности λ_{mp} для периода постоянной скорости сушки, влажность в первой критической точке W_{k1}^c , а также коэффициент влагопроводности a_m и коэффициент внешнего влагообмена α_{mi} для периода падающей скорости сушки позволяют вычислять рациональные режимы сушки полуфабриката.

Предложены конструкции матриц экструдеров с фильерами в упругой оболочке, предназначенные для экструдирования высоковлажных полуфабрикатов (патенты РФ № 2240918, № 2245249, № 2249420), а также конструкция экструдера, позволяющая снижать влажность полуфабриката в процессе экструдирования (патент РФ № 2243098), и конструкции экструдеров, позволяющие получать полуфабрикат высокой влажности (патенты РФ №2251365, № 2261031, № 2266677).

Дальнейшее развитие проведенных исследований возможно в нескольких направлениях. В теоретическом аспекте нужно адаптировать методы формализации анализа и синтеза для систем технологических процессов, реализующих технологии получения требуемого продукта, а также совершенствовать математические модели этих процессов.

Для практической реализации предлагаемой системы процессов возможны два направления повышения их эффективности:

- расширение сферы применения на все виды высоковлажных отходов, имеющих кормовую ценность;
- поиск эффективных наполнителей, имеющих кормовую ценность и позволяющих получить экструдат с большой впитывающей способностью.

Проведение исследований в перечисленных выше направлениях будет способствовать дальнейшему развитию технологий в перерабатывающих отраслях АПК.

Библиографический список

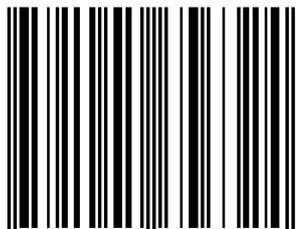
1. Алексанян, И. Ю. Развитие научных основ процессов высокоинтенсивной сушки продуктов животного и растительного происхождения : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / И. Ю. Алексанян. – М. : МГУПБ, 2001. – 27 с.
2. Антимонов, С. В. Пути решения проблемы переработки отходов в отрасли хлебопродуктов / С. В. Антимонов, С. П. Василевская // Вестн. Оренбург. гос. ун-та. – 2003. - № 1. – С. 17-18.
3. Бернштейн, А. Ф. Комплексное использование барды спиртовых заводов / А. Ф. Бернштейн, И. К. Сиволап. – М., 1982. – 213 с.
4. Бостанджиян, С. А. Течение неньютоновской жидкости между двумя параллельными плоскостями / С. А. Бостанджиян, А. М. Столин // Изв. АН СССР. Механика. – 1965. - № 1. – С. 21-23.
5. Буевич, Ю. А. Струйное псевдооживление / Ю. А. Буевич, Г. А. Минаев. - М. : Химия, 1984. – 254 с.
6. Василевская, С. П. Разработка и обоснование методов утилизации растительных отходов бродильных производств : дис. канд. техн. наук / С. П. Василевская. – Оренбург : ОГУ, 2006. – 238 с.
7. Василевская, С. П. Синтез технологии утилизации отходов бродильных производств : монография / С. П. Василевская, А.Н. Николаев, В.Ю. Полищук. – Казань: ЗАО «Новое знание», 2007. – 170 с.
8. Василевская, С. П. Соппротивление фильеры переменного сечения / С. П. Василевская, В. П. Ханин, В. Ю. Полищук // Вестн. Оренбург. гос. ун-та. - 2004. - № 10. – С. 34-35.
9. Вторичные сырьевые ресурсы пищевой и перерабатывающей промышленности АПК России и охрана окружающей среды : справочник / под ред. Е. И. Сизенко. - М., 1999. – 457 с.
10. Гинзбург, А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / А. С. Гинзбург. - М. : Пищевая промышленность, 1973. – 321 с.
11. Гмошинский, В. Г. Инженерное прогнозирование / В. Г. Гмошинский. - М. : Энергоиздат, 1982. - 327 с.
12. Груздев, И. Э. Теория шнековых устройств / И. Э. Груздев, Р. Г. Мирзоев, В. И. Янков. - Л. : ЛГУ, 1978. – 328 с.
13. Дегтярев, С. В. Технология комплексной переработки отходов пивоварения / С. В. Дегтярев : дис. ... канд. техн. наук / С. В. Дегтярев. – Пермь, 2000. – 217 с.
14. Иванов, В. И. Состояние использования вторичных ресурсов в пищевой промышленности РФ / В. И. Иванов, В. И. Комаров // Вестн. Рос. акад. с.-х. наук. – 1993. - № 4. – С. 15-17.
15. Использование отходов промышленности и сельского хозяйства в животноводстве / Г. Д. Гуменюк [и др.]. – Киев : Урожай, 1983. – 294 с.
16. Карташов, Л. П. Системный синтез технологических объектов АПК / Л. П. Карташов, В. Ю. Полищук. – Екатеринбург : УрО РАН, 1998. – 187 с.

17. Ковалевский, А. П. Влияние параметров отработанного сушильного воздуха на конечную влажность казеината натрия при сушке на инертных гранулах / А. П. Ковалевский, Э. И. Хорошая, А. А. Рысин // Труды / ВНИЭКИ продмаш. – М., 1975. – № 43. – С. 7-9.
18. Количественная оценка технологических процессов по степени их мало- и безотходности / В. И. Комаров [и др.] // Пищевая промышленность. - 1995. - № 3. – С 13-14.
19. Колунянц, К. А. Химия солода и пива / К. А. Колунянц. - М. : Агропромиздат, 1990. - 175 с.
20. Комаров, В. И. Проблема использования вторичных ресурсов отраслей пищевой и перерабатывающей промышленности и их влияние на окружающую среду / В. И. Комаров, Е. И. Лебедев, Т. А. Мануйлова // Пищевая промышленность. – 1998. - № 2. – С. 22-23.
21. Комплексное использование сырья в пищевой промышленности / Ю. П. Лебединский [и др.]. – Киев : Техника, 1983. – 347 с.
22. Коренков, П. Ю. Низконапорное распыление высокотемпературным теплоносителем при сушке жидких пищевых продуктов : автореф. дис. канд. техн. наук / П. Ю. Коренков. - М. : МГУПБ, 2002. – 286 с.
23. Куватов, Д. М. Биотехнология кормопроизводства / В. Л. Касперович, А. П. Иванова. – Уфа : Гилем, 2003. – 362 с.
24. Кунии, Д. Промышленное псевдооживление / Д. Кунии, О. Левеншпиль. - М. : Химия, 1976. – 235 с.
25. Мачихин, Ю. А. Инженерная реология пищевых материалов / Ю. А. Мачихин, С. А. Мачихин. - М. : Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 348 с.
26. Мачихин, Ю. А. Современное оборудование в обработке пищевых материалов давлением / Ю. А. Мачихин, Г. Г. Зурабишвили, С. Н. Панфилова. - М. : Росвузнаука, 1991. – 363 с.
27. Медведев, Г. М. Использование режимов тепловой экструзии для формирования полуфабрикатов крекеров на шнековых макаронных прессах : обзор. информ. / Г. М. Медведев. - М. : ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, 1992.
28. Моисев, Н. Н. Математические задачи системного анализа / Н. Н. Моисев. - М. : Наука, 1981. - 487 с.
29. Обезвоживание растворов в кипящем слое / О. М. Тодес [и др.]. - М. : Металлургия, 1973. –206 с.
30. Основы системного подхода / Ф. И. Перегудов [и др.]. – Томск : ТГУ, 1976. – 286 с.
31. Пажи, Д. Г. Основы техники распыливания жидкостей / Д. Г. Пажи, В. С. Галустов. - М. : Химия, 1984. – 235 с.
32. Панфилов, В. А. Технологические линии пищевых производств (теория технологического потока) / В. А. Панфилов. – М. : Колос, 1993. – 288 с.
33. Пат. 2089065 Российская Федерация, МКИ А 21 С 11/16, В 29 С 47/08. Матрица пресс-экструдера со сквозными отверстиями / Попов В. П., Зинюхин Б. Г., Касперович В. Л., Буцко В. А. (Россия) ; заявитель и патентообладатель Оренбург. гос. ун-т. - № 95112628 ; заявл. 19.07.98 ; опубл. 10.09.97, Бюл. № 25.

34. Пат. 2092056 Российская Федерация, МКИ А 21 С 11/16; В 29 С 47/16. Формующий узел экструдера / Дегтяренко Г.Н., Полищук В. Ю., Попов В. П., Рабинович И. Б. (Россия) ; заявитель и патентообладатель Оренбург. гос. ун-т. - № 93045755 ; заявл. 23.09.93 ; опубл. 10.10.97, Бюл. № 28.
35. Пат. 2154944 Российская Федерация, МКИ А 21 С 11/16, В 29 С 47/16. Формующий узел пресса-экструдера / Коротков В. Г., Ханин В. П., Сагитов Р. Ф., Бахитова О. А. (Россия) ; заявитель и патентообладатель Оренбург. гос. ун-т. - № 98120627 ; заявл. 16.11.98 ; опубл. 27.08.00, Бюл. № 24.
36. Пат. 2240918 Российская Федерация, МПК7 В 30 В 11/22. Матрица экструдера для полуфабрикатов малой прочности / Василевская С. П., Зубкова Т. М., Ханин В. П., Полищук В. Ю. (Россия) ; заявитель и патентообладатель Оренбург. гос. ун-т. - № 2003110405 ; заявл. 11.04.03 ; опубл. 27.11.04, Бюл. № 33.
37. Пат. 2243098 Российская Федерация, МПК7 В 30 В 11/24, В 29 С 47/00, А 23 Р 1/12. Экструдер / Полищук В. Ю., Зубкова Т. М., Василевская С. П. (Россия) ; заявитель и патентообладатель Оренбург. гос. ун-т. - № 2002133775 ; заявл. 15.12.02 ; опубл. 27.12.04, Бюл. № 36.
38. Пат. 2245249 Российская Федерация, МПК7 В 29 С 47/12, 47/16, 47/22, В 30 В 11/22. Матрица экструдера / Василевская С. П., Зубкова Т. М., Ханин В. П., Полищук В. Ю. (Россия) ; заявитель и патентообладатель Оренбург. гос. ун-т. - № 2002110035 ; заявл. 08.04.03 ; опубл. 27.01.05, Бюл. № 3.
39. Пат. 2251365 Российская Федерация, МПК7 А 23 Р 1/12, В 30 В 11/22. Экструдер высоковлажных продуктов / Ханин В. П., Василевская С. П., Попов В. П., Зубкова Т. М. (Россия) ; заявитель и патентообладатель Оренбург. гос. ун-т. - № 2003123651 ; заявл. 25.07.03 ; опубл. 10.05.05, Бюл. № 13.
40. Пат. 2261031 Российская Федерация, МПК7 А 23 Р 1/12. Экструдер двойного экструдирования / Василевская С. П., Ханин В. П., Полищук В. Ю., Попов В. П., Зубкова Т. М. (Россия) ; заявитель и патентообладатель Оренбург. гос. ун-т. - № 2003123655/13 ; заявл. 25.07.03 ; опубл. 27.09.05, Бюл. № 27.
41. Полищук, В. Ю. Движение материала в канале шнека при наличии пограничного слоя на дне канала / В. Ю. Полищук, С. П. Василевская // Вестн. Оренбург. гос. ун-та. – 2004. - № 9. – С. 16-18.
42. Романков, П. Г. Сушка во взвешенном состоянии / П. Г. Романков, Н. Б. Рашковская. - Л. : Химия, 1979. – 176 с.
43. Термопластическая экструзия: научные основы, технология, оборудование / под ред. А. Н. Богатырева, В. П. Юрьева. - М. : Ступень, 1994. – 274 с.
44. Тодес, О. М. Аппараты с кипящим зернистым слоем / О. М. Тодес, О. Б. Цитович. - Л. : Химия, 1982. - 296 с.
45. Торнер, Р. В. Основные процессы переработки полимеров / Р. В. Торнер. - М. : Химия, 1972. - 453 с.
46. Формирование технических объектов на основе системного анализа / В. Е. Руднев [и др.]. - М. : Машиностроение, 1991. - 318 с.



ISBN 978-1-005-65632-4



9 781005 656324

Усл. печ. л. 8,1.
Формат 60x84 1/16. Бумага писчая
Тираж 20. Заказ 135
Объем издания 3,4 МВ
Оформление электронного издания:
НОО Профессиональная наука, mail@scipro.ru
Дата размещения: 20.02.2021 г.
URL: <http://scipro.ru/conf/processingtechnologies.pdf>