
Е.М. Заяц

**ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ
ВЛАЖНЫХ КОРМОВ**

Минск “Ураджай”
1997

Заяц Е.М.

Основы электротехнологических методов обработки влажных кормов. — Мн.: Ураджай, 1997. — 216 с.: илл.

ISBN 985-04-0207-5.

Изложены основы процессов делигнификации соломы, клейстеризации крахмала фуражного зерна, коагуляции белка картофельного сока, описано изменение физических свойств кормовых систем в условиях обработки электрическим током. Даны принципы компоновки и методы расчета оборудования для электротехнологической обработки кормов. Табл. 37, илл. 118, список лит. — 87 назв.

Рецензенты:

И.Ф. Кудрявцев, докт. техн. наук, проф. (БАТУ);

В.И. Передня, докт. техн. наук, проф. (БелНИИМСХ).

Научное издание

Заяц Евгений Михайлович

Основы электротехнологических методов обработки кормов

Редактор Р.Я. Лифшиц

Сдано в набор 30.04.97. Подписано в печать 29.04.97. Бумага офсетная. Гарнитура тип Таймс. Печать офсетная. Объем 13,5 печ. л. Тираж 300 экз. Заказ № 232. Издательство “Ураджай” Государственного комитета Республики Беларусь по печати. Лицензия ЛВ №8. 220600, Минск, пр. Машерова, 11. Отпечатано с готовых диапозитивов. Типография БАТУ.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность использования кормовых материалов в значительной мере зависит от совершенства методов их обработки и подготовки к скармливанию. Проблема состоит в отсутствии способов, позволяющих в полной мере извлекать питательный потенциал кормов. Наиболее совершенные из существующих используют потенциальные возможности соломы на 30...35, фуражного зерна на 70...80, белков картофельного сока на 50...80%. Технологии обработки основаны на внешнем тепловом воздействии, энергоемки.

Электротехнологические методы включают термическое, химическое, физическое и биологическое действие электрического тока на структуру вещества кормов. Это углубляет процесс обработки, увеличивает эффективность использования питательного потенциала при одновременном снижении энергоемкости и затрат кормов на единицу продукции.

Цель предлагаемой работы состоит в создании научно-технических основ процессов, технологий и оборудования обработки фуражного зерна, соломы и других кормовых материалов электрическим током, обеспечивающих минимальную себестоимость продукции в результате повышения переваримости, усвояемости и сохранности кормов, снижения энерго- и ресурсозатрат.

В работе рассмотрены вопросы химического, термического, биологического и санитарного действия электрического тока на кормовую среду, установлено влияние параметров электрического тока на изменение свойств кормов, определены технологические режимы обработки, исследованы физические свойства кормовых систем, разработаны технологии обработки фуражного зерна, соломы, мелассы, коагуляции белков картофельного сока, изложены принципы аппаратного оформления электротехнологических процессов и основы инженерного расчета оборудования, приведены методика и результаты энергоэкономического сравнения способов обработки.

Электрохимические способы повышают переваримость соломы в 1,7...3,0 раза, зерна на 50...60% по сравнению с измельчением, выход белков сока на 20...80%, усиливают в десятки раз антимикробное действие температуры, снижают энергоемкость процессов в 1,5...2,0 раза по сравнению с термической обработкой.

Результаты исследований доказывают возможность целенаправленного изменения физико-химических свойств кормовых материалов при воз-

действии электрического тока, раскрывают механизмы процессов, дают примеры технологического использования электрообработки сельскохозяйственной продукции.

Автор благодарит академика Л.С. Герасимовича и профессора В.А. Карасенко, под руководством которых выполнена работа, доцентов А.Н. Барана, В.С. Корко, М.М. Николаенка, В.А. Пашинского, а также профессоров П.С. Авраменко, И.Ф. Кудрявцева и академика В.М. Рогова за ценные советы и поддержку, благодаря которым стала возможной эта публикация.

В экспериментальных исследованиях участвовали инженеры И.Б. Ющенко, П.В. Кардашов, А.М. Чернявский

Мы будем признательны за замечания и пожелания по изложенному материалу.

1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ КОРМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

1.1. Проблема и способы обработки кормов

Анализ состояния животноводства в республике свидетельствует о постоянном дефиците кормов по всем видам их питательности, что является главной причиной невысокой продуктивности скота [1].

Кормовая база животноводства республики включает примерно 40% концентрированных, 18% грубых, 16% сочных, 23% зеленых летних и около 3% прочих кормов. Значительную часть из них (30...35%) подвергают механической, тепловой, химической или комбинированной обработке с целью повышения питательности, усвояемости и поедаемости, изменения микробного состава. В наибольшей мере обработке подвергаемы фуражное зерно, солома, картофель и корнеплоды, сок из картофеля и трав, меласса, обрат и некоторые другие.

Фуражное зерно — главная составляющая концентрированных кормов. Его доля в рационах кормления доходит до 75...80%. В Беларуси на корм ежегодно расходуют около 8 миллионов тонн зерна. Из общего количества около 40% поставляют из-за пределов республики. Задача обработки состоит в облегчении доступа пищеварительным ферментам животного к белку и крахмалу зерна путем перевода нативного крахмала в легкоусвояемые формы. Существующие способы обработки повышают переваримость зерна до 70...80%. Остальные 20...30% питательных веществ не усваиваются, проходя транзитом через пищеварительный тракт животных. Увеличение усвояемости зерна на 10...20% равноценно прибавке на 0,7...1,5 миллионов тонн в год. Наиболее известны механические (дробление, плющение, другие), термические (экструдирование, микронизация, поджаривание), гидротермические (пропаривание под и без давления) способы повышения питательности зерна.

Размол (дробление) разрушает твердую структуру зерна, значительно увеличивает площадь соприкосновения ткани зерна с пищеварительными ферментами, улучшает адсорбцию влаги крахмалом и его усвоение орга-

низмом животного. По данным И.С. Попова, коэффициент переваримости сухого вещества (опыты на свиньях) растет с 67 до 85% при изменении размера частиц помола от 1,8...2,6 до 1 мм. Вместо размола применяют плющение. Одни ученые (С.В. Jheuger, 1986 и др.) считают, что плющение эффективно, другие (W.J. Husted и др., 1986, Складорова, 1984), что сухое плющение не имеет преимуществ перед размолом.

Экструзия — это влаготепловая обработка зерна на пресс-грануляторах (экструдерах). Под воздействием высокого давления экструдера зерно выталкивается в зону низкого давления, вспучивается и приобретает микропористую структуру. Экструзия улучшает вкусовые качества зерна, уменьшает количество нативного крахмала на 12%, увеличивает содержание сахаров на 14% и декстринов более чем в 5 раз по сравнению с исходным. Высокое давление и температура уничтожают почти все плесневые грибы и многие другие бактерии (А.И. Зверев, Н.М. Дрыга и др., 1986).

Микронизация — это тепловая обработка зерна инфракрасным излучением и последующее дробление. Ткань зерна поглощает инфракрасное излучение и разогревается, гигроскопическая влага испаряется. Внутреннее давление растет, зерно набухает и растрескивается. Микронизация расщепляет до 98% крахмала в сахара, увеличивает на 3...5% количество щелочно-растворимых белков, стерилизует зерно, улучшает его усвояемость (Л.А. Складорова, 1983, И.Сапего, 1987).

Гидротермическая обработка основана на нагревании зерна в паре до 95...100°C в течение 3...5 минут с последующим плющением (Р.Р. Денисова, В.П. Елизаров, 1980). Под действием теплоты и влаги происходит частичное ферментативное расщепление, декстринизация, желатинизация крахмала и растворение протеиновых оболочек крахмаловых зерен. Последующее плющение улучшает распределение влаги во внутренних слоях, активизируя тем самым биохимические процессы. Включение в рацион молодняка крупного рогатого скота гидротермически обработанного зерна повысило среднесуточный прирост массы на 9,0...11,6% (В.В. Калинин, А.В. Самохин, 1982).

Солома — самый дешевый грубый корм для жвачных животных. На кормовые цели в Беларуси ежегодно используют около 3 миллионов тонн. Потенциально солома содержит такое же количество энергии, как и сено, однако из-за особенностей химического состава животные используют только 30...35% этой энергии. Солома не только важный кормовой ресурс, но и необходимый компонент рациона, нормализующий физиологическое состояние животных (П.С. Авраменко, О.А. Вербич, 1980). Однако структура соломы на 90% состоит из клеточных оболочек, которые практически не поддаются воздействию пищеварительных ферментов животного и транзитом выходят из организма. Задача обработки соломы состоит в разрушении лигнинных оболочек клеток ткани соломы и освобождении доступа целлюлозо-

разрушающим бактериям к клетчатке, которую они разлагают на сахара, легко усваиваемые организмом животного. Обработка соломы может повысить ее питательность с 0,18...0,22 до 0,35...0,45 и более кормовых единиц на килограмм и заметно пополнить рацион животноводства.

Мировая практика и наука улучшения кормового достоинства соломы имеет давнюю историю. Разработано значительное число способов повышения питательной ценности соломы: физико-механические (измельчение, увлажнение, сдабривание и др.), термические (запаривание, нагревание при избыточном давлении и др.), термохимические (смешивание с химреагентами и нагревание), химические (обработка едким натрием), микробиологические (силосование, ферментативная обработка, дрожжевание), радиационная обработка и другие.

Физико-механическая обработка, по мнению профессора П.А. Кормщикова, улучшает вкусовые качества и поедаемость соломы, заставляет животных больше съесть, заполняя пищеварительный тракт трудноперевариваемым "балластным" кормом. Это не дает положительного эффекта, а наоборот, приводит к снижению использования кормов, скармливаемых в смеси с соломой. Физико-механические методы не разрушают углеводно-лигнинные связи, не повышают усвояемость соломы.

Термическая обработка увлажненной соломы при высоком избыточном давлении (гидробаротермическая обработка) разработана профессором М.И. Дьяковым и другими. Сухую тюкованную солому замачивают в воде в течение 10...12 часов, загружают в автоклав и выдерживают 2,5 часа при давлении пара 0,6 МПа и температуре 150...160°C. После охлаждения ее скармливают животным. Сотрудники БелНИИЖ (П.С. Авраменко, О.А. Вербич и др.) в опытах на овцах установили высокую переваримость питательных веществ (органического вещества 69,3%, протеина 67,4%, клетчатки 68,7%). Включение соломы, обработанной по этому методу, в рацион молодняка КРС (50% питательности рациона) дало среднесуточный прирост массы 780...830 граммов.

Термохимическая обработка измельченной соломы 3%-ным раствором негашеной извести с последующим пропариванием увеличивает питательность соломы на 60...65% по сравнению с необработанной. Тепловая обработка соломы аммиаком или аммиачной водой увеличивает содержание протеина с 4% до 6%. Получены данные приростов удоев и массы животных на откорме, жирности молока (В.Е. Евстафьев, А.И. Лопатин, Р.Черных, 1975). Термохимическая обработка соломы кальцинированной содой с добавлением мочевины и поваренной соли повышает питательность соломы в 1,5...1,8 раза.

Химический способ обработки основан на смешивании измельченной соломы с концентрированным (40...45%) раствором едкой щелочи

(В. Расмус, Дания, 1975). Переваримость клетчатки увеличивается с 49,9 до 61,9% (Г.А. Богданов и др., 1975).

Микробиологическая обработка заключается в выращивании бактерий на питательных веществах соломы. Наиболее распространена ферментативная обработка, состоящая в частичном ферментативном гидролизе сложных полисахаридов целлюлозы, гемицеллюлозы, пектиновых веществ в простые легкорастворимые и усваиваемые формы с последующим выращиванием на сахарах гидролизата и соломы дрожжей. В результате содержание протеина в корме увеличивается в два-три раза. Однако, как говорил профессор П.А. Кормщиков: "... нет необходимости превращать клетчатку в сахара и выращивать затем дрожжи, если эту работу выполняют микроорганизмы в рубце животных".

Картофель. Годовой урожай в Беларуси, выраженный в кормовых единицах, превосходит в 2,0...2,4 раза урожай зерновых. Однако в кормовом балансе животноводства республики он занимает около 1,5%, что составляет примерно 0,25 миллиона тонн. Задача тепловой обработки состоит в повышении поедаемости и усвояемости питательных веществ картофеля примерно на 20%. Кроме того, при переработке картофеля на крахмал теряют значительную часть белка, находящегося в картофельном соке, который практически выбрасывают. Термические и химические способы коагуляции позволяют извлекать от 50 до 80% протеина. Повышение степени извлечения белка из картофельного сока способно сберечь до 3 тыс. тонн белка ежегодно.

Меласса — побочный продукт свекло-сахарного производства, ценный корм, содержащий в одном килограмме до 0,8 к.ед, незаменимый в дрожжевом производстве. Потребление мелассы на корм невелико. Задача тепловой обработки состоит в снижении вязкости и улучшении смешиваемости с ингредиентами комбикормов, снижении карамелизации и повышении стерильности.

Приведенные цифры, структура кормовой базы, потребность и обеспеченность кормами подтверждают значимость и неизбежность обработки как одного из направлений повышения эффективности использования и сбережения кормов.

Главная и общая проблема обработки кормов состоит в отсутствии способов, позволяющих использовать до 90...95% питательного потенциала кормовых материалов при допустимой себестоимости обработки.

Обзор работ показывает, что этой проблеме посвящены значительные интеллектуальные и материальные силы, проблема имеет глобальное значение и по некоторым кормам в достаточной степени не решена. В наибольшей мере это относится к фуражному зерну и соломе, питательный потенциал которых используют соответственно на 70...80 и 30...35% при ог-

ромном потреблении, в меньшей — к жидким кормам, продуктам переработки картофеля и корнеплодов.

Одним из направлений в решении проблемы повышения эффективности использования потенциала кормов является обработка кормовых материалов электрическим током. Электрическая энергия, в отличие от тепловой и химической, способна к комплексному — тепловому, химическому, биологическому воздействию на объект обработки. Возможно целенаправленное усиление или ослабление того или иного действия электрического тока.

Использованию электрической энергии для обработки кормовых материалов посвящены работы И. Качуро, 1932 г., П. Валуева, 1933 г., М.Е. Евреинова, В.М. Гайдука, Ю.К. Никольского, А.И. Багаева, Л.В. Куликовой и других. Наиболее широко эти вопросы изучены в БАТУ под руководством академика Л.С. Герасимовича в работах профессора В.А. Карасенко и его учеников А.Н. Барана, А.П. Камовича, В.С. Корко, М.М. Николаенка, В.А. Пашинского, П.П. Цыбульского, автора этой работы, а также И.Б. Ющенко и П.В. Кардашова. Результаты исследований подтверждают техническую, технологическую, зооигиеническую, биохимическую и экономическую эффективность обработки кормовых материалов электрическим током.

Большинство процессов обработки требуют нагревания кормового материала. Большая часть потребляемой энергии расходуется на повышение температуры, меньшая на химические и другие преобразования. Электрическая энергия, помимо комплексного действия, превосходит тепловую, как альтернативную, по равномерности и скорости проникновения в материал, более высокими энергетическими показателями. Опираясь на классические положения теплопередачи [2], сопоставим равномерность, интенсивность, энергетическую эффективность обработки кормового материала (на примере клубня картофеля) тепловой и электрической энергией.

Относительная температура Θ в любой точке шарообразного клубня при запаривании, т.е. при внешнем энергоподводе в момент времени τ :

$$\Theta(r, \tau) = \frac{t(r, \tau) - t_0}{t_c - t_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n R \exp(-\mu_n^2 F_0) \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \mu_n}, \quad (1.1)$$

где $t(r, \tau)$ — температура клубня на расстоянии r от центра в момент τ , °С; t_0 — начальная температура клубня, °С; t_c — температура пара, °С; R — радиус клубня картофеля, м; A_n — начальная тепловая амплитуда, определяемая выражением:

$$A_n = \frac{2(\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n)}{\mu_n - \sin \mu_n \cos \mu_n}, \quad (1.2)$$

где μ_n — корни характеристического уравнения;

$$\operatorname{tg} \mu = \mu(B_i - 1). \quad (1.3)$$

Критерий Био

$$B_i = \frac{\alpha R}{\lambda}.$$

Критерий Фурье

$$F_o = \frac{\alpha \tau}{R^2}.$$

Температуропроводность

$$a = \frac{\lambda}{c\rho},$$

где α — коэффициент теплопередачи от пара к клубню, Вт/(м² °С); c , ρ — удельная теплоемкость и плотность картофеля, Дж/(кг.°С), кг/м³; λ — теплопроводность картофеля, Вт/(м.°С).

Корни μ_n являются функцией критерия Био, их определяют по таблицам [2]. Для условий запаривания картофеля можно принять следующие средние значения: $\alpha=8 \cdot 10^3$ Вт/(м² °С), $\lambda=0,33$ Вт/(м.°С), $2R=6 \cdot 10^{-2}$ м. Тогда критерий $B_i \gg 800$. При $B_i > 100$ $\mu_n = n\pi$, $n=1 \dots \infty$.

Для запаривания картофеля $F_o = 0,4 \dots 0,45$ при длительности процесса $\tau = 2,5 \cdot 10^3$ с. Для приведенных значений B_i и F_o можно ограничиться первым членом суммы (1.1), соответствующего корню $\mu_n = \pi$, и $A_1 = 2$, тогда уравнение (1.1) примет вид:

$$\Theta = \frac{t(r, \tau) - t_o}{t_c - t_o} = 1 - \frac{2 \sin\left(\pi \frac{r}{R}\right) \exp\left(-\pi^2 F_o\right)}{\pi r}. \quad (1.4)$$

Перепад температур между поверхностью $\Theta_n(R, \tau)$ и центром $\Theta_n(0, \tau)$ клубня получим, положив в (1.4) $r = R$ и $r = 0$ и взяв их разность:

$$\Delta\Theta = \Theta_n - \Theta_{\text{ц}} = \frac{t_n - t_{\text{ц}}}{t_c - t_o} = 2 \exp\left(\frac{-\pi^2 \lambda \tau}{c\rho R^2}\right). \quad (1.5)$$

На рис. 1.1. показаны кривые изменения температуры поверхности и центра клубня при запаривании. Перепад температур достигает 70 °С. Прогрев клубня длится около 40 минут.

Неравномерность распределения температуры в материале и длительность процесса являются основными недостатками внешнего энергопровода. Вследствие этого неравномерная тепловая и химическая обработка, снижение качества кормов, увеличение энергоемкости процесса.

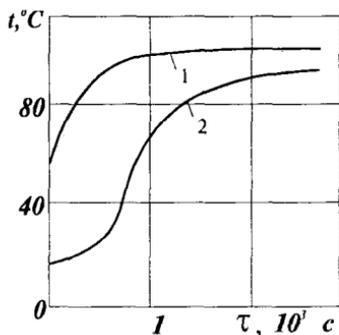


Рис. 1.1. Изменение температуры на поверхности (1) и в центре (2) клубня картофеля при запаривании.

Электрообработка, когда электрическая энергия преобразуется в тепловую и химическую непосредственно в обрабатываемом материале, уменьшает или исключает вовсе этот недостаток. Рассмотрим температурное поле того же клубня при электрообработке токами промышленной частоты. По нашим опытам [3], время обработки составляет около 180 с при межэлектродном расстоянии $2R=12 \cdot 10^{-2}$ м. В этом случае критерии $B_i=1,82$; $F_o=0,0055$. Принимая мощность внутренних источников теплоты неизменной, температурное поле в материале можно описать уравнением:

$$\Delta\Theta(x, \tau) = \frac{t(x, \tau) - t_o}{t_c - t_o} = 1 + \frac{P_o}{2} \left(1 - \frac{x^2}{R^2} + \frac{2}{B_i} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{P_o}{\mu_n^2} \right) A_n \cos\left(\frac{\mu_n x}{R}\right) \exp(-\mu_n^2 F_o), \quad (1.6)$$

где

$$P_o = \frac{\gamma E^2 R^2}{\lambda(t_c - t_o)}$$

— критерий Померанцева; x — расстояние от поверхности к центру клубня, м; γ — удельная проводимость картофеля, См/м; E — напряженность электрического поля, В/м; t_c — температура окружающей среды, °С.

Разность температур между центром ($x=R$) и поверхностью ($x=0$) нагрываемого материала:

$$\Delta\Theta = \frac{P_o}{2} - \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{P_o}{\mu_n^2} \right) A_n (1 - \cos\mu_n) \exp(-\mu_n^2 F_o). \quad (1.7)$$

Выражение (1.7) показывает, что при электрообработке неравномерность температуры значительно меньше. На рис. 1.2 изображены кривые распределения температуры в клубне толщиной $2R$ при нагреве паром и токами низкой частоты для трех моментов времени от начала нагрева. Теоретические кривые построены по (1.6).

Время тепловой обработки клубня радиусом R до температуры t из (1.4):

$$\tau = \frac{R^2}{\pi^2 a} \ln \frac{2(t_c - t_o)}{t_c - t}. \quad (1.8)$$

Скорость обработки при использовании тепловой энергии

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{2(t_c - t_o)\pi^2 a \exp(-\pi^2 F_o)}{R^2}, \quad (1.9)$$

при электрообработке

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\gamma E^2}{c\rho} \exp\left(-\frac{\alpha\tau}{c\rho R}\right). \quad (1.10)$$

Скорость увеличения температуры при внешнем энергопроводе пропорциональна температурному напору, коэффициенту температуропроводности и обратно пропорциональна квадрату радиуса клубня. Этим и объясняется неравномерность нагрева как отдельных, так и разных размеров клубней.

При электрообработке, когда имеет место прямой ввод энергии, скорость увеличения температуры зависит, в основном, от объемной плотности вводимой энергии и теплоемкости материала, поэтому время обработки и сокращается в 8...10 раз.

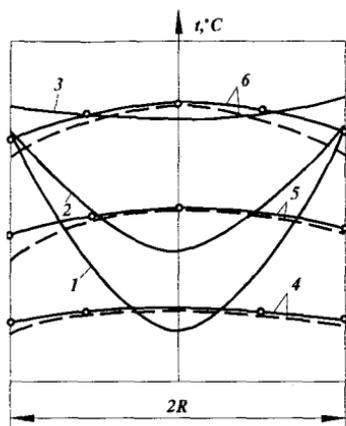


Рис. 1.2. Температурное поле в массе корма толщиной $2R$ при запаривании (1,2,3) и электрообработке (4,5,6) : штриховые линии — теоретические; время (с) от начала нагрева 1 - 0; 2 - 750; 3 - 2500; 4 - 30; 5 - 100; 6 - 155.

В таблице 1.1. приведены величины поверхностной ΔP_s и объемной ΔP_v плотности энергии, скорость изменения температуры $\partial t/\partial \tau$ и время τ при тепловой (запаривание) и электрической обработке клубня картофеля.

1.1. Сравнительные показатели способов обработки

Способы обработки	ΔP_s , 10^6 Вт/м^2	ΔP_v , 10^9 Вт/м^3	$\partial t/\partial \tau$, $^\circ\text{C/с}$	τ , 10^3 с
Запаривание	0,4...0,8	0,30...0,45	0,05...0,06	1,5...2,4
Электрообработка	0,5...1,0	1,5...8,0	0,3...0,4	0,18...0,30

Для оценки энергозатрат при тепловой и электрической обработке на примере картофеля примем обобщающий показатель, используемый при народнохозяйственной оценке экономичности вариантов, — коэффициент полезного использования энергоресурсов:

$$\eta_{\text{пэ}} = \eta_{\text{ст}} \eta_{\text{эс}} \eta_{\text{ип}} \eta_{\text{э}} \eta_{\text{т}}, \quad (1.11)$$

где $\eta_{\text{ст}}$, $\eta_{\text{эс}}$, $\eta_{\text{ип}}$, $\eta_{\text{э}}$, $\eta_{\text{т}}$ — коэффициент полезного действия соответственно электростанции, энергосистемы, источника питания, электрической и тепловой установки для обработки корма.

Произведение $\eta_{\text{ст}} \eta_{\text{эс}} \eta_{\text{ип}} = \eta_{\text{пр}}$ называют коэффициентом преобразования энергии, а $\eta_{\text{э}} \eta_{\text{т}} = \eta_{\text{у}}$ представляет собой КПД установки.

В табл. 1.2. приведены значения энергетических коэффициентов и относительных значений приведенных затрат на единицу полезно использованной энергии.

Результаты сравнения способов по техническим и энергетическим критериям показывают высокую равномерность и скорость электрообработки и необходимость внимательного энергетического обоснования ее использования с целью электротепловой обработки.

1.2. Энергетические показатели способов обработки

Способ обработки	$\eta_{\text{пр}}$	$\eta_{\text{э}}$	$\eta_{\text{г}}$	$\eta_{\text{у}}$	$\eta_{\text{из}}$	Производственные затраты, %	
						н	ц
Запаривание	0,60	—	0,58	0,58	0,35	100	100
Электрообработка	0,30	0,9	0,95	0,85	0,26	130	70

В табл. 1.2.: н — народнохозяйственная оценка; ц — по ценам и тарифам.

Многообразие электрических методов обработки сельскохозяйственной продукции не всегда обеспечивают равномерность температурного поля и связанных с ним других процессов в обрабатываемом материале. Электромагнитная волна затухает по мере проникновения в материал по зависимости:

$$\Delta P = \gamma E^2 \exp(-kx), \quad (1.12)$$

где ΔP — объемная плотность мощности электромагнитного излучения в материале на расстоянии x от его поверхности, Вт/м³; γ — удельная проводимость материала, См/м; E — напряженность электрического поля, В/м; k — постоянная затухания, 1/м.

Для токов низкой частоты $\gamma = 1/\rho$, для токов высокой частоты $\gamma = \omega \epsilon_a \operatorname{tg} \delta$, где ρ — удельное сопротивление материала, Ом·м; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота, 1/с; ϵ_a — диэлектрическая проницаемость материала, Ф/м; $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь.

Постоянная затухания

$$k = 2\omega \sqrt{\frac{\mu_a \epsilon_a}{2} \left(1 + \frac{\gamma^2}{\omega^2 \epsilon_a^2} \right)^{0,5}} - 1 \quad (1.13)$$

зависит от частоты электрического тока, магнитной μ_a и диэлектрической ϵ_a проницаемости материала.

В табл. 1.3. на примере картофеля показана глубина проникновения электрической энергии $z = 1/k$ в зависимости от способов ее ввода. Исходя из глубины проникновения электромагнитной энергии и требований равномерности тепловой и связанной с ней химической обработки, к кормовым

материалам применимы токи низкой и высокой частоты. Однако при высокочастотном нагреве не исключена неравномерность из-за различий электрических свойств компонентов корма и, в частности, их электрической проводимости и диэлектрической проницаемости.

1.3. Глубина проникновения электромагнитной энергии в картофель

Способ подвода энергии	Токи низкой частоты, 50 Гц	Токи высокой частоты, 10 МГц	Токи СВЧ, 2400 МГц	Инфракрасные лучи, $3 \cdot 10^{-6}$ м	Косвенный нагрев
Глубина проникновения, м	$5 \cdot 10^5$	2,5	0,025	0,006	0

Сопоставление электрических способов по величине вводимой мощности и скорости (табл. 1.4) подтверждает также эффективность использования электрического тока низкой частоты в качестве побудителей теплового и химического действия на кормовой материал.

Вышеизложенное показывает, что одним из направлений в решении проблемы повышения эффективности использования питательного потенциала кормовых материалов может быть их обработка электрическим током низкой частоты, основанная на тепловом, химическом и биологическом действиях электрического тока. Это направление работы в достаточной мере не обобщено, отсутствуют теоретические и практические основы создания технологий и оборудования обработки кормов электрическим током.

1.4. Плотность энергии при различных способах нагрева

Способ электронагрева	Частота тока, Гц	Плотность энергии		Скорость нагрева, °C/с
		10^3 Вт/м ²	10^9 Вт/м ³	
Косвенный	—	80...120	0,25	0,04...0,05
Низкочастотный	50	500...1000	1,5...8	0,30...0,40
Высокочастотный	10^7	75...200	3...7	—
СВЧ	10^8	1000...2000	1...2	0,25...0,30
Инфракрасный	10^{14}	30...100	—	—

Цель работы состоит в создании научно-технических основ процессов, технологий и оборудования обработки фуражного зерна, соломы, мелассы и картофельного сока электрическим током, обеспечивающих минимальную себестоимость продукции в результате повышения усвояемости и сохранности кормов, снижения энерго- и ресурсозатрат.

Задачи работы включают: раскрытие технологических основ взаимодействия электрического тока с кормовым материалом; разработку электро-

технологических процессов повышения питательности фуражного зерна, соломы и других кормов; разработку технических основ создания оборудования для обработки кормов электрическим током.

1.2. Электрохимические процессы обработки

Ткань соломы состоит из клеточных элементов, которые содержат в себе целлюлозу, гемицеллюлозу, лигнин, в также в небольшом количестве различные жиры, воски, смолы, красящие и неорганические вещества. Например, пшеничная солома включает в отношении к абсолютно сухой массе лигнина — 18, альфацеллюлозы — 32, пентозаны — 23, прочих гемицеллюлоз — 14, спиртобензойного экстракта — 5, золы — 8% [4].

Целлюлоза — это полисахарид, молекулы которого построены из звеньев β -D-глюкопиранозы, соединенных глюкозидной связью 1-4. Эмпирическая формула целлюлозы $(C_6H_{10}O_5)_n$, структурная формула показана на рис. 1.3, а.

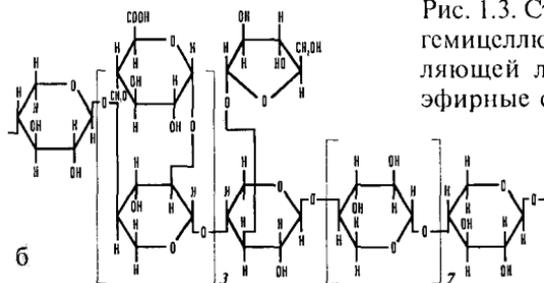
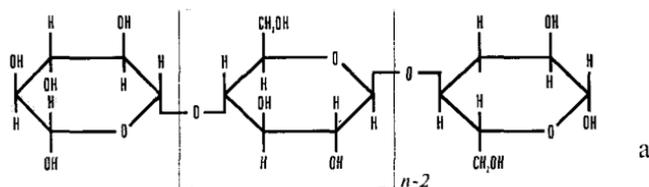
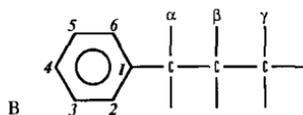


Рис. 1.3. Структурные формулы целлюлозы (а), гемицеллюлозы (б), фенолпропановой составляющей лигнина (в), где α, β, γ ... простые эфирные связи.



Гемицеллюлозы — полисахариды, состоящие из глюкозных звеньев со степенью полимеризации менее 200, и углеводы, образованные гектозой, пентозой и их соединениями с уоновыми кислотами. Наиболее важная гемицеллюлоза соломы это 4-0-метилглюкуроноарабоксилан (рис. 1.3, б).

Лигнин имеет структурную формулу, полностью не изученную. Экспериментально установлено наличие фенолпропановых структурных единиц, бензойные кольца которых частично замещены метоксильными группами (рис. 1.3, в). В лигнине отсутствует единый вид связи между структурными

единицами, для него характерно многообразие связей, в результате его макромолекула обладает большой разветвленностью. Предполагают, что лигнин является пространственным полимером, т.е. имеет сетчатую структуру.

Организм животного не переваривает лигнин и сравнительно легко усваивает гемицеллюлозы и пектиновые вещества. Целлюлоза разлагается микроорганизмами пищеварительного тракта животного и также усваивается. Однако пространственная структура лигнина с большим количеством реакционных связей затрудняет доступ целлюлозоразлагающим бактериям к целлюлозе, а ферментам к гемицеллюлозе и пектиновым веществам. Для повышения усвояемости питательных веществ организмом животного необходимо разрушить лигнин и его связи в структуре соломы.

Клетка соломы (рис. 1.4) состоит из первичной P и вторичной S стенок. Первичная образована преимущественно лигнином с небольшой примесью целлюлозы и гемицеллюлозы. Вторичная представляет собой главную массу объема стенки клетки, она состоит из нескольких слоев, которые содержат целлюлозу, гемицеллюлозу и лигнин. В слое S_1 присутствует 60...90% лигнина. В слое S_2 его содержание уменьшается до нуля от наружной к внутренней стенке, а целлюлоза составляет до 85% от углеводной части. В слое S_3 содержание целлюлозы невелико. Гемицеллюлоза расположена преимущественно в межклеточном веществе и в первичной стенке.

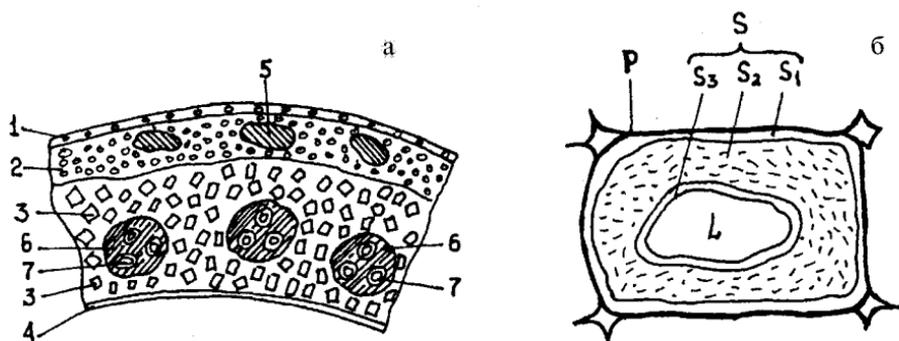


Рис. 1.4. Поперечный разрез стебля соломы (а) и микроскопическое строение клеточной стенки (б) : 1 — наружная кожа; 2 — ситовидная ткань с лубяными волокнами; 3 — паренхимная ткань; 4 — остатки сердцевины; 5 — полость с остатками плазмы; 6 — сосудисто-волокнистые пучки; 7 — кольцевые и спиральные сосуды, окруженные волокнами; P — первичная стенка; S_1 — наружный слой вторичной стенки; S_2 — средний слой вторичной стенки; S_3 — внутренний слой вторичной стенки; L — полость клетки.

При химической, щелочной обработке соломы активным, действующим является ион OH^- , который разрушает простые эфирные связи, обра-

зует новые фенольные гидроксилы, уменьшает молекулярную массу лигнина [5]. Деструкция лигнина происходит в основном по α - и β -0-4 эфирным связям (рис. 1.5, 1.6). В процессе реакции лигнин разрушается и освобождает целлюлозу. Реакция распада может идти как в щелочной, так и в кислой среде. Щелочная предпочтительнее, т.к. в кислой среде одновременно с разрушением звеньев лигнина идет и их сшивание [6].

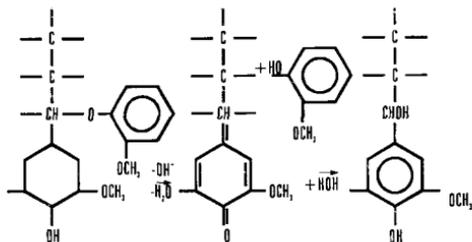


Рис. 1.5. Расщепление структур лигнина с алкиларной связью.

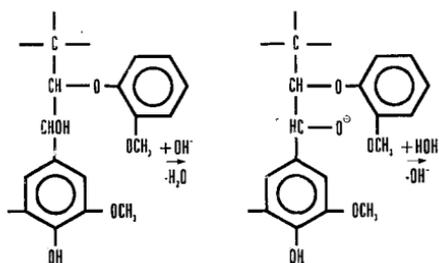
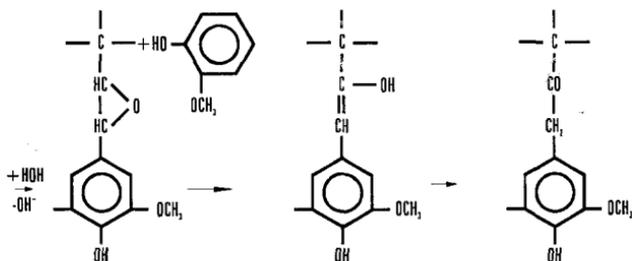


Рис. 1.6. Расщепление структур лигнина с простой эфирной связью.



Зерно содержит около 70% крахмала, примерно 14% белка, 2% жира, 2...5% клетчатки, 1,6...2,8% золы и влаги (рис. 1.7). Основные изменения свойств вещества зерна происходят в результате превращений в крахмале. Крахмал состоит из полисахаридов, амилазы и амилопектина, которые построены из остатков D-глюкопиранозы, соединенных α -1,4 гликозидными связями. В местах ветвления гликозидные остатки присоединены к основной

цепи α -1,6 связями. Макромолекулы амилопектина представляют собой сильно разветвленные цепи, а амилаза — линейные или слабоветвленные цепи (рис. 1.8.). Крахмал содержит 20...30% амилазы и 70...80% амилопектина [7].

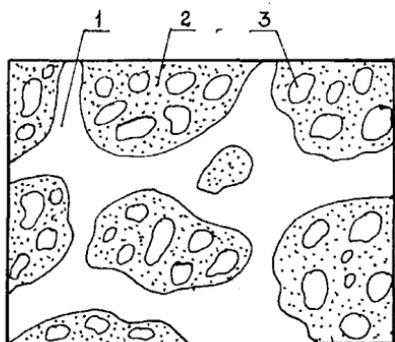
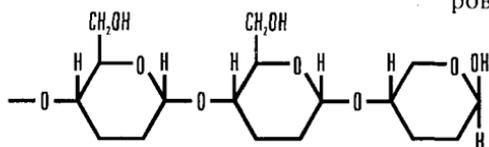


Рис. 1.7. Микроструктура эндосперма зерна : 1 — оболочка клеток; 2 — протоплазма; 3 — гранулы крахмала; точки — включения белка, жира, белковые и жировые прослойки.



(a)

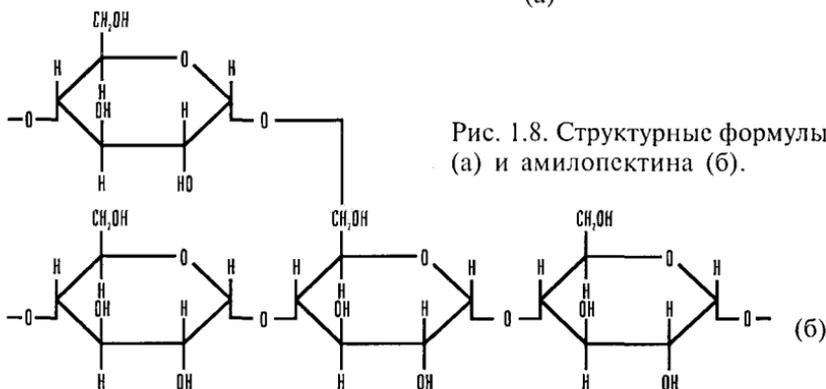


Рис. 1.8. Структурные формулы амилазы (а) и амилопектина (б).

Задача повышения питательности зерна состоит в клейстеризации крахмала. Действующим фактором начала клейстеризации считают ион гидроксония H_3O^+ , который образуется при диссоциации воды. Ион действует в линейной фракции на связь 1-4, а в нелинейной — на связи 1-6 [7]. Схема клейстеризации крахмала показана на рис. 1.9. Реакция протекает с поглощением энергии. Есть и другие предположения. Например, Раковский [15] указывает, что крахмал слабо адсорбирует кислоты и значительно лучше

адсорбирует щелочи. В.И. Назаров считает, что и катионы и анионы влияют на клейстеризацию [16].

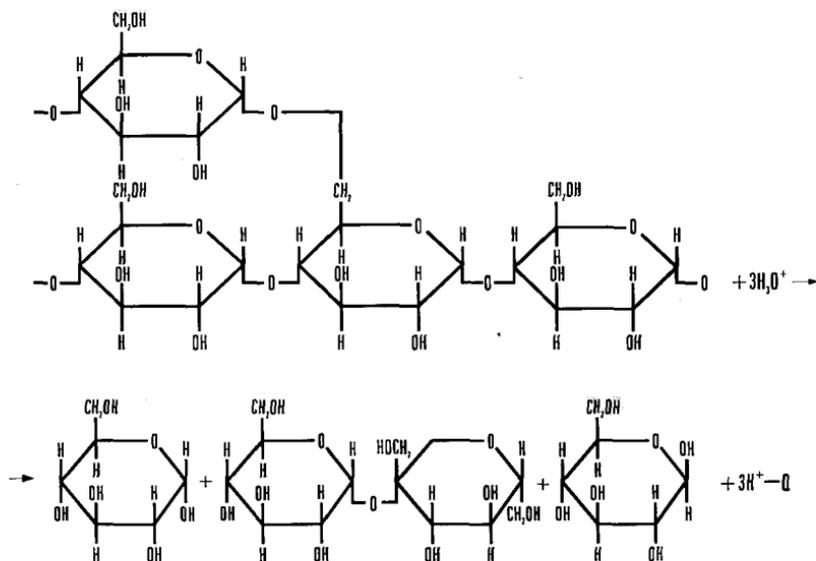


Рис. 1.9. Схема процесса клейстеризации крахмала.

Картофельный сок представляет собой устойчивый коллоидный раствор и содержит до 17% сухих веществ, состоящих из органических веществ, азотистых соединений (4...5% от массы, 50...70% из них белки), ферментов и витаминов. В нем содержится до 22 аминокислот. Минеральный состав представлен солями, в которые входят железо, сера, хлор, цинк, калий и микроэлементы — медь, бром, марганец, кобальт. Одним из направлений повышения эффективности переработки картофеля является выделение сухих веществ из картофельного сока путем коагуляции.

В настоящее время общепринята физическая теория коагуляции Дерягина-Ландау-Фервея-Овербека (ДЛФО), в которой степень устойчивости коллоидной системы определяют из баланса молекулярных сил притяжения и электростатических сил отталкивания. Устойчивость коллоидной системы и, наоборот, способность к коагуляции зависит от знака и величины суммарной энергии взаимодействия, обусловленной сложением ионно-электростатической энергии отталкивания и энергии межмолекулярного притяжения Ван-дер-Ваальса-Ландона.

Теория электрокоагуляции коллоидных систем предложена В.Р. Эстрела-Льописом [8], который утверждает, что в электрическом поле к энергиям электростатического отталкивания и межмолекулярного притяжения добавляется энергия взаимодействия поляризованных частиц (диполь-дипольного взаимодействия). Под действием поляризационных сил притяжения частицы сближаются на расстояния, при которых электростатические силы отталкивания, возникающие за счет перекрытия диффузных двойных слоев, уравнивают силы притяжения. На этих расстояниях преобладание суммарных поляризационных сил Ван-дер-Ваальса приводит к слипанию коллоидных частиц, происходит коагуляция.

Таким образом, устойчивость коллоидной системы в электрическом поле определяется балансом энергий электростатического отталкивания W_s , межмолекулярного притяжения W_m и диполь-дипольного взаимодействия частиц W_d (рис. 1.10):

$$W = W_s + W_m + W_d. \quad (1.15)$$

Для двух сферических взаимодействующих частиц энергия электростатического отталкивания

$$W_s = 16\epsilon_0\epsilon_c \left(\frac{RT}{F}\right)^2 th^2 \left(\frac{\Psi_0 z_i e}{4kT}\right) \frac{a}{S} e^{-\chi a(S-2)}, \quad (1.16)$$

где, ϵ_0 — электрическая постоянная Ф/м; ϵ_c — относительная диэлектрическая проницаемость коллоидной среды; R — газовая постоянная, Дж/(моль К); Ψ_0 — полный потенциал, В; z_i — валентность иона; e — заряд электрона, Кл; k — постоянная Больцмана, Дж/К; a — размеры частицы, м; χ — параметр Дебая-Гюккеля, 1/м.

$$\chi = \sqrt{\frac{8\pi e^2 \Sigma n_i z_i}{\epsilon_0 \epsilon_c kT}}, \quad (1.17)$$

$$S = h/a + 2,$$

где h — расстояние между частицами, м.

Энергия межмолекулярного притяжения

$$W_m = -\frac{A}{6} \left(\frac{2}{S^2 - 4} + \frac{2}{S^2} + \ln \frac{S^2 - 4}{S^2} \right), \quad (1.18)$$

$$W_D = -4\epsilon_o\epsilon_c \left[0,5 - 3 \frac{\operatorname{ch}\left(\frac{\Psi_o z_i e}{2kT}\right) - 1}{4\operatorname{ch}\left(\frac{\Psi_o z_i e}{2kT}\right) + \chi a} \right]^2 \left(\frac{a}{S}\right)^3 E^2, \quad (1.19)$$

где A — постоянная Гамакера, Дж; E — напряженность электрического поля, В/м.

Коагуляция происходит в случае, когда энергия молекулярного притяжения и дипольного взаимодействия превосходит энергию электростатического отталкивания, т.е. при отрицательном знаке суммарной энергии (рис. 1.10).

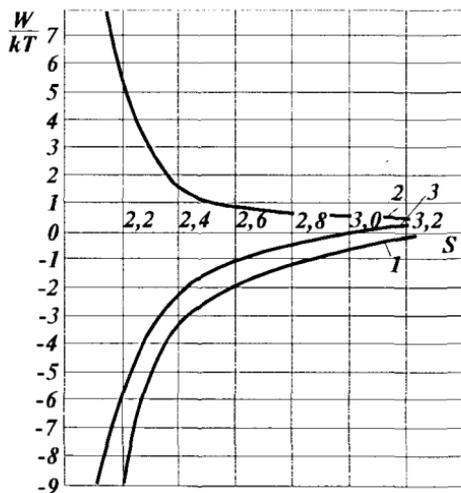


Рис. 1.10. Энергетические кривые молекулярного притяжения (1), электростатического отталкивания (2) и суммарная (3).

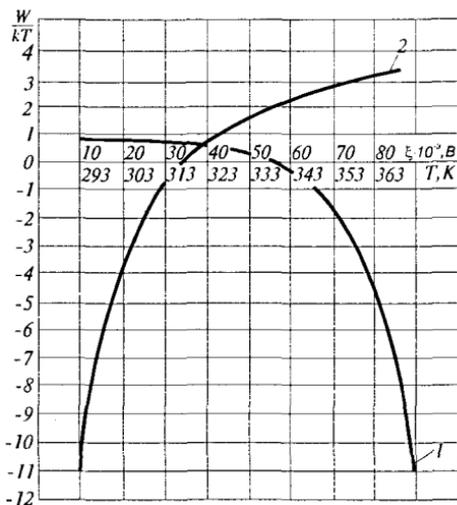


Рис. 1.11. Зависимость суммарной энергии взаимодействия от температуры обработки (1) и электрокинетического потенциала (2).

Анализ уравнения (1.15) показал, что суммарная энергия взаимодействия коллоидных частиц в наибольшей мере зависит от температуры T и потенциала диффузной части двойного слоя Ψ_o . Напряженность электрического поля не оказывает заметное влияние на суммарную энергию взаимо-

действия частиц (рис. 1.11). Следовательно, возможны тепловая и химическая коагуляции растворов белков.

Тепловая коагуляция будет происходить при температуре выше 60 °С. Ее очевидный недостаток — высокая энергоемкость, вызванная необходимостью нагревания сока.

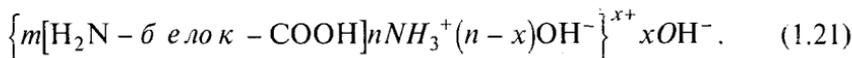
Химическая коагуляция возможна при потенциале $\Psi_0 = (30...40)10^{-3} \text{В}$ (рис. 1.11). Так как Ψ_0 -потенциал не поддается экспериментальному определению, его заменяют на электрокинетический потенциал ξ (дзета-потенциал), близкий по значению. Следовательно, для коагуляции необходимо снизить ξ -потенциал растворов белков до 30 мВ и ниже.

На величину электрокинетического потенциала, особенно растворов белков, сильно влияет рН среды, т.к. ионная атмосфера, возникающая вокруг мицеллы белка, содержит либо OH^- , либо H^+ ионы в зависимости от рН среды. В целом строение растительных белковосодержащих мицелл можно изобразить следующим образом:

кислая и слабокислая среда



щелочная и слабощелочная среда



Предпочтительная адсорбция ионов водорода или гидроксила объясняется их высокой способностью к адсорбированию из-за малого радиуса и большой подвижности.

Значение ξ -потенциала в кислой среде имеет положительный знак, а в щелочной среде — отрицательный. В изоэлектрической точке (ИЭТ) значение ξ -потенциала равно 0, и строение мицеллы белка будет:



В ИЭТ белки сворачиваются в клубки и выпадают в осадок (коагулируют). Для различных растворов белков значение ИЭТ лежит в диапазоне рН от 2 до 11, для картофельного сока изоэлектрическая точка соответствует рН ≈ 4,8. Следовательно, меняя значение рН и тем самым величину ξ -потенциала, можно воздействовать на суммарную энергию взаимодействия мицелл белка и в целом управлять процессом коагуляции.

Таким образом, делегнификация соломы, деструкция крахмала зерна, коагуляция белков растительных соков — это процессы химические,

глубина и кинетика которых существенно зависят от водородного показателя и температуры среды. Из существующих способов задания определенных значений рН и температуры наиболее приемлемым, на наш взгляд, является электрохимический — электролиз кормовой среды или водного раствора солей, увлажняющего корм. Выбором рода тока, состава электролита, режимов обработки, конструктивного исполнения рабочей камеры можно изменять температуру и рН и тем самым усиливать термическое, химическое или совместное действие электрического тока. Кроме того, согласно представлениям о протекании электрохимических процессов, внешнее электрическое поле влияет на скорость химических реакций за счет изменения концентрации реагирующих веществ (увеличения диссоциации, массопереноса), уменьшения активационного барьера. Изменяя параметры электрического поля можно воздействовать и на характер (тепловая, химическая или комбинированная обработка), и на скорость термохимических процессов в кормовых материалах. Применительно к обработке соломы и зерна в водных растворах химерагентов, коагуляции белков растительных соков наиболее значимо химическое действие электрического тока. При обработке таких кормов как меласса, картофель, обрат преимущественный интерес представляет тепловое влияние тока.

Применительно к электролизу водных растворов кормовых материалов большое значение имеет род тока (постоянный, переменный) и его величина, конструкция электролизной (рабочей) камеры (бездиафрагменная или с использованием диафрагмы), вид растворяемой соли. Водный раствор соли должен обладать хорошей проводимостью, что важно для проведения электролиза, и не действовать вредно на организм животных. С этой точки зрения и учетом зоотехнических рекомендаций наиболее подходящими являются растворы NaCl и NaNO_3 до 1,5%, Na_2CO_3 до 5%.

Применительно к обработке соломы и зерна возможны следующие случаи электролиза на постоянном токе с использованием нерастворимых электродов (т.е. таких материалов электродов, для которых $\varphi_{\text{OX/RED}} > \varphi_{\text{H}_2}$, если они используются в качестве катода, и $\varphi_{\text{OX/RED}} > \varphi_{\text{O}_2}$, если они используются в качестве анода).

1. Электролиз соли A_kB_p , содержащий катионы A^{p+} с потенциалом выделения более отрицательным, чем потенциал водородного электрода φ_{H_2} и анионы B^{k-} с потенциалом выделения более положительным, чем потенциал кислородного электрода φ_{O_2} (рис. 1.12.).

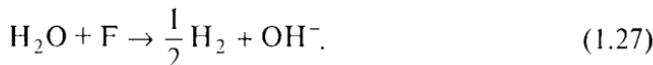
В этом случае при давлении $1 \cdot 10^5$ Па и 25°C

$$\varphi_{\text{H}_2} = -0,0591 \text{ рН}, \quad (1.23)$$

$$\varphi_{\text{O}_2} = 1,228 - 0,0591 \text{ рН}, \quad (1.24)$$

$$+Me/A_k B_p, H_2O/Me-. \quad (1.25)$$

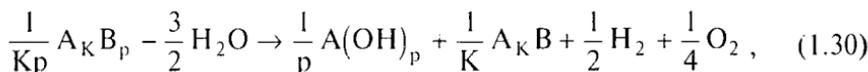
Реакция на аноде (1.26) и на катоде (1.27)



Реакция переноса на аноде (1.28) и на катоде (1.29)



Суммарная реакция



где n — число переноса катионов.

В этом случае неизбежна реакция нейтрализации прикатодной щелочи и прианодной кислоты. Необходима разделительная мембрана, при которой скорость накопления H^+ и OH^- зависит от вида мембраны (катион-анионообменной или неактивной) и вида электролита. Для водных растворов Na_2CO_3 , $NaCl$ и $NaNO_3$ лучше использовать анионообменную или неактивную мембрану, для которой число переноса анионов больше числа переноса катионов.

Накопление кислотности в анолите или щелочности в катиолите K , мг-экв/л, можно рассчитать по формулам [11, 12]:
неактивная мембрана

$$K_H = \frac{1}{F} \int_0^{D_T} (n_{КАТ} + n_{АН}) dD_T, \quad (1.31)$$

катионообменная мембрана

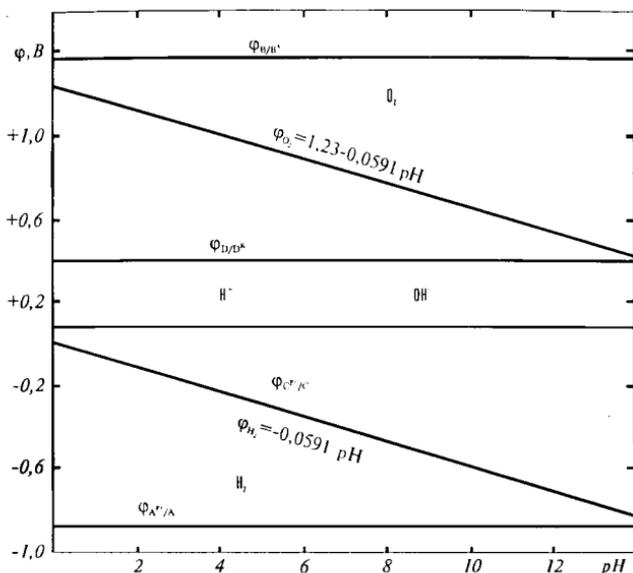


Рис. 1.12. Диаграмма устойчивости воды в контакте с окислительно-восстановительными системами A^{P+}/A , B/B^{K-} , C^{P+}/C , D/D^{K-} .

$$K_K = \frac{1}{F} \int_0^{D_T} n_{\text{КАТ}} dD_T, \quad (1.32)$$

анионообменная мембрана

$$K_A = \frac{1}{F} \int_0^{D_T} n_{\text{АН}} dD_T, \quad (1.33)$$

где $D_T = I \tau / V_p$ — расход тока, Кл/м³; I — ток, А; τ — продолжительность протекания тока, с; V_p — объем обрабатываемого раствора, м³.

При проведении электролиза с использованием диафрагм концентрация ионов соли и pH изменяются со временем и в анолите и в катодите, что ведет к изменению величины чисел переноса ионов. Так для электролиза с использованием анионообменной мембраны для раствора NaNO_3 в случае равенства объемов катодита и анолита число переноса иона NO_3^- находят решением системы уравнений:

$$n_{\text{OH}^-} = \frac{\left(C_{\text{OH}^-} + n_{\text{OH}^-} \frac{D_T}{F} \right) C_{\text{OH}^-}}{\left(C_{\text{OH}^-} + n_{\text{OH}^-} \frac{D_T}{F} \right) C_{\text{OH}^-} + \left(C_{\text{NO}_3^-} - n_{\text{NO}_3^-} \frac{D_T}{F} \right) C_{\text{NO}_3^-}}, \quad (1.34)$$

$$n_{\text{NO}_3^-} = \frac{\left(C_{\text{NO}_3^-} - n_{\text{NO}_3^-} \frac{D_T}{F} \right) C_{\text{NO}_3^-}}{\left(C_{\text{OH}^-} + n_{\text{OH}^-} \frac{D_T}{F} \right) C_{\text{OH}^-} + \left(C_{\text{NO}_3^-} - n_{\text{NO}_3^-} \frac{D_T}{F} \right) C_{\text{NO}_3^-}}, \quad (1.35)$$

где C — концентрация реагирующих веществ.

При проведении бездиафрагменного электролиза изменение C_{OH^-} в прикатодной и C_{H^+} в прианодной зонах:

$$C_{\text{OH}^-} = C_{\text{OH}^-} + \eta_{\text{OH}^-}^{\text{K}} \frac{I\tau}{FV_p}, \quad (1.36)$$

$$C_{\text{H}^+} = C_{\text{OH}^-} + \eta_{\text{H}^+}^{\text{a}} \frac{I\tau}{FV_p}. \quad (1.37)$$

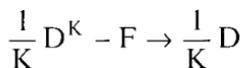
Увеличение или уменьшение рН будет происходить из-за разницы выхода по току $\eta_{\text{H}^+}^{\text{a}}$ и $\eta_{\text{OH}^-}^{\text{K}}$ и будет незначительно:

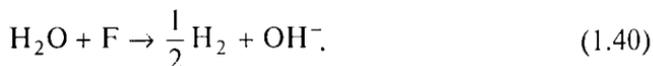
$$\Delta C = \frac{I\tau}{FV_p} \left(\eta_{\text{H}^+}^{\text{a}} - \eta_{\text{OH}^-}^{\text{K}} \right). \quad (1.38)$$

2. Электролиз раствора соли $A_K D_p$, содержащей катионы A^{p+} с потенциалами выделения более отрицательными, чем потенциал водородного электрода, и анионы D^{K-} с потенциалами выделения менее положительными, чем потенциал кислородного электрода (рис. 1.12)



Реакция на аноде и на катоде



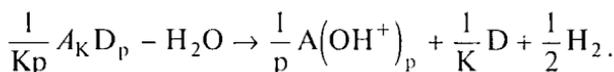


Реакция переноса на аноде (1.41) и на катоде (1.42)

$$-\frac{1}{p} nA^{p+} + \frac{1}{K} (1-n)D^{K-}, \quad (1.41)$$

$$\frac{1}{p} nA^{p+} - \frac{1}{K} (1-n)D^{K-}. \quad (1.42)$$

Суммарная реакция



На аноде разряжаются ионы D^{K-} , на катоде выделяется водород. В прикатодной области образуется щелочь, что повышает pH всего объема электролита в бездиафрагменном электролизере или анолита в диафрагменном.

Случай электролиза раствора соли $C_K D_p$, при котором происходит выделение на электродах продуктов электролиза C и D , не рассматриваем, поскольку изменений pH не предполагается.

Из рассмотренных случаев электролиза на постоянном токе наиболее приемлем первый с использованием разделительной мембраны. Электролиз растворов NaCl , Na_2CO_3 , NaNO_3 относится к первому случаю и требует разделительной мембраны. Числа переноса анионов в растворах этих солей больше, чем числа переноса катионов, поэтому наиболее быстрое изменение pH католита и анолита будет при использовании анионообменной диаграммы, согласно уравнениям (1.31)...(1.33).

Электролиз растворов солей на переменном токе существенно отличается от электролиза на постоянном токе. На переменном токе увеличивается степень диссоциации электролита (так называемый "эффект диссоциации полем" или "второй эффект Вина") и уменьшается миграция ионов под действием поля. Окисление или восстановление ионов на электродах будет определяться значением результирующего тока $I = I_a - I_k$ при окислении или $I = I_k - I_a$ при восстановлении, что, в свою очередь, связано с затруднениями при протекании реакций электрохимического восстановления или окисления соответственно. Следует отметить, что увеличение частоты тока нивелирует это различие и приводит к снижению выхода по току

[9]. Торможение анодной или катодной реакций связано, как правило, с замедлением таких стадий процессов на электродах, как возникновение и разрушение пассивирующих слоев, перезарядка ионов высшей валентности до низшей, рекомбинация и электрокристаллизация на поверхности электрода, разрушение комплексов и др.

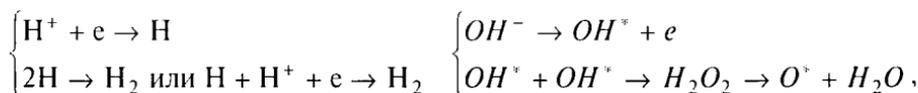
Наложение переменного тока не только увеличивает диссоциацию слабых электролитов, устраняет концентрационную поляризацию, но и изменяет структуру двойного электрического слоя (ДЭС), приводя к дегидратации ионов во внешней плоскости Гельмгольца, сжиманию всего ДЭС, и тем самым к снижению энергии активации электрохимической реакции, что приводит к увеличению ее скорости:

$$I = KC' \exp \left[- \frac{\alpha(\varphi - \Psi_1)F}{RT} \right],$$

где C' — поверхностная концентрация ионов; $\varphi - \Psi_1$ — падение потенциала в гельмгольцевской части ДЭС; K — константа скорости.

Анализ этого уравнения показывает, что увеличение C' и Ψ_1 , обусловленное действием переменного тока, вызывает возрастание скорости электрохимической реакции. По-видимому, электролиз на переменном токе будет протекать при значительно меньших перенапряжениях.

Согласно [9] механизм протекания электролиза воды на переменном токе может быть следующим:



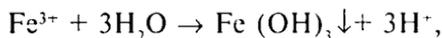
где * — активный неустойчивый радикал.

Дегидратация ионов приведет не только к ускорению электрохимических реакций в растворах, но и других реакций, что важно для осуществления делигнификации и клейстеризации.

Характер химических реакций, надежность и качество процесса обработки зависят от материала электродов, подводящих ток к кормовому материалу. Железные электроды — аноды на постоянном токе растворяются:



и образуют плохо растворимый гидроксид



который понижает рН среды при электролизе растворов солей по первому, выше рассмотренному варианту. Использование в качестве анода угольных или графитовых электродов приводит к их частичному разрушению из-за окисления воды в их порах [10]. Отсутствие диффузии и пониженная плотность тока в порах графитовых и угольных электродов ускоряют реакцию окисления OH^- с образованием O_2 , который, в свою очередь, окисляет углерод до CO_2 . Растворение CO_2 в воде снижает ее рН до значений 6,0...6,5 за счет реакции [11]:



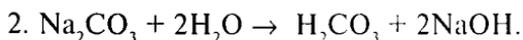
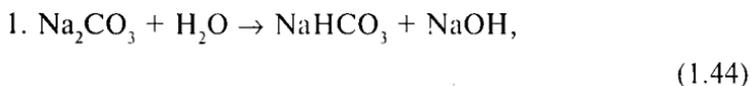
Однако разрушение графитовых или угольных электродов в результате реакции (1.43) не будет оказывать существенного биологического воздействия на корм, как разрушение стальных анодов и выпадение $\text{Fe}(\text{OH})_2$ и $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Разрушение графита и угля пропорционально их пористости.

Наилучшее сочетание при обработке на постоянном токе — стальной катод и графитовый анод или оба электрода из графита.

На переменном токе в водном растворе солей (NaCl , Na_2CO_3 , NaNO_3) металлические электроды будут разрушаться из-за образования в катодный полупериод интерметаллических соединений типа $\text{Pt}(\text{Na})$, которые разлагаются в анодный полупериод, причем лимитирующей стадией является скорость образования сплава. Максимальное разрушение в этих условиях происходит на частоте 50...75 Гц, выше 200 Гц такого не наблюдается [9]. Поэтому на переменном токе наиболее устойчивы угольные и графитовые электроды.

Электролиз водного раствора NaNO_3 на постоянном токе протекает по схеме, рассмотренной в первом случае. Происходит разложение воды и выделение водорода в прикатодном пространстве. При наличии диафрагмы рН увеличивается в катодите и уменьшается в анолите и остается неизменным в бездиафрагменном электролизере. Наиболее быстро рН изменяется при анионообменной мембране ($n_{\text{NO}_3} = 0,584$). На переменном токе изменений рН не происходит. Имеет место разложение H_2O .

Электролиз водного раствора Na_2CO_3 также протекает по схеме, описанной в случае 1. Отличие от реакций с NaNO_3 состоит в том, что внесение Na_2CO_3 изменяет рН раствора за счет гидролиза, так как это соль слабой кислоты и сильного основания:



Протекание гидролиза Na_2CO_3 на первой или второй ступени зависит от начального рН среды, поэтому рН раствора принимает значение от $\text{pH}_1 =$

$10,2 + 0,5 \lg C_{\text{соли}}$ до $\text{pH}_2 = 12,6 + 0,5 \lg C_{\text{соли}}$. При концентрации Na_2CO_3 5% pH раствора составляет 11,4, если допустить, что гидролиз Na_2CO_3 протекает на 50 % на первой и настолько же на второй ступенях. При отсутствии разделительной мембраны заметных изменений pH не происходит ни на переменном, ни на постоянном токе. Процесс сопровождается выделением водорода на катоде и кислорода на аноде. При использовании анионообменной мембраны ($n_{0,5\text{CO}_3^{2-}} = 0,584$) pH католита увеличивается выше исходного, а анолита снижается. Электролиз водного раствора NaCl теоретически относят к рассмотренному первому случаю. Однако в зависимости от условий электролиза параллельно на аноде могут протекать реакции окисления ионов Cl^- . На рис. 1.13 показаны зависимости окислительно-восстановительного потенциала различных окислительно-восстановительных пар для хлора. При определенных pH и соотношениях $[\text{OX}]/[\text{RED}]$ возможно выделение Cl_2 в результате окисления ионов Cl^- на аноде при низких pH . Поэтому электролиз раствора NaCl на постоянном токе сопровождается выделением на аноде в малом количестве хлора и кислорода, и на катоде — водорода. Это приведет к некоторому росту pH даже при отсутствии мембраны. При использовании мембран изменение pH большее. На переменном токе имеет место одновременное выделение на электродах O_2 , Cl_2 , H_2 .

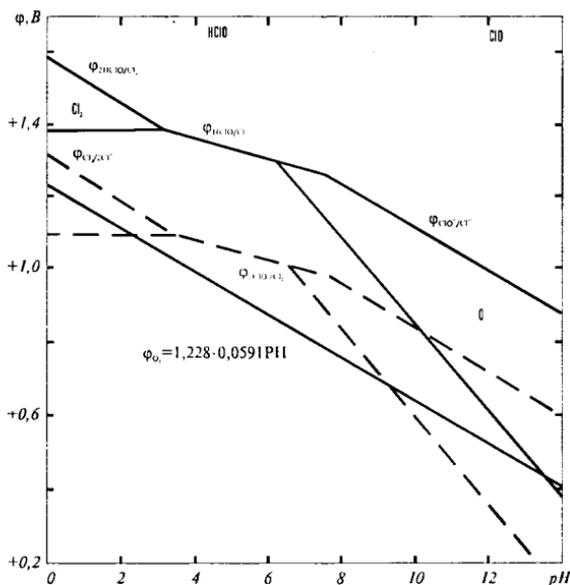


Рис. 1.13. Диаграмма электрохимического состояния системы “хлор-вода” :
 - - $-\lg[\text{OX}]/[\text{RED}] = 0$; - - $-\lg[\text{OX}]/[\text{RED}] = -10$.

С целью выбора оптимального случая электролиза солей NaCl, Na₂CO₃, NaNO₃ сопоставим их характеристики (табл. 1.6).

1.5. Характеристики водных растворов солей

Вид соли	Концентрация в растворе,		Удельная проводимость, См/м	Эквивалентная ионная проводимость, См·м ² /моль	Перенапряжение на электродах, В, при К=1, i=1000А/м ² , l=0,5 м
	%	г-экв/л			
NaCl,	1,5	0,26	4,61 [12]	92 · 10 ⁻⁴ [12]	109
Na ₂ CO ₃ ,	1,5	0,18	1,5 [12]	—	330
NaNO ₃	5,0	1,0	4,51 [13]	4,55 · 10 ⁻⁴ [13]	110

Величины перенапряжения на электролизере (расстояние между электродами l = 0,5 м) и удельной электрической проводимости (табл.1.5.) показывают, что наиболее подходящими для электролиза являются соли NaCl и Na₂CO₃. Однако следует учесть и возможные побочные процессы. По данным [14] при электролизе 0,1 моль/л раствора NaCl выход по току Cl₂ достигает 10%, что увеличивает энергозатраты и может создать небезвредные условия изменения pH. Поэтому сравним методом расчета электролиз водных растворов 1,5% NaCl и 5% Na₂CO₃ по числам переноса ионов 0,5 CO₃²⁻, OH⁻, Cl⁻, OH⁻, pH анолита и католита, изменению щелочности и кислотности в зависимости от расхода тока (рис. 1.14, 1.16). При использовании NaCl и Na₂CO₃ равные значения pH достигаются примерно за одно и то же время. Например, при плотности тока 1000 А/м² и напряжении на электродах 220 В крайние значения pH, равные 1 и 12, будут достигнуты примерно за 17 мин (рис. 1.14). Более быстрое изменение чисел переноса соответствует раствору NaCl. Поскольку полезный расход тока на электролиз пропорционален числу переноса ионов, то электролиз NaCl произойдет с меньшими затратами энергии (рис. 1.15). Изменение содержания щелочности и кислотности в растворе NaCl также происходит быстрее (рис. 1.16).

Расчет зависимости чисел переноса выхода по току, щелочности (кислотности) от расхода тока выполнен по формулам (1.33)...(1.35). В уравнения для определения чисел переноса (1.34, 1.35) входит несколько переменных. Для упрощения вычислений числа переноса находили через каждые 250 Кл/л и вносили поправку на изменение значений этой величины и концентрации ионов при прохождении этого количества электричества через раствор. В расчетах не учтено влияние изменения диффузии на pH и концентрации при внесении обрабатываемой массы в исходный раствор.

Таким образом, электрический ток, протекающий через солому и зерно, увлажненные водным раствором солей, изменяет pH среды. Величи-

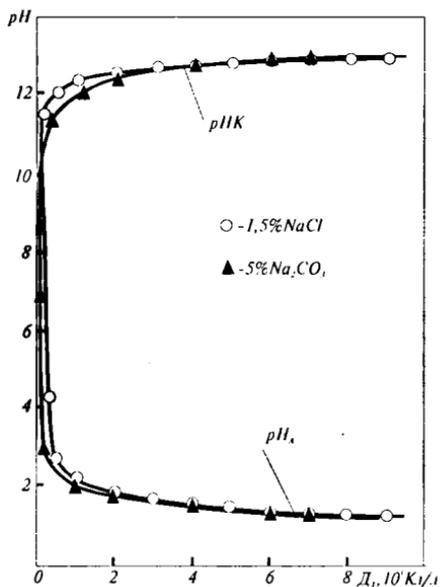


Рис. 1.14. Зависимость рН от расхода тока D_T при анионообменной мембране.

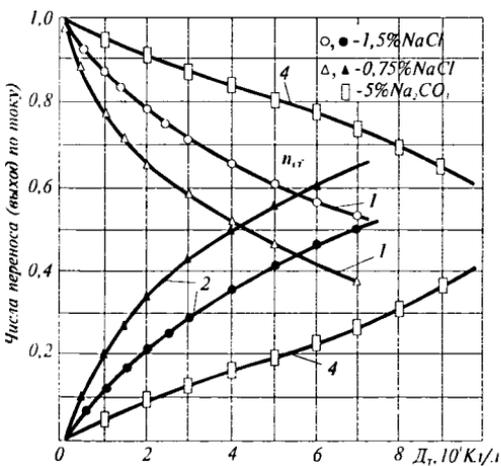


Рис. 1.15. Зависимость чисел переноса ионов $0,5 \text{ CO}_3^{2-}$ (1), OH^- (2,3), Cl^- и выхода по току (1,4) при электролизе Na_2CO_3 и NaCl от расхода тока D_T с анионообменной мембраной.

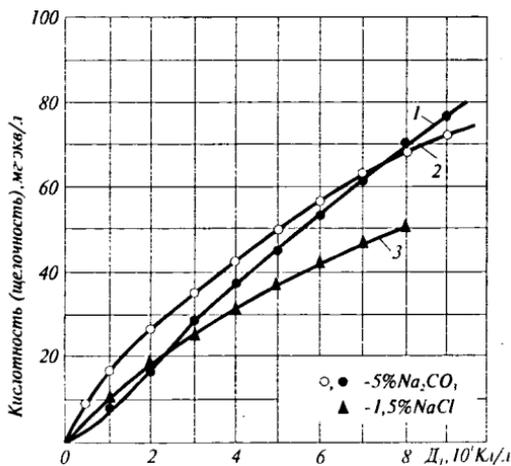
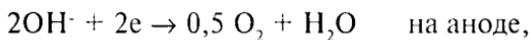


Рис. 1.16. Зависимость кислотности (1,3) и щелочности (2,3) от расхода тока D_T при анионообменной мембране.

на изменений и полезные энергозатраты зависят от вида тока, химвещества и конструкции электролизера (рабочей камеры). Наиболее широкий диапазон и быстрое изменение pH достигается на постоянном токе при электролизе водного раствора NaCl с использованием анионообменной мембраны. Скорость изменения pH несколько ниже, а энергозатраты незначительно выше при таком же электролизе Na₂CO₃. Кроме того, электролиз поваренной соли сопровождается выделением хлора, что может быть нежелательным. На переменном токе основными действующими факторами являются не изменение pH среды, а усиление диссоциации электролита, снижение концентрационной поляризации, дегидратация ионов, снижение энергии активации химических реакций и увеличение их скорости.

Картофельный сок, представляющий собой раствор аминокислот и таких органических как лимонная, щавелевая, яблочная, являющихся слабыми электролитами, имеет в естественном состоянии pH≈6,5, что говорит о невысокой преобладающей концентрации ионов водорода (C_{H⁺}≈3,2 · 10⁻⁷ г-ион/л). При проведении электрохимической обработки картофельного сока без добавки электролита и без разделительной мембраны основной процесс представляет собой электролиз воды:



При отсутствии разделительной мембраны изменение pH не произойдет, т.к. убыль ионов H⁺ и OH⁻ эквивалентна. Учитывая, что подвижность ионов водорода значительно выше таковой ионов гидроксила (γ_{H⁺} = 0,03497 См·м²/г-экв, γ_{OH⁻} = 0,01976 См·м²/г-экв [11]) необходимо использовать катионообменные мембраны для изменения pH.

1.6. Влияние обработки на переваримость ржаной соломы

Переваримость соломы, %	Вид обработки				
	Без обработки, контроль	Нагрев в термостате	Электрический ток		
			50 Гц	Постоянный	
			pH=2...3	pH=11...12	
Среднее значение	12,49	16,7	22,5	30,6	38,2
Повышение к контрольному	—	33,8	80,1	245	306

Экспериментальные исследования электрохимической обработки соломы, ячменя, картофельного сока показали взаимосвязь между родом тока, количеством электричества, химической активностью среды и температу-

рой, с одной стороны, и изменением питательных свойств и степени коагуляции белков, с другой стороны.

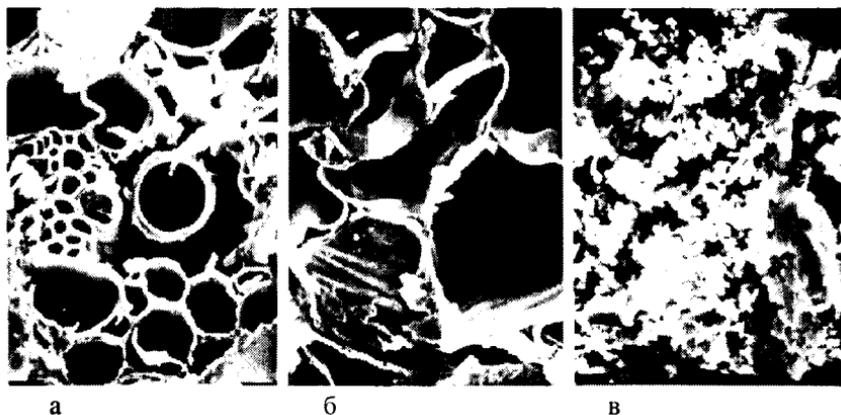


Рис. 1.17. Изменение структуры ткани соломы (x450): а — без обработки; б — обработка током промышленной частоты ; в — электрохимическая обработка в щелочной среде.

Переваримость соломы (табл. 1.6.) определена в БелНИИЖ методом *in situ* на фистульных бычках черно-пестрой породы в возрасте 6 месяцев, которым скармливали сенаж из многолетних трав и комбикорм. Образцы соломы перед инкубированием измельчались до резки величиной 3...5 мм. Продолжительность инкубации составляла 24 часа, образцы каждого варианта соломы находились в рубце трех различных бычков в течение указанного времени. На рис. 1.17 показаны фотографии микросрезов ткани соломы до и после обработки.

Переваримость ячменя (табл. 1.7) исследована в БелНИИЖ методом *in vitro* (по методике В.В. Попова, Е.Т. Рыбина, 1983 г.).

1.7. Влияние обработки на переваримость зерна ячменя

Переваримость, %	Вид обработки					
	Без обработки, контроль	Нагрев в термостате	Электрический ток			
			50 Гц	Посто- янный	Постоянный	
					pH=2...4	pH=10...12
Среднее значение	49,1	50,8	58,3	58,7	73,5	76,4
Повышение к контрольному	—	3,5	18,7	19,5	49,7	55,6

Измельченную солому увлажняли водным раствором 1,5% NaCl+5% Na₂CO₃ в соотношении массы воды к массе соломы один к одному. Содержание химических реагентов дано в отношении к массе воздушно-сухой соломы.

Зерно ячменя, разрушенное на вальцовой плющилке, увлажняли водным раствором поваренной соли. На один килограмм зерна вносили 0,8...1,2 кг воды и 1,5% NaCl.

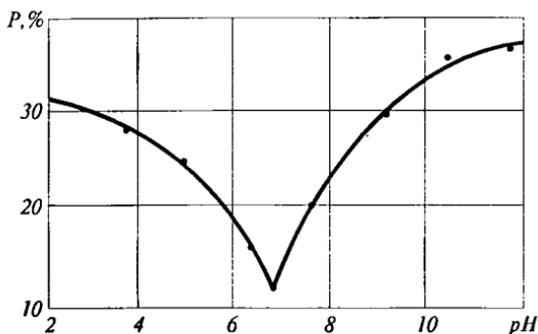


Рис. 1.18. Зависимость переваримости ржаной соломы от pH на постоянном токе.

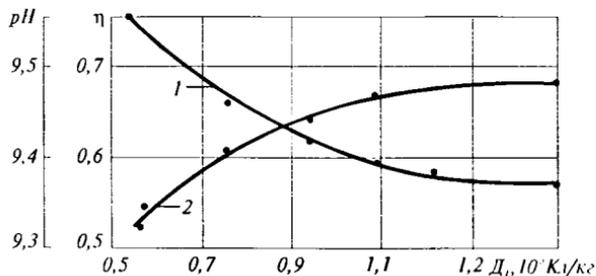


Рис. 1.19. Зависимость pH(1) и глубины обработки η (2) ржаной соломы от расхода переменного тока.

Солому и зерно обрабатывали током промышленной частоты, постоянным и с разделительной мембраной, до температуры, принятой при традиционной тепловой обработке (зерно 75...80 °С, солома 85...95 °С). Продолжительность обработки стремились сохранить равной во всех опытах. Количество электричества регулировали изменением напряженности электрического поля. Водородный показатель вытяжки из обрабатываемого корма определяли общепринятым методом. После обработки образцы корма отжимали, высушивали при температуре 25...35 °С и отправляли на зоотехнический анализ.

Сравнительные исследования способов коагуляции белка проведены в лаборатории транспорта и регуляции обмена веществ растений ИЭБ АН РБ (табл. 1.9).

1.8. Влияние обработки на коагуляцию белков картофельного сока

Показатели коагуляции	Способ коагуляции				
	Тепловой, контроль	Химический	Термохимический	Электро-термический	Электрохимический pH=4...5
Конечная температура обработки, °С	70	20	70	70	40
Выход белка, %	78	53	85	87	97
Выход белка к контрольному, %	—	-32	+8,9	+11,5	+24,3
Относительная энергоёмкость, о.е.	1	0,42	0,92	0,90	0,46

Обработка соломы в кислой и щелочной средах, созданных постоянным электрическим током с разделительной мембраной, повышает переваримость корма в 2,5...3 раза (рис. 1.18).

На переменном токе при том же составе химреагентов и той же температуре переваримость увеличивается на 80% (табл. 1.6). Изменения pH на переменном токе незначительны. По данным М.М. Николаенка и А.Н. Барана, переменный ток изменяет величину водородного показателя на 2...3% и увеличивает глубину обработки на 28...30% (рис. 1.19).

Обработка зерна на постоянном токе с разделительной мембраной увеличивает переваримость ячменя на 50% в кислой и 55% в щелочной средах (рис. 1.20). Переменный и постоянный ток оказывает примерно равное действие, повышающее переваримость зерна ячменя на 18...20% (табл.1.7). По данным В.С. Корко и В.А. Пашинского, степень клейстеризации крахмала зерна ячменя при обработке на переменном токе до 75...80°C возрастает с 45 до 72%, что также повышает его переваримость и усвояемость (рис. 1.21).

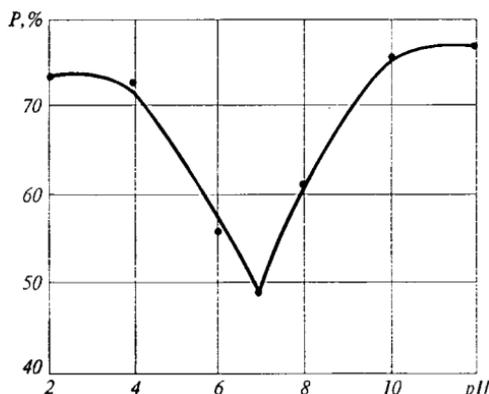


Рис. 1.20. Зависимость переваримости зерна ячменя от pH на постоянном токе.

Переваримость корма, обработанного в щелочной среде по сравнению с кислой, выше на 4% для зерна и на 25% для соломы. Возможно, щелочная среда не только углубляет деструкцию внутренних связей в ткани корма, но и создает более благоприятные условия усвоения питательных веществ в пищеварительном тракте животного.

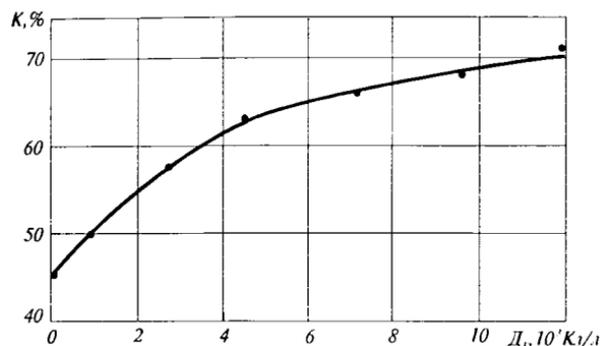


Рис. 1.21. Зависимость степени клейстеризации крахмала зерна ячменя от расхода переменного тока.

Следует иметь в виду, что изменение рН происходит одновременно с увеличением температуры. Кроме того, влияет концентрация химреагентов, модуль увлажнения корма и другие факторы (измельчение, вид соломы или зерна). Полученные зависимости (рис.1.18, 1.20) справедливы в диапазоне температур от 10 до 90 °С. Отклонение экспериментальных данных от среднего значения составляет до 10 %.

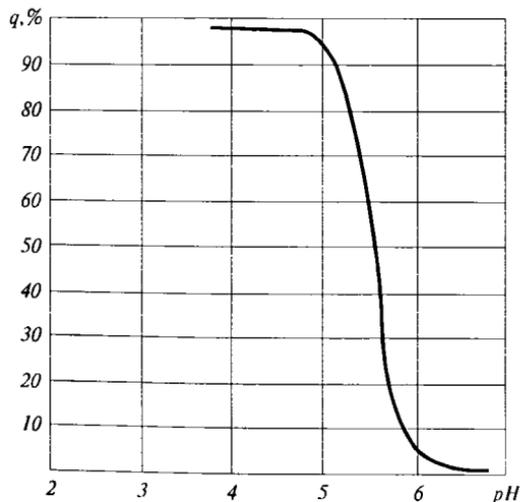


Рис. 1.22. Зависимость выхода белков от рН картофельного сока при температуре 30...40 °С.

Коагулируемость и выход белков картофельного сока сильно зависят от рН показателя среды. Его влияние более значимо, чем температуры. Например, изменение температуры от 20 до 40 °С увеличивает коагуляцию и выход белка только на 1,8...2,0 %, в то время как изменение рН от 6,5 до 4,5...5,2 в этом диапазоне температур коагулирует до 97 % белков (рис. 1.22). Максимум выхода белков соответствует их изоэлектрическим точкам, лежащим в диапазоне рН от 4,6 до 4,8. Увеличение кислотности изменяет ξ -потенциал белковых молекул картофельного сока:

$$\xi = 0,04 \text{ рН} - 0,19 \quad (1.45)$$

В то же время водородный показатель зависит от расхода тока (рис. 1.23):

$$\text{рН} = 6,5 - 2 \cdot 10^{-4} D_T \quad (1.46)$$

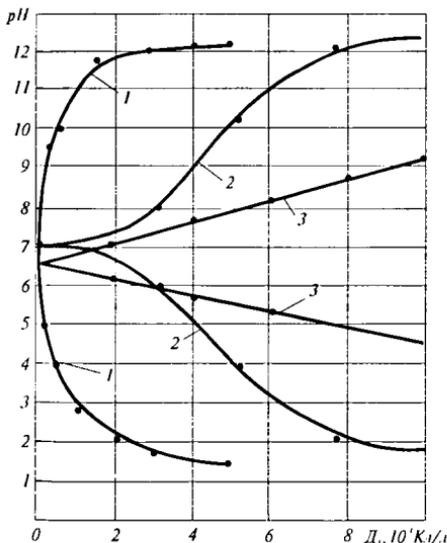


Рис. 1.23. Зависимость рН ржаной соломы (1), зерна ячменя (2), сока картофеля (3) от расхода тока D_T .

Подставив (1.45) и (1.46) в (1.16) и (1.19), получим зависимость энергии электростатического отталкивания (1.47) и дипольного взаимодействия (1.48) молекул от рН и расхода тока:

$$W_3 = 16\epsilon_0\epsilon_c \left(\frac{RT}{F} \right)^2 \text{th}^2 \left(\frac{(6,9 \cdot 10^{-2} - 110^{-5} D_T) z_i e}{4kT} \right) \frac{a}{S} e^{-\lambda a(S-2)} \quad (1.47)$$

$$W_{\text{д}} = -4\varepsilon_0\varepsilon_c \left[0,5 - \frac{3\text{ch}\left(\frac{(6,910^{-2} - 110^{-5} D_T)z_i e}{2kT}\right) - 1}{4\text{ch}\left(\frac{(6,910^{-2} - 110^{-5} D_T)z_i e}{2kT}\right) + \chi a} \right]^2 \quad (1.48)$$

Суммарная энергия взаимодействия белковых молекул (1.15) становится отрицательной уже при $\xi = (30...35)10^{-3}$ В, что приводит к коагуляции. Этому потенциалу соответствуют расход тока $(8...8,5) 10^3$ Кл/кг и водородный показатель 4,6...5,0.

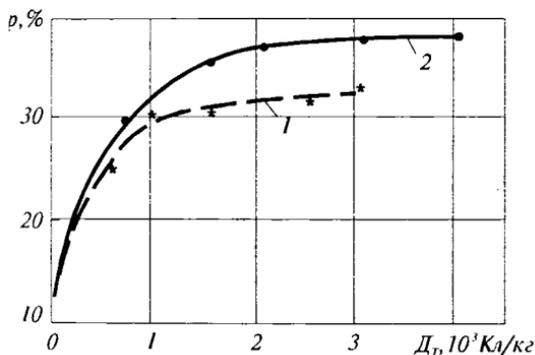


Рис. 1.24. Зависимость переваримости ржаной соломы от расхода постоянного тока: 1 — кислая; 2 — щелочная среда.

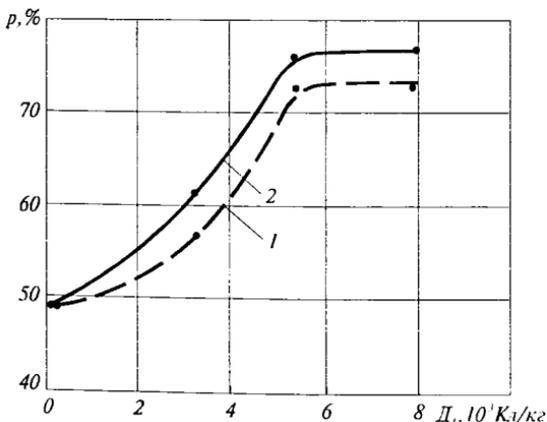


Рис. 1.25. Зависимость переваримости зерна ячменя от расхода постоянного тока: 1 — кислая; 2 — щелочная среда.

Сравнительный анализ способов коагуляции показывает значительные энергетические и технологические преимущества электрохимической коагуляции белков (табл. 1.8.).

Характер изменения щелочности и кислотности зависит от вида корма и расхода тока (рис. 1.23). Вид корма влияет на ионный состав электролита и его изменение в процессе обработки. При обработке сока картофеля ионный состав раствора изменяется, в основном, количественно в результате перераспределения ионов по катодной и анодной зонам рабочей камеры. Удаление из раствора белковых молекул не нарушает линейного изменения рН католита и анолита. При обработке соломы и зерна нелинейное изменение щелочности и кислотности водного раствора можно объяснить выделением в раствор продуктов деструкции лигнина, клетчатки и клейстеризации крахмалов.

Характер изменения переваримости соломы и зерна, выхода белков из сока в зависимости от расхода тока (рис. 1.24...1.26) схож. Эти зависимости построены по экспериментальным данным (рис. 1.18, 1.20, 1.22, 1.23) и достоверны в пределах условий опытов.

Их аналитическое описание может быть получено из уравнения баланса количества электричества:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2 ,$$

где dQ , dQ_1 , dQ_2 — количество электричества, подводимое к корму, расходуемое на изменение питательности корма, теряемое в окружающую среду, Кл.

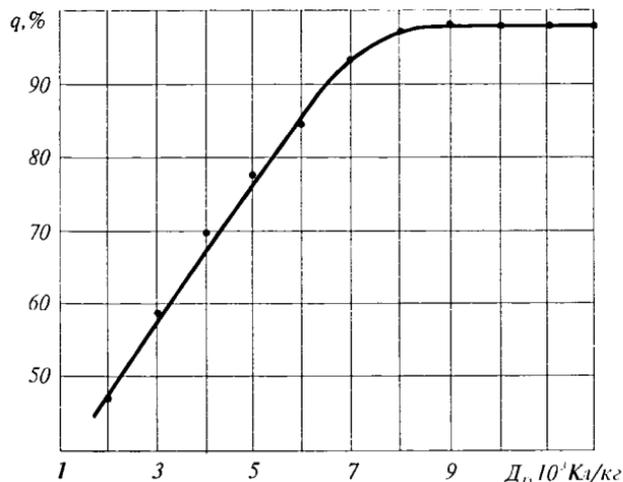


Рис. 1.26. Зависимость выхода белков картофельного сока от расхода тока.

Составляющие баланса:

$$dQ = mdD_T; dQ_1 = mqdp; dQ_2 = Km(p-p_n)dD_T, \quad (1.49)$$

где m — масса корма, кг; dD_T — изменение расхода тока в процессе обработки, Кл/кг; q — электрохимический эквивалент изменения питательности, Кл/(кг · о.е.); dp — изменение питательности (выхода белка и т.п.) в процессе обработки, о.е.; K — потери питательности, 1/о.е.; p_n, p — начальная и текущая питательность, о.е.

Уравнение (1.49) можно записать в виде

$$dD_T = qdp + K(p-p_n)dD_T, \text{ или } \frac{qdP}{KdD_T} + p - \left(p_n + \frac{1}{K}\right) = 0. \quad (1.50)$$

Обозначим электрохимическую постоянную процесса, Кл/кг,

$$K_T = \frac{q}{K},$$

установившуюся питательность (при $dp/dD_T = 0$)

$$p_y = p_n + \frac{1}{K}.$$

Тогда дифференциальное уравнение (1.50) примет вид:

$$K_T \frac{dP}{dD_T} + p - p_y = 0,$$

решение которого

$$p = p_n e^{-D_T/K} + p_y (1 - e^{-D_T/K}). \quad (1.51)$$

Электрохимические постоянные для процессов: обработки ржаной соломы — $K_{Tc} = 1 \cdot 10^3$ Кл/кг; обработки зерна ячменя — $K_{Tz} = 1,5 \cdot 10^3$ Кл/кг; коагуляции белков картофельного сока — $K_{Tк} = 2,3 \cdot 10^3$ Кл/кг.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований подтверждают химическое действие электрического тока на изменение питательных свойств кормовых материалов. Характер и глубина влияния при принятых химических добавках и температуре зависят от рода тока и количества электричества, щелочности и кислотности обрабатываемой среды.

1.3. Температурное поле при электрообработке

Температура влияет на физические, химические и биологические процессы, определяет глубину и энергоемкость обработки кормов. Температурное поле должно быть равномерным, только в этом случае возможно одинаковое изменение свойств корма в зоне обработки. Нагревание, химические и другие преобразования происходят при протекании электрического тока через кормовую смесь, перемещаемую между токоподводящими электродами. Причинами различной температуры могут быть неоднородность электрических и теплофизических свойств по объему кормосмеси, неравномерность электрических полей, различия в скорости перемещения отдельных компонентов и частей корма в зоне обработки и др. Предварительная подготовка должна формировать кормосмесь с однородными по объему физическими свойствами. Форма и взаимное расположение токопроводящих электродов должны создавать равномерное перемещение материала в равномерном электрическом поле.

В практике наиболее распространены электродные системы в виде плоской или коаксиальной трубы (рис. 1.27). Рассмотрим температурное поле таких систем при наличии внутреннего источника теплоты с учетом зависимости физических параметров среды от температуры и условий движения. Поток движущейся среды разделим на две области: ядро — составляющее основную часть материала, в котором отсутствует зависимость $t(y)$ и скорость v частиц постоянна, и пристенную — так называемый погранслой, — для которого характерны прилипание отдельных частиц корма к электродам и наличие зависимости $v(y)$ и $t(y)$.

Уравнение теплопроводности для плоских электродов (рис 1.27, а) имеет вид :

$$\frac{v\partial t(x,y)}{\partial x} = \frac{a\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{q_v}{\rho_c c_c}$$

или

$$\frac{\partial t(x,y)}{\partial x} = \frac{a}{v} \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{q_v}{\rho_c v c_c}, \quad (1.52)$$

где t — текущая температура материала, °С; a — температуропроводность, м²/с; q_v — объемная плотность внутреннего источника теплоты, Вт/м³; v — скорость перемещения материала, м/с.

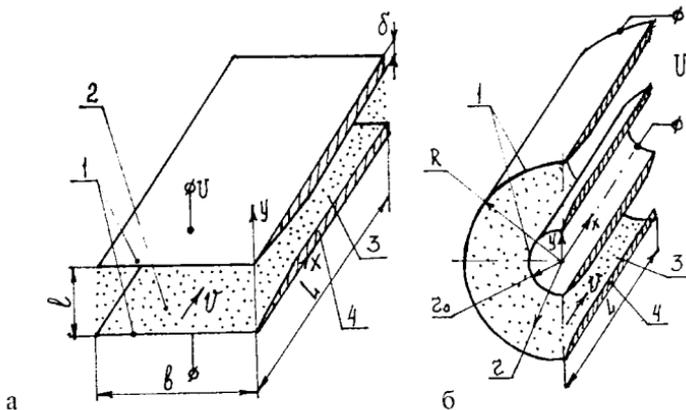


Рис. 1.27. Схемы к расчету температурного поля плоской (а) и коаксиальной (б) электродных систем: 1 — токопроводящие электроды; 2 — кормовая смесь; 3, 4 — ядро и погранслоя.

Граничные условия имеют вид :

$$t(0, y) = t_a, \lambda \nabla t(y=0; y=L) = \alpha(t - t_c),$$

где t_a — начальная температура материала, °С; t_c — температура окружающей среды, °С; λ — теплопроводность, Вт/(м · °С).

Пренебрегая членом

$$\left(\frac{a}{v} \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right),$$

учитывающим влияние на ядро потока теплоты из погранслоя, получим уравнение:

$$\frac{\partial t(x, y)}{\partial x} = \frac{q_v}{\rho_c v c_c}.$$

Таким образом, без учета температуры погранслоя для ядра:

$$t(x) = \int_0^x \frac{q_v dx}{\rho_c v c_c}.$$

Интегрируя, получим:

1.9. Изменение температуры по длине плоской электродной системы

Длина электрода, м	Температура, °С		
	ядра	погранслоя	разность
Солома, 600 кг/м ³ , 700 В/м, 0,003 м/с, t _к ≈ 90°С			
0,000	12,0	12,0	0,0
0,001	12,0	11,8	0,6
0,201	15,4	14,8	0,7
0,407	20,8	20,4	0,4
0,613	29,6	29,7	-0,1
0,819	47,2	48,1	-0,9
0,919	64,0	65,6	-1,6
1,005	89,7	92,4	-2,7
Зерно, 400 кг/м ³ , 1400 В/м, 0,003 м/с, t _к ≈ 80°С			
0,000	12,0	12,0	0,0
0,011	12,8	11,8	1,0
0,101	25,4	23,1	2,4
0,131	34,6	31,5	3,1
0,161	51,0	46,6	4,4
0,191	88,2	80,7	7,5
Меласса, 1400 кг/м ³ , 4000 В/м, 0,003 м/с, t _к ≈ 60°С			
0,000	12,0	12,0	0,0
0,101	15,4	12,2	3,5
0,201	24,0	16,0	5,0
0,307	32,9	25,1	7,8
0,398	60,0	45,7	14,3

$$t(x) = t_a + \frac{q_v x}{\rho_c \nu c_c}$$

Так как $q_v = \gamma_{ic} E^2$:

$$t(x) = t_a + \frac{\gamma_{ic} E^2}{\rho_c \nu c_c}, \quad (1.53)$$

где γ_{ic} — удельная электрическая проводимость кормосмеси при температуре t , См/м; E — напряженность электрического поля в кормосмеси, В/м.

Формула (1.53) описывает распределение температуры в материале без учета влияния температуры погранслоя.

1.10. Изменение температуры по длине коаксиальной электродной системы

Длина электрода, м	Температура, °С			
	средне-взвешенная	у внутреннего электрода	у наружного электрода	разность
Солома, 600 кг/м ³ , 700 В/м, 0,003 м/с, t _к ≈ 90°С				
0,000	12,0	12,0	12,0	0,0
0,300	17,0	33,6	13,8	19,7
0,600	25,4	70,3	17,0	53,3
0,850	38,9	128,7	22,0	106,7
Зерно, 400 кг/м ³ , 1400 В/м, 0,003 м/с, t _к ≈ 80°С				
0,000	12,0	12,0	12,0	0,0
0,050	16,7	23,6	14,4	9,2
0,100	24,6	42,8	18,3	24,5
0,150	40,0	80,5	26,1	54,5
0,170	51,2	108,0	31,7	76,3
Меласса, 1400 кг/м ³ , 4000 В/м, 0,003 м/с, t _к ≈ 60°С				
0,000	12,0	12,0	12,0	0,0
0,100	15,1	16,5	14,2	2,3
0,200	19,3	22,7	19,2	7,4
0,300	25,5	31,7	21,7	10,0
0,400	35,6	46,3	29,0	17,4
0,500	54,7	74,0	42,6	31,4

Оценим влияние погранслоя на распределение температуры в ядре по длине электродов. Введем среднюю по сечению материала температуру :

$$\bar{t}(x) = (1/l) \int_0^l t(x, y) dy \quad (1.54)$$

Интегрируя (1.54) по $(1/l) \int_0^l dy$, получим:

$$\frac{\partial \bar{t}(x)}{\partial x} = -\frac{2a[\nabla t_y]}{lv} + \frac{q_v}{\rho_c v c_c} \quad (1.55)$$

Множитель 2 возникает из-за влияния теплообмена между двумя электродами и ядром. Знак минус означает противоположную направленность ∇t_y и потока теплоты от погранслоя к ядру.

Интегрируя (1.55), получим:

$$\bar{t}(x) = -2a / (1\nu) \int_0^x [\nabla t_y] dx + \int_0^x [q_v dx / (\rho_c \nu c_c)]. \quad (1.56)$$

Для расчета $\bar{t}(x)$ по (1.56) необходимо знать ∇t_y на расстоянии $y=\delta$, так как теплообмен идет на границе погранслоя, толщина которого δ . Для подвижного материала в погранслое уравнение энергии имеет вид:

$$\frac{v(y)\partial t}{\partial x} = \frac{a\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\gamma_{tc} E^2}{\rho_c c_c}, \quad (1.57)$$

так как для ядра:

$$\frac{v_x \partial t}{\partial x} = \frac{\gamma_{tc} E^2}{\rho_c c_c},$$

то

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{\gamma_{tc} E^2}{v_x \rho_c c_c}.$$

Из (1.57) имеем

$$\frac{v(y) \cdot \gamma_{tc} E^2}{v_x \rho_c c_c} = \frac{a\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\gamma_{tc} E^2}{\rho_c c_c}. \quad (1.58)$$

Пусть профиль скорости в погранслое определяется по уравнению:

$$v_x(y) = \frac{v_x y}{\delta(x)}, \quad (1.59)$$

где v_x — скорость в ядре, м/с; $\delta(x)$ — толщина погранслоя, м.

Подставим (1.59) в (1.58) и получим:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = -\frac{\gamma_{tc} E^2}{a\rho_c c_c} \left(1 - \frac{y}{\delta}\right). \quad (1.60)$$

**1.11. Длина плоской электродной системы
при обработке соломенной массы до 90 °С .**

Плотность, кг/м ³	Напряжен- ность эл. поля, В/м	Скорость перемещения, м/с	Длина электрода, м	Температура ядра, °С	Температура пограничья, °С
600	700	0,001	0,350	89,6	92,8
600	700	0,002	0,679	90,1	92,9
600	700	0,003	1,005	89,7	92,4
600	800	0,001	0,271	90,2	93,4
600	800	0,002	0,523	90,2	92,9
600	800	0,003	0,773	89,8	92,4
600	900	0,001	0,216	89,7	93,0
600	900	0,002	0,416	90,5	93,2
600	900	0,003	0,613	89,6	92,1
700	700	0,001	0,405	89,7	92,8
700	700	0,002	0,787	89,5	92,3
700	700	0,003	1,168	89,7	92,3
700	800	0,001	0,313	89,9	93,1
700	800	0,002	0,606	89,7	92,4
700	800	0,003	0,898	89,9	92,4
700	900	0,001	0,250	90,8	93,9
700	900	0,002	0,482	90,3	93,0
700	900	0,003	0,712	89,7	92,2
800	700	0,001	0,460	89,9	92,9
800	700	0,002	0,896	89,6	92,3
800	700	0,003	1,331	89,8	92,3
800	800	0,001	0,355	89,9	92,9
800	800	0,002	0,690	90,1	92,7
800	800	0,003	1,022	89,5	92,0
800	900	0,001	0,283	90,3	93,3
800	900	0,002	0,548	90,2	92,8
800	900	0,003	0,811	89,9	92,3

Граничные условия имеют вид:

$$t_{y=\delta} = t(x) = t_{я}(x) \quad (1.61)$$

$$\left. \frac{\partial t}{\partial y} \right|_{y=0} = \frac{\alpha(t_x - t_c)}{\lambda}, \quad t(x) \approx t_{я}(x), \quad (1.62)$$

где α — коэффициент теплообмена с внешней средой, Вт/(м²°С); λ — теплопроводность среды, Вт/(м°С); t_c — температура внешней среды, °С.

Введем обозначение:

$$\frac{\gamma_{tc} E^2}{\alpha \rho_c c_c} = A,$$

тогда из (1.60) следует

$$\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = -A \left(1 - \frac{y}{\delta} \right). \quad (1.63)$$

Интегрируя (1.63), получим общее решение:

$$t(y) = Ay^3/6\delta(x) - Ay^2/2 + C_y + C_1.$$

Используя граничные условия окончательно для погранслоя:

$$t(y) = \frac{Ay^3}{6\delta(x)} - \frac{Ay^2}{2} - zt_c y + \frac{[t_{\text{я}}(x) + A\delta^2(x)/3 + zt_c\delta(x)][z y + 1]}{1 + z\delta(x)}, \quad (1.64)$$

где $z = \alpha/\lambda$.

Профиль температуры в погранслое из (1.64):

$$[\nabla t_{y=\delta}] = \left[-A\delta(x)/2 - zt_c + (t_{\text{я}}(x) + A\delta^2(x)/3 + zt_c\delta(x))z / (1 + z\delta(x)) \right]. \quad (1.65)$$

Полагая в первом приближении, что температура в ядре:

$$t_{\text{я}} \approx t_{\text{н}} + \gamma_{tc} E^2 x / (\rho_c c_c v), \quad (1.66)$$

где $t_{\text{н}}$ — начальная температура материала, °С.

Из (1.65) следует:

$$[\nabla t_{y=\delta}] = \left[-A\delta/2 + (t_{\text{н}} - t_c + Aax/v + A\delta^2/3)z / (1 + z\delta(x)) \right]. \quad (1.67)$$

Подставляя (1.67) в (1.56) с учетом $t(0) = t_{\text{н}}$:

$$\bar{t}(x) = t_{\text{н}} - \frac{2ax}{lv} \left[\frac{t_{\text{н}} - t_c + A \frac{ax}{v} + A \frac{\delta^2(x)}{3}}{z\delta + 1} z - \frac{A\delta(x)}{2} \right] + A \frac{ax}{v}. \quad (1.68)$$

**1.12. Длина плоской электродной системы
при обработке зерновой массы до 80°C**

Плотность, кг/м ³	Напряженность эл. поля, В/м	Скорость перемещения, м/с	Длина электрода, м	Температура ядра, °С	Температура пограничья, °С
400	1400	0,001	0,070	82,7	76,1
400	1400	0,002	0,129	81,8	74,9
400	1400	0,003	0,187	80,8	73,9
400	1500	0,001	0,062	83,8	77,1
400	1500	0,002	0,113	81,0	74,2
400	1500	0,003	0,164	81,1	74,1
400	1600	0,001	0,055	82,5	75,9
400	1600	0,002	0,100	80,7	73,9
400	1600	0,003	0,145	81,0	74,1
500	1400	0,001	0,085	83,0	76,2
500	1400	0,002	0,158	81,1	74,2
500	1400	0,003	0,230	80,1	73,2
500	1500	0,001	0,075	83,5	76,7
500	1500	0,002	0,139	82,1	75,1
500	1500	0,003	0,202	81,0	74,1
500	1600	0,001	0,066	80,4	73,8
500	1600	0,002	0,123	82,0	75,1
500	1600	0,003	0,178	80,2	73,3
600	1400	0,001	0,099	80,2	73,6
600	1400	0,002	0,187	80,8	73,9
600	1400	0,003	0,274	80,9	73,9
600	1500	0,001	0,088	83,5	76,6
600	1500	0,002	0,164	81,1	74,1
600	1500	0,003	0,240	81,2	74,2
600	1600	0,001	0,078	83,0	76,2
600	1600	0,002	0,145	81,0	74,1
600	1600	0,003	0,212	81,4	74,3

Уравнение энергии для коаксиальных электродов имеет вид (рис. 1.27, б):

$$t(r, x) = t_{\text{н}} + q(r)x / (\rho_c c_c v), \quad (1.69)$$

где

$$q(r) = \frac{\gamma_{\text{тс}} U^2}{r \ln^2(R / r_0)}. \quad (1.70)$$

Подставляя (1.70) в (1.69), получим распределение температуры между цилиндрическими электродами:

$$t(r, x) = t_{\text{н}} + \frac{\gamma_{\text{те}} U^2 x}{\rho_c c_c v r^2 \ln^2(R / r_0)}. \quad (1.71)$$

Средняя температура по сечению коаксиальной электродной системы:

$$\bar{t} = 1 / \left[\pi (R^2 - r_0^2) \right] \int_{r_0}^R 2\pi t(r, x) r dr. \quad (1.72)$$

Таким образом, формулы (1.64), (1.68) и (1.71) позволяют рассчитать температуру кормосмеси в зоне, граничащей с поверхностью электрода и между плоскими и цилиндрическими коаксиальными электродами.

Толщина погранслоя может быть определена по известным формулам:
для турбулентного слоя:

$$\delta(x) = 0,4x Re^{-0,2},$$

для ламинарного слоя:

$$\delta(x) = 5x Re^{-0,5}.$$

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho_c v x}{\mu},$$

где μ — динамическая вязкость, Па с.

Для кормовых систем профиль скорости соответствует рис. 1.28 с постоянной величиной в ядре и переменной в погранслое. Для этого случая толщина погранслоя наиболее близко описывается формулой:

$$\delta(x) = 3,7x Re^{-0,5}. \quad (1.73)$$

Температура кормовой системы зависит от удельной электрической проводимости, которая, в свою очередь, зависит от температуры и длины

электродов. Эту взаимозависимость должна учитывать методика расчета зависимости $t(x,y)$.

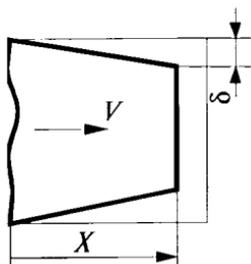


Рис. 1.28. Профиль скорости кормовых систем в межэлектродном пространстве.

Результаты расчетов по формулам (1.64, 1.68, 1.71, 1.72) позволяют сделать следующие выводы.

Обработка грубодисперсных кормовых материалов возможна только в плоских электродных системах, создающих равномерное температурное поле (табл. 1.9, рис. 1.29...1.31).

Цилиндрические коаксиальные электроды создают недопустимый перегрев материала у поверхности внутреннего электрода, в то время как температура у наружного значительно ниже нормируемой (табл. 1.10, рис. 1.30, 1.31).

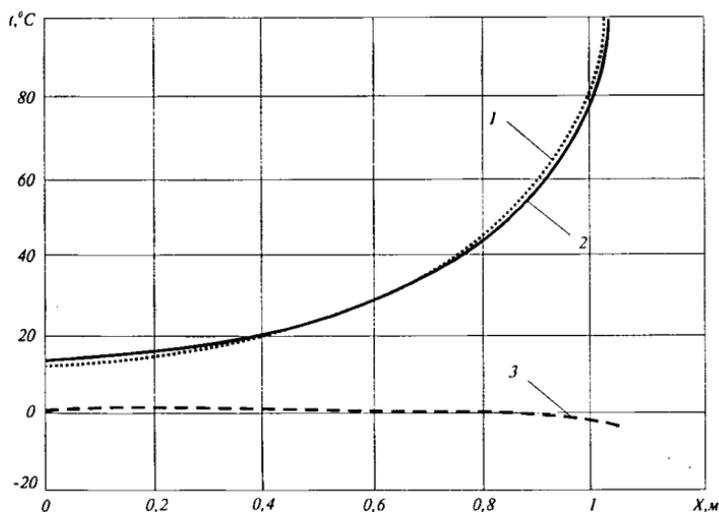


Рис. 1.29. Изменение температуры по длине плоских электродов x при обработке соломы: 1,2 — температура погранслоя и ядра; 3 — разность температур.

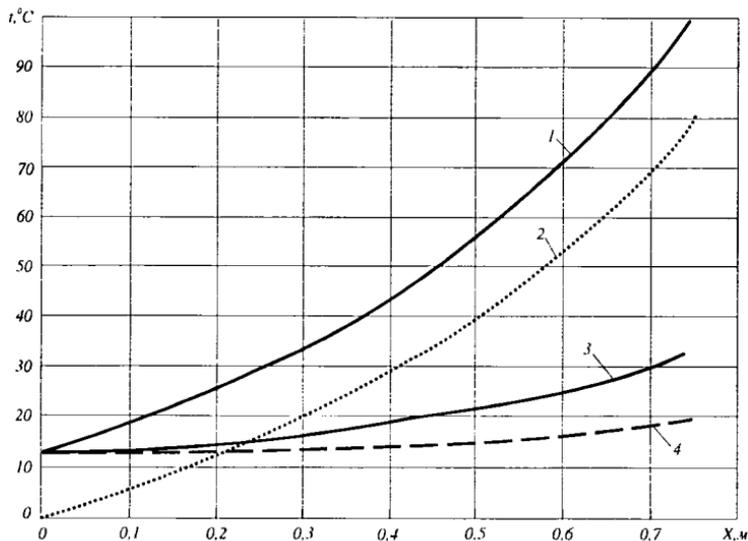


Рис. 1.30. Изменение температуры по длине коаксиальных электродов x при обработке соломы: температура у внутреннего (1) и наружного (3) электродов; 2 — разность (1) и (3); 4 — средневзвешенная температура материала.

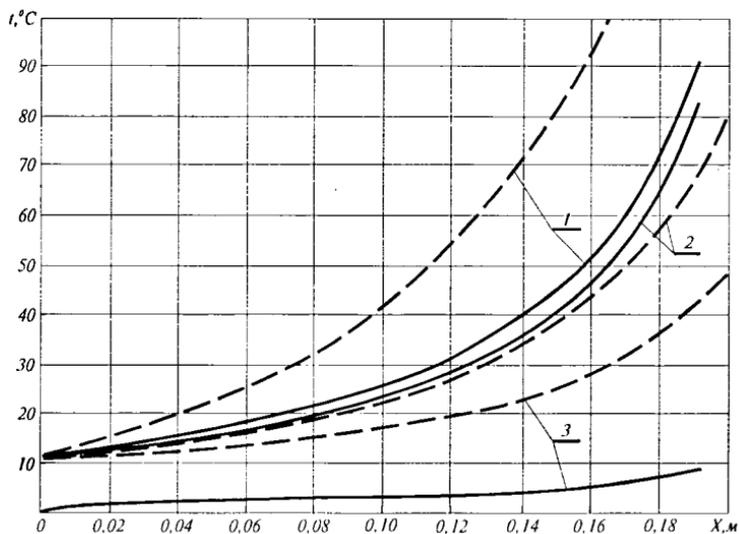


Рис. 1.31. Изменение температуры по длине плоских (—) и коаксиальных (---) электродов при обработке зерна: 1, 2 — температура погранслоя и ядра; 3 — разность температур 1 и 2.

1.13. Длина плоской электродной системы при обработке мелассы и картофельного сока

Плотность, кг/м ³	Напряженность эл. поля, В/м	Скорость перемещения, м/с	Длина электрода, м	Температура ядра, °С	Температура пограничья, °С
Меласса					
1400	4000	0,001	0,146	60,0	45,9
1400	4000	0,002	0,273	59,9	45,7
1400	4000	0,003	0,398	60,0	45,7
Сок картофеля					
1028	200	0,001	1,212	40,0	44,0
1028	200	0,002	2,404	40,0	43,9
1028	200	0,003	3,595	40,0	43,9

Обработка жидких кормов возможна в плоских и коаксиальных системах при соответствующем подборе отношений наружного и внутреннего диаметров электродов (табл. 1.9, 1.10).

Расчет коаксиальных электродных систем по средней температуре ведет к большим погрешностям (рис. 1.30).

Ориентировочная длина электродов при обработке кормов может быть рассчитана по полученным соотношениям. Результаты расчета некоторых случаев обработки даны в табл. 1.11...1.13. Программа расчета температуры по приведенным формулам дана в приложении (табл. П. 7).

Для проведения расчетов по указанным выше формулам в приложении приводятся программы, написанные на языке Паскаль. Необходимые нормативные значения содержатся в этих программах в виде констант, организованы соответствующие циклы, а результаты записываются в текстовые файлы, оформленные для экспорта в пакет QuattroPro с последующим построением графиков. Эти же файлы можно использовать для анализа результатов без построения графиков.

Для поиска оптимального решения использован метод статистических испытаний для определения начального приближения, которое использовалось для последующего применения метода спирального поиска. Совпадение результатов после неоднократного пуска программы с переустановкой датчика случайных чисел гарантирует, что найденный результат является глобальным экстремумом.

1.4. Влияние электрического поля на микроорганизмы кормов

Большинство сельскохозяйственных продуктов, используемых в качестве корма, являются благоприятной средой для развития всевозможных микроорганизмов, которые могут отрицательно влиять на животных и птицу. Загрязнение кормов бактериями и грибами происходит во время заготовки, хранения и переработки. Степень загрязнения зависит от природных и других внешних условий.

Во время роста злаков на их поверхности развивается эпифитная микрофлора, представленная на 90...99% бактериями рода *Pseudomonas* (*P. herbicoba* и *P. fenorensens*). Среди эпифитов встречаются зародыши плесневых грибов родов *Alternaria*, *Cladosporium*, *Fusarium*, на долю которых приходится менее процента всей эпифитной микрофлоры, а также гнилостные бактерии. В меньшей степени обнаруживают молочнокислые микроорганизмы, актиномицеты, бациллы. Содержание микробов в 1 г свежееубранного зерна составляет от десятков тысяч до десятков миллионов клеток. При неправильном хранении зерна эпифитная микрофлора исчезает, а появляется сапрофитная, представленная такими микроорганизмами как плесневые грибы родов *Penicillium*, *Aspergillus*, *Mucor*, *Rhizopus*, бациллами *Bacillus mesentericus*, *B. subtilis*, микрококами, молочнокислыми бактериями [17].

Наши исследования по количественному составу микрофлор хранящегося зерна показали, что один грамм ячменя содержит от миллионов до десятков миллионов клеток бактерий и до десятков тысяч спор плесневых грибов.

В грубых кормах с повышенной влажностью развиваются грибы — целлюлозоразрушители и другие сапротрофы: *Stachydotrys*, *Dendrodchium*, *Chaltomium*, *Fusarium*, *Trichoderms*, *Verticillium*, *Cehhalosporium*, некоторые виды *Aspergillus* и *Penicillium*. При самосогревании соломы преобладают термотолерантные виды — *Aspergillus fumigatus*, *Mucor pusillus*, *Absidia ramosa*, *Absidia corymbifera* [18].

Исследования количественного и видового состава микрофлоры ржаной соломы через 8...10 месяцев после ее уборки выявили в одном грамме десятки—сотни тысяч бактерий, сотни тысяч спор плесневых грибов, сотни клеток дрожжей. Видовой состав бактериальной микрофлоры соломы представлен, в основном, гнилостными бактериями спорообразующими и неспорообразующими. Среди плесневых грибов наиболее часто высевались грибы рода *Mucor*.

Клеточный сок картофеля, при извлечении из клубней, обсеменяется микроорганизмами с поверхности картофеля. Наряду с сапрофитными

микроорганизмами (бациллами группы субтитимес-мехениформис, микрококками, молочнокислыми бактериями и др.) могут быть обнаружены и патогенные бактерии *Clostridium botulinum*, *C. perfringens*, *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus*, а также различные виды плесневых грибов, вызывающих порчу [19].

Исследования микрофлоры картофельного сока показали содержание в одном грамме сока сотен тысяч клеток бактерий, сотен спор плесневых грибов и дрожжей. Среди бактерий индефицированы бациллы видов *Bacillus subtilis*, *B. mesentericus*, *B. mycoides*, *B. fernues* и молочнокислые микроорганизмы. Плесневые грибы представлены, в основном, родом *Aspergillus*.

Особую опасность для животных представляют грибы, способные в определенных температурных и влажностных условиях вырабатывать в кормах ядовитые вещества (афлатоксины, минотоксины, а также *Aspergillus fumigatus* и др.).

Жизнедеятельность микроорганизмов неразрывно связана с окружающей их средой и в частности температурой, влажностью, химическим составом, количеством воздуха и другими факторами, например, электромагнитным, ионизирующим и ультразвуковым воздействием. На изменении условий окружающей среды основаны различные методы активации или подавления микроорганизмов: термические, влажностные, механические, радиационные, химические, биологические. Применительно к электротепловой и электрохимической обработке интерес представляет влияние электрического тока на микроорганизмы в кормах.

Согласно [20,21] микробная клетка в суспензии представляет собой отрицательно заряженное тело с собственной электрической проводимостью и диэлектрической проницаемостью. Поверхностный заряд клетки определяется диссоциацией ионных групп периферического слоя микроорганизма и адсорбцией ионов из окружающей среды, образующих внутреннюю часть двойного электрического слоя (ДЭС). Наружная часть ДЭС формируется в результате электростатического притяжения ионов среды. Установлено, что величина заряда, электрофоретическая подвижность зависят от вида и возраста клеток, свойств раствора и изменяются в широком диапазоне. Кроме того, установлена связь между электрокинетическим потенциалом клеток и их патогенностью и вирулентностью. Существует и другое мнение, что биологические особенности бактерий нельзя связывать только с электрическими свойствами их поверхности, необходим комплексный учет электрических свойств, гидратации поверхности и изоэлектрических зон рН [22]. Ряд исследований подтверждает значительное влияние рН на заряженные микротела в электролитах: микроорганизмы [23], неорганические молекулы [24], наши исследования по электрокоагуляции белков картофельного сока [25]. Бо-

лее того, для условий консервирования кормов известны минимальные значения рН среды, при которых еще происходит развитие микроорганизмов [26]: плесневые грибы — 2,5, дрожжи — 1,2, гнилостные грибы (бактерии) — 5,5, маслянокислые бактерии — 4,2, бактерии группы кишечной палочки — 4,5, молочнокислые бактерии — 3,5.

Исходя из сказанного, можно предположить прямое влияние электрического поля на электрически заряженную микробную клетку и косвенное воздействие электрического тока на микроорганизмы через изменение параметров среды их обитания, в первую очередь, температуру и химическую реакцию.

Анализ исследования антимикробного действия переменного и постоянного электрического поля, обзор которых дан в [21], показывают, что его влияние зависит от частоты и величины тока, продолжительности воздействия и состава среды, в которую суспендированы микроорганизмы.

В водных растворах постоянное электрическое поле может оказывать как стимулирующее, так и угнетающее воздействие в зависимости от плотности тока и продолжительности обработки. Переменный ток промышленной частоты не оказывает заметного влияния на микроорганизмы, а на высокой частоте вызывает резко выраженный бактерицидный эффект. Антимикробное действие электрического поля проявляется через температуру и продукты приэлектродных реакций в результате растворения материала электродов под действием тока. В многокомпонентных средах постоянное электрическое поле активизирует взаимодействие ионов среды с микробными клетками, усиливает электролиз, активизирует диссоциацию химических соединений стенок бактериальных клеток.

Таким образом, исходя из результатов исследований, можно обобщить, что электрическое поле влияет на микроорганизмы в многокомпонентных средах, к которым относятся и корма, через термическое и химическое действия. Можно предположить, что глубина антимикробного действия будет зависеть от температуры, количества электричества, введенного в среду, термической и химической активности электрического тока. Количество электричества характеризует режим обработки более полно, чем плотность тока, так как учитывает не только величину тока, но и время его воздействия на микробную среду. Химическую активность среды можно оценить приближенно величиной рН показателя.

Следует отметить, что в работах по стерилизации электрическим током [21] не принята во внимание такая важная характеристика электрохимического процесса как количество электричества. Кроме того, практически не изучено электрохимическое действие постоянного тока. Исследователи ограничились рассмотрением приэлектродных процессов на постоянном токе, которые не могут внести заметные изменения в химическую активность

всей обрабатываемой среды в силу низких плотностей тока и несравнимости масс в приэлектродном и межэлектродном пространствах.

Усилить химическое действие тока на микроорганизмы можно разделением процессов в катодной и анодной областях рабочей камеры, исключив смешивание и взаимную нейтрализацию продуктов электрохимических реакций. Разделение создает среды с резко различной химической активностью — щелочной и кислой, выравнивает концентрацию ионов по зонам обработки. В качестве разделительной перегородки используют мембраны.

Сравнительные исследования влияния электрического тока на микроорганизмы зерна, соломы, картофельного сока применительно к технологиям их обработки проведены совместно с микробиологической лабораторией “Стандартплодоовощ” МСХП РБ. Изучено влияние переменного, постоянного и постоянного с разделенными мембраной катодной и анодной зонами токов. Исследования проведены в диапазоне плотностей токов $(0,5...2)10^3 \text{ А/м}^2$, охватывающем технологические режимы обработки кормов. Воздействию тока подвергали микроорганизмы вида *Бациллиус микроидес*, наиболее характерно представляющие микробы кормов. Начальное содержание микроорганизмов составляло от $3,8 \cdot 10^7$ до $3,5 \cdot 10^8$ клеток в м^3 (кл/м^3). Стерилизующий эффект оценен по снижению обсемененности К, представляющей собой отношение числа микробных клеток до и после обработки.

Установлено влияние рода тока, количества электричества, температуры и водородного показателя на содержание клеток *Бациллиус микроидес* в питательной среде (табл. 1.15, 1.16). Продолжительность обработки в опытах от 10 до 20 мин. Подготовка кормов соответствовала базовым технологиям (табл. 1.18).

1.14. Влияние рода тока и температуры на количество микроорганизмов

Характер обработки	Конечная температура, °С		
	60	75	90
	Снижение обсемененности, раз		
Переменный ток, 50 Гц	4,9	10	$6,9 \cdot 10^3$
Постоянный ток	208	385	$7,4 \cdot 10^3$
Постоянный ток с разделительной мембраной	$22 \cdot 10^3$	$32 \cdot 10^3$	$687 \cdot 10^3$
Нагрев в водном термостате	5,7	10	$4,8 \cdot 10^3$

Переменный и постоянный ток, нагрев в термостате при температуре 90 °С обладают сравнимым бактерицидным эффектом. Постоянный ток при 60...70 °С вызывает несколько большее подавление микроорганизмов, что, видимо, связано с процессами электролиза у поверхности электродов и воздействием продуктов реакций на бактерии и грибы.

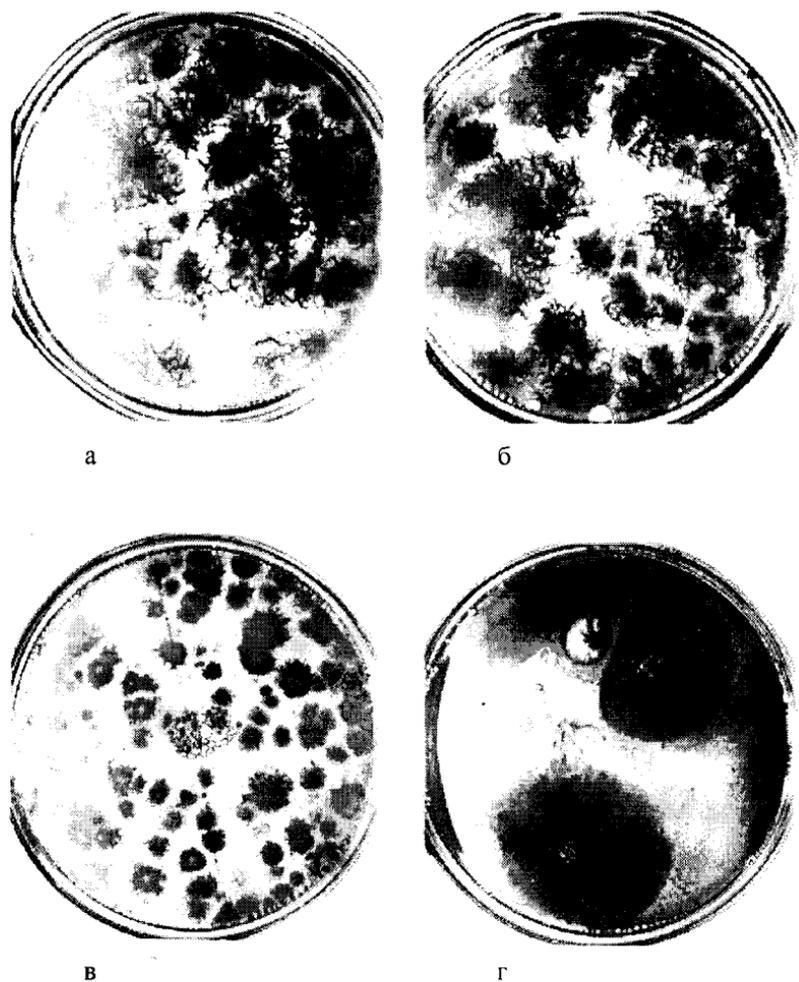


Рис. 1.32. Влияние обработки на *Bacillus mycoides* (мясо-питательный агар, 75°C, x96): а - без обработки; б - нагрев в термостате; в, г - электрообработка в щелочной и кислой средах.

Изменение температуры от 60 до 90 °С усиливает бактерицидный эффект примерно в 10^3 раз. Наложение переменного и постоянного тока увеличивает подавление микроорганизмов дополнительно в 1,5...2,0 раза. Воздействие электрического тока и ионов H^+ и OH^- усиливает антимикробное действие еще в 50...60 раз (табл. 1.15). В целом электрическое воздействие

снижает в 100...120 раз количество микроорганизмов в корме по сравнению с традиционной тепловой обработкой.

В работах А.Н.Барана, В.С. Корко, М.М. Николаенка, В.А.Пашинско-го, П.П. Цыбульского и других [27] отмечено, что переменный ток обладает в 1,5...2,0 раза большим антимикробным эффектом, чем тепловое воздействие на те же кормовые материалы. Эти результаты согласуются с данными табл. 1.15.

Электрохимическое влияние зависит от расхода тока и связанного с ним изменения щелочности и кислотности среды. Анолит обладает большим антимикробным действием, чем католит при всех температурах. С увеличением рН показателя до 11 и температуры до 90 °С бактерицидное действие католита усиливается и становится сравнимым с действием анолита.

1.15. Влияние расхода тока и рН на количество микроорганизмов

Конечная температура, °С	60			75			90		
	Расход тока, 10^6 Кл/м ³	3,8	4,8	6,5	7,2	9,6	15,2	9,9	13,5
рН кислой среды	5,6	5,4	5,1	5,6	4,2	3,0	4,3	3,6	3,1
Снижение обсемененности, раз	15 · 10 ³	16 · 10 ³	22 · 10 ³	19 · 10 ³	32 · 10 ³	48 · 10 ³	560 · 10 ³	687 · 10 ³	7000 · 10 ³
рН щелочной среды	7,2	7,6	8,6	8,4	9,8	11,5	11,0	11,1	11,4
Снижение обсемененности, раз	143	38	31	254	450	490	186 · 10 ³	323 · 10 ³	1400 · 10 ³

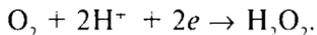
Бактерицидный эффект электрохимического действия предположительно связан с изменением электрокинетического потенциала микробных клеток под влиянием изменяющегося рН корма. Как отмечено выше, микробные клетки обладают зарядом. Следовательно, изменяя ионный состав атмосферы вокруг клетки, можно воздействовать на ее дзета-потенциал и в изоэлектрической точке изменить его до нулевого значения. Если микробную клетку рассматривать как коллоидную частицу, то к ней применимы положения электрокоагуляции. Объединения микробных клеток под действием молекулярных, электростатических и дипольных сил ведет к их интеграции и потере активности. Некоторым предварительным подтверждением сказанного могут быть изменения микробной среды под действием

электро- и теплообработки, показанные на рис. 1.32. Кроме того, pH среды может создавать условия, благоприятные для развития микроорганизмов. Например, повышение щелочности с 7,2 до 8,6 при 60 °С снижало гибель бактерий (табл. I.15). Похожие изменения отмечены и в других работах [28].

1.5. Санитарное качество кормов

Санитарное качество кормов контролируют по влажности, цвету, запаху, зараженности вредителями, содержанию нитратов и нитритов, тяжелых металлов, остаточных количеств пестицидов, радионуклидов. Корма могут быть загрязнены как до, так и в процессе обработки.

В случае электрохимической обработки кормов в водных растворах электролитов Na_2CO_3 , NaCl с разделительной мембраной можно предположить на катоде образование перекиси водорода по реакции:

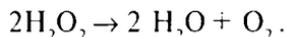


Перекись водорода может окислять органические соединения и создавать вредные для организма органические оксосоединения. Уменьшить вероятность образования H_2O_2 можно следующим образом.

1. Созданием щелочной среды у катода, в которой реакция образования перекиси водорода не идет. В нашем случае нейтральная среда у катода в начале обработки переходит в щелочную в конце электролиза.

2. Снижением растворимости кислорода в электролите путем повышения температуры обработки, уменьшением площади трехфазной границы соприкосновения электрод — раствор — воздух.

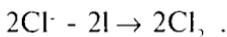
3. Присутствием в электролите небольших количеств ионов железа, которые катализируют разложение перекиси водорода по реакции



Возможное, но практически не идущее образование перекиси водорода на аноде снижается при использовании графитовых электродов, которые понижают перенапряжение выделения кислорода и тем самым уменьшают вероятность образования H_2O_2 .

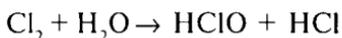
Таким образом, при обработке соломы, зерна и сока картофеля электрическим током в рабочей камере с разделительной анионообменной мембраной образование и вредное воздействие перекиси водорода практически исключено вследствие щелочной среды и высокой температуры в катодной зоне, присутствия ионов железа в некоторых конструкциях электродных камер.

В водном растворе NaCl в анодной камере возможно образование газообразного хлора



Его образование и выделение становится существенным в очень кислых средах, т.е. в конечный момент обработки, когда pH анолита приближается к минимальной величине.

Устранить нежелательное образование газообразного хлора, а также еще более нежелательное его растворение в воде



или образование NaClO можно следующим образом.

1. Уменьшением концентрации хлора в приповерхностном пространстве над анолитом, что снижает его растворение.

2. Увеличением перенапряжения его выделения, достигают снижением плотности тока до 1000 А/м² и менее, снижением концентрации NaCl в электролите, понижением температуры.

Графитовые аноды также предпочтительнее угольных, т.к. повышают перенапряжение выделения хлора и тем самым снижают его выход.

Таким образом, вероятность образования Cl₂ и связанное с ним вредное влияние на организм животных, употребляющих корм, обработанный электрическим током в водном растворе NaCl, велика в конечный момент проведения электролиза, когда реакция анолита становится сильно кислой.

Случаи обработки кормов без использования разделительной мембраны и на переменном токе не рассмотрены, т.к. выше перечисленные процессы если и могут иметь место на электродах, то в значительно меньшем объеме.

В процессе обработки могут возникать формальдегид, ацетальдегид, ацетон и спирт, как промежуточные продукты брожения при переходе по схеме углеводы — спирты — альдегиды (кетоны). Эти вещества являются также естественными продуктами метаболизма в любом живом организме.

Санитарное качество кормов, обработанных электрическим током, определено в БелНИСГИ. Исследовано влияние вида обработки на плющенное зерно ячменя, измельченную солому, сок картофеля. Отношение массы воды к массе корма составляло для зерна 0,8...1,2, для соломы 1,0...2,0. В зерно добавляли от 1,5 до 2% NaCl, в солому от 4 до 5% Na₂CO₃ и от 1,5 до 2% NaCl по отношению к их воздушной сухой массе. Конечная температура обработки соответствовала технологиям и составляла 70...80 °C для зерна и 85...95 °C для соломы.

1.16. Результаты химического анализа зерна ячменя (числитель) и соломы (знаменатель)

Химические ингредиенты и их содержание	Вид обработки				
	Без обработки, контроль	Переменный ток, 50 Гц	Постоянный ток		
			без мембраны	с мембраной	
				pH=2	pH=12
Нитраты(NO ³)	$\frac{н.о.}{н.о.}$	$\frac{н.о.}{н.о.}$	$\frac{6,2}{н.о.}$	$\frac{46,5}{н.о.}$	$\frac{н.о.}{н.о.}$
Хлориды (Сl ⁻)	$\frac{2456}{2268}$	$\frac{1522}{4112}$	$\frac{2903}{3543}$	$\frac{4364}{8113}$	$\frac{3410}{1460}$
Формальдегид	$\frac{0,12}{1,32}$	$\frac{н.о.}{н.о.}$	$\frac{н.о.}{н.о.}$	$\frac{н.о.}{1,68}$	$\frac{н.о.}{1,68}$
Ацетальдегид (кач)	$\frac{п.р.}{п.р.}$	$\frac{н.о.}{п.р.}$	$\frac{н.о.}{н.о.}$	$\frac{п.р.}{2п.р.}$	$\frac{н.о.}{2п.р.}$
Метанол	$\frac{2,7}{45}$	$\frac{н.о.}{2,3}$	$\frac{3,6}{17}$	$\frac{18,2}{68}$	$\frac{21,8}{159}$
Этанол	$\frac{3533}{100}$	$\frac{4711}{106}$	$\frac{2489}{78}$	$\frac{42,2}{68}$	$\frac{163,3}{159}$
Изопропанол	$\frac{н.о.}{н.о.}$	$\frac{н.о.}{н.о.}$	$\frac{н.о.}{н.о.}$	$\frac{н.о.}{н.о.}$	$\frac{н.о.}{н.о.}$
Бутанол-1	$\frac{н.о.}{н.о.}$	$\frac{н.о.}{н.о.}$	$\frac{н.о.}{н.о.}$	$\frac{н.о.}{н.о.}$	$\frac{н.о.}{н.о.}$
Ацетон	$\frac{38,3}{5,7}$	$\frac{33,3}{7,6}$	$\frac{20,0}{7,6}$	$\frac{12,3}{128,8}$	$\frac{13,3}{26,5}$
Фенолы	$\frac{1,01}{1,33}$	$\frac{1,33}{1,33}$	$\frac{0,89}{0,89}$	$\frac{0,43}{0,43}$	$\frac{0,73}{0,73}$

В табл. 1.16, 1.17: н.о — не обнаружено; пр. — присутствует в незначительном количестве; 2пр. — присутствует в два раза больше, чем в контрольном образце.

Результаты исследований показывают, что увлажнение соломы и зерна водными растворами химреагентов и их обработка переменным и постоянным током не приводит к каким-либо существенным изменениям в исследованных санитарных показателях. Электрообработка соломы в средах с резко выраженным рН приводит к изменению всех изученных показателей по сравнению с контролем: растет выделение формальдегида и ацетальдегида,

метанола и ацетона, наблюдается появление легких хлорированных алифматических углеводов, что может быть связано с достаточно жесткими условиями проведения процесса обработки в анодной камере, приводящими к отрыву углеводородных радикалов. Катодные процессы способствуют повышению концентрации формальдегида, ацетальдегида, метанола. При хроматографическом анализе водной вытяжки из соломы, обработанной в анодной камере, обнаружены два дополнительных неидентифицированных пика, несомненно относящихся к легким хлорированным альфатическим углеводородам.

1.17. Результаты химического анализа сока картофеля

Вид обработки	Содержание химических ингредиентов, мг/кг									
	Нитраты	Хлориды	Формальдегид	Ацетальдегид	Метанол	Этанол	Изопропанол	Бутанол-1	Ацетон	Фенолы
Без обработки, контроль	п.о	934	п.о	п.о	0,02	0,05	п.о	п.о	5,6	1,1
Электрохимическая коагуляция	п.о	1101	п.о	п.о	0,013	0,01	п.о	п.о	15,7	0,73

Результаты исследований затрудняют однозначное заключение о санитарном качестве кормов, обработанных электрическим током с разделительной мембраной, так как нами не обнаружены показатели, нормирующие содержание большинства из исследованных ингредиентов в кормах. Содержание нитратов значительно ниже предельно допустимого для кормов. Количество хлоридов превосходит в 2...3 раза допустимое при обработке в среде анолита. Дополнительные исследования показали, что концентрация NaCl не должна превышать при обработке на переменном токе 1,0...1,5% и 0,5...1,0% на постоянном с разделительной мембраной. Обработка зерна в анолите при высокой кислотности требует более глубокого исследования как по изменению химического состава зерна, так и его влиянию на животных.

1.6. Технологические параметры электрообработки

Основными технологическими параметрами обработки кормов электрическим током являются: способ и степень измельчения, вид и состав солей увлажняющего раствора, количество раствора, усилие или степень

уплотнения кормовой массы, конечная температура и продолжительность обработки, род тока, напряженность электрического поля, плотность тока, расход тока, кислотность или щелочность корма.

1.18. Параметры базовых технологий обработки кормов электрическим током

Способ обработки	Дисперсность фазы	Увлажняющий водный раствор		Давление уплотнения, МПа	Температура обработки, °С	Параметры электрического тока, поля			рН показатель		Приоритет
		состав	модуль увлажнения			частота, Гц	расход, Кл/кг	напряженность	ано-лит	като-лит	
Электро-термо-химический соломы (ЭТХО)	Измельчение, 30 ...50 мм	1,5% NaCl 5% Na ₂ CO ₃	1	350	90 ...95	50	—	800	—	—	[29]
Электро-химический соломы (ЭХО)	То же	0,5% NaCl 5% Na ₂ CO ₃	1,5	100	75 ...80	0	1500 ...2000	300	2...3	10...12	
Электро-гидро-термический зерна	Плющение	1 % NaCl	0.8	25	80	50	—	2500	—	—	[30]
Электрохимический зерна	То же	0,5 % NaCl	1,2	10	70...75	0	5000 ...5500	400	не ре-ко-менд	10...12	[34]
Электроплавная обработка метелсы	Вязкая жидкость	естественный	естественный	—	60	50	—	3500	—	—	[31]
Электрокоагуляция белков картофельного сока	Жидкость	естественный	естественный	—	30...40	0	8000 ...9000	400	4,5...5,0	—	[32]

Основными критериями оценки технологии обработки приняты зоотехнические, энергетические, санитарные, экономические показатели.

Обоснованию технологических параметров термической и химической обработки кормов электрическим током посвящены работы, выполненные под руководством профессора В.А. Карасенко авторами А.Н. Бараном и М.М. Николаенком, В.С. Корко и В.А. Пашинским, П.П. Цыбульским, Е.М. Зайцем, а также Кардашовым П.В., Чернявским А.М., Юценко И.Б. Анализ теоретических и экспериментальных работ уважаемых авторов и наших, многолетние лабораторные и производственные исследования и испытания технологий и оборудования, сопоставление результатов по критериям оцен-

ки привели к технологическим параметрам базовых технологий обработки кормов, приведенным в табл. 1.18. Эти параметры явились исходными при разработке и проектировании технологий и оборудования, создании расчетных основ процессов и аппаратов, технико-экономической оценке альтернативных решений.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОРМОВЫХ СИСТЕМ

2.1. Область определения

Физические свойства кормовых материалов составляют большую самостоятельную область исследований, которые могут преследовать различные цели: изучение свойств веществ, определение товарной ценности материалов, автоматизацию процессов и другие.

В электротехнологии изучение свойств материалов является первоочередной разработкой процессов, их оптимизации и познания физических и энергетических закономерностей взаимодействия электрического поля с обрабатываемыми органическими материалами. Следует подчеркнуть, что здесь речь идет не просто о физических и, в особенности, электрических свойствах, к примеру, измельченной соломы, плющенного зерна и т.п., а о свойствах систем на основе этих материалов при их обработке электрическим током. Рассматриваемая проблема столь обширна и многогранна, что приведенные ниже результаты составляют лишь ее фрагменты, достаточные, однако, для разработки технологий и понимания протекающих в них процессов.

По технологии обработки кормовые материалы подвергаются предварительным операциям измельчения, увлажнения, уплотнения и другим. В таком виде они представляют собой кормовые массы (соломенную, зерновую и др.), характеризующиеся степенью дисперсности, влажностью, плотностью и другими параметрами. Материалы обрабатывают (или измеряют их свойства) в электродных (рабочих) камерах (или измерительных ячейках). Явления на токоподводящих электродах составляют неотъемлемую часть процессов, образуя таким образом совместно с кормовой массой кормовую систему.

Наиболее сложными по структуре, физико-химическим, релогическим, электрическим и другим свойствам являются системы на основе соломы и фуражного зерна. В условиях обработки кормовая масса таких материалов представляет собой, в простейшем случае, двухфазную глубокодисперсную систему, в которой дисперсной средой является увлажняющий раствор, а дисперсной фазой — микрочастицы растительной ткани. Частицы, в свою

очередь, являются сложными системами, представляющими коллоидные капиллярно-пористые тела в виде объемной ажурной матрицы из вещества растительной ткани, полости и микрокапилляры которой заполнены раствором с возможным включением воздуха. Дисперсная среда образует пространственную жидкостную матрицу, заключенную между токоподводящими электродами в виде системы связанных между собой жидкостных каналов и прослоек между частицами и внутри частиц по системе их макро- и микрокапилляров и пор. Более просты по физико-химическим свойствам жидкообразные материалы: меласса, картофельный сок и другие, однако их поведение (свойства) в условиях обработки электрическим током весьма своеобразны и мало исследованы.

Свойства кормовых материалов определяются целым рядом технологических и электрических факторов. К первым относятся вид корма, место и время выращивания или производства, степень дисперсности частиц, влажность, плотность, состав увлажняющего раствора и другие. Электрические параметры включают напряженность электрического поля, плотность тока, форму тока, частоту, материал и форму электродов и другое. Поэтому получение достоверной математической модели физических характеристик таких систем в настоящее время не представляется возможным. По той же причине полученные экспериментальные результаты могут быть достоверны лишь для условий, в которых они были получены. В общем случае экспериментальные результаты дают представление лишь о порядке величин и характере их изменения под воздействие определяющих технологических факторов, соответствующих базовым технологиям (табл. 1.18).

2.2. Электрофизические свойства

По физической сущности процесс обработки влажных кормовых материалов электрическим током представляет собой электротермохимический гидролиз, основными определяющими факторами которого являются температура кормовой массы t , напряженность электрического поля E и водородный показатель рН. В функции этих факторов и представлены, в основном, электрические свойства материалов. Факторы могут варьироваться в некоторых пределах, определяемых техническими, энергетическими и другими условиями. Следующий важный фактор — время воздействия или длительность обработки — является величиной, зависящей от сочетания значений факторов E и t . Другие параметры, характеризующие условия, при которых получены приводимые экспериментальные материалы, соответствуют параметрам технологий.

Электрическую проводимость кормовой системы характеризуют принятой в кондуктометрии удельной эквивалентной электрической проводимостью $\gamma_{\text{эКВ}}$, учитывающей влияние приэлектродных процессов измерительной ячейки и удельной объемной электрической проводимости γ_v — проводимости собственного измеряемого материала. Численные их значения могут существенно различаться. При непосредственных измерениях удобнее пользоваться обратными: удельным эквивалентным электрическим сопротивлением $\rho_{\text{эКВ}}$ и удельным объемным электрическим сопротивлением ρ_v .

Для прямоугольной измерительной ячейки с плоскими электродами $\rho_{\text{эКВ}}$ и ρ_v связаны известными соотношениями:

$$\rho_{\text{эКВ}} = \rho_v + 2\rho_k / l_3$$

или

$$\gamma_{\text{эКВ}} = \frac{l_3}{l_3 / \gamma_v + 2\rho_k}, \quad (2.1)$$

где ρ_k — удельное контактное сопротивление границы материал-электрод, Ом·м²; l_3 — расстояние между электродами (по другой терминологии толщина образца h), м.

Величина ρ_k является сложной функцией вида корма, его физико-механических свойств, материала электродов, состояния их поверхности, плотности тока и других факторов, и поэтому получение достоверных их численных значений возможно лишь экспериментальным путем.

В дальнейшем, если это не будет специально оговорено, рассматривается удельная объемная проводимость, обозначаемая γ .

Основным фактором, определяющим электрические свойства кормовых материалов, является влажность. Содержание влаги определяет не только концентрацию в материале ионов, но и, что самое важное, — возможность диссоциации ионных групп, содержащихся в основном материале.

В естественном — сухом виде, при относительной влажности 13...18%, растительная ткань зерна, соломы по электрофизическим свойствам относится к несовершенным диэлектрикам, имея относительную диэлектрическую проницаемость $\epsilon = 4...12$, тангенс угла потерь $\text{tg} = 10^{-2}...10^{-3}$, удельную электрическую проводимость $\gamma = 10^{-6}...10^{-9}$ См/м. Проводимость ткани имеет ионный характер и обусловлена наличием дефектов в ее регулярной структуре, содержанием примесей и небольшого количества “свободных” или слабосвязанных ионов. В таких условиях протекание ионных реакций и обработка кормов токами низкой частоты невозможны.

По технологиям обработки кормовую массу увлажняют до относительной влажности 50...75%. Уже при увлажнении дистиллятом электричес-

кая проводимость растительной ткани возрастает на 5...6 порядков, а при увлажнении водным раствором на 6...9 порядков, достигая значений 0,2...2,5 См/м, относительная диэлектрическая проницаемость — 50...70.

При исследовании электрофизических свойств кормовых материалов в зависимости от основных определяющих факторов влажность не меняли, так как в материалах с достаточной естественной влажностью (меласса, картофельный сок) ее величина определена природой материала, а в системах с искусственным увлажнением (зерно, солома) ее значение принимали минимально допустимым по технологическим и энергетическим условиям. К тому же влияние влажности на электрические свойства материалов достаточно хорошо изучено и представлено в литературе.

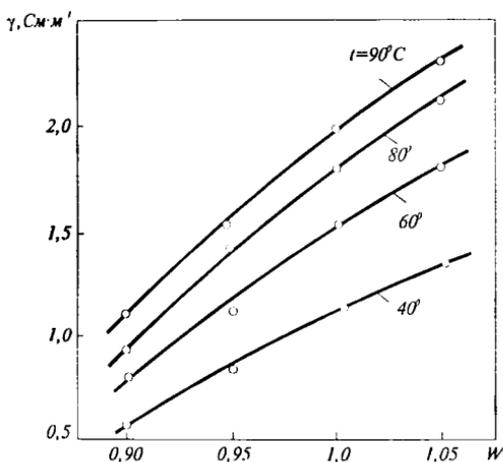


Рис. 2.1. Зависимость удельной электрической проводимости соломенной массы от модуля увлажнения и температуры.

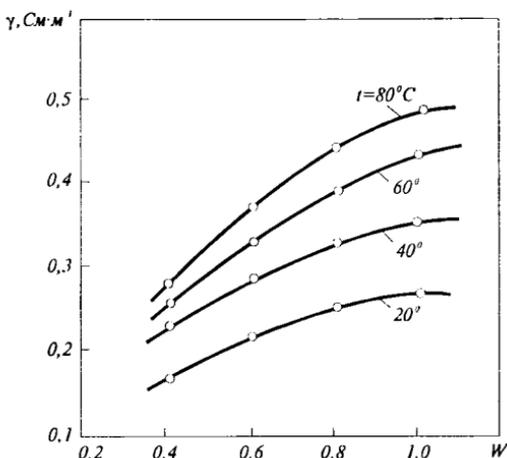


Рис. 2.2. Зависимость удельной электрической проводимости зерновой массы от модуля увлажнения и температуры.

На рис. 2.1. и 2.2. приведены температурно-влажностные характеристики соломенной и зерновой масс. Их назначение — дать представление о порядке удельной объемной проводимости этих систем и влиянии влажности. Характеристики получены обычными методами кондуктометрии и не учитывают влияния на электрическую проводимость напряженности электрического поля. В качестве влажности использован модуль увлажнения $W = m_p/m_m$ — чисто технологический параметр, представляющий собой отношение массы вносимого раствора m_p к массе воздушно-сухого кормового материала m_m . Переход от модуля увлажнения к относительной влажности ω осуществляют по известной зависимости:

$$\omega = \frac{100W + \omega_{II}}{1 + W}, \quad (2.2)$$

где ω_{II} — относительная влажность исходного материала, %.

Следует подчеркнуть, что с изменением модуля увлажнения W изменяется не только содержание влаги в массе, но и концентрация свободных ионов.

Зависимость удельного объемного электрического сопротивления кормовой массы от модуля увлажнения W можно представить формулой [35] для близкого по структуре материала — бумаги:

$$\rho = \frac{\rho_m \rho_p k^2}{\rho_p k^2 + \rho_m W}, \quad (2.3)$$

где ρ_m — удельное объемное сопротивление исходного материала, Ом·м; ρ_p — удельное объемное сопротивление раствора, Ом·м; k — коэффициент извилистости, представляющий собой отношение длины эффективного (среднестатистического) жидкостного мостика между электродами к расстоянию между ними.

Приведенные графические зависимости (рис.2.1, 2.2) можно аппроксимировать эмпирическими выражениями:

$$\gamma = 0,2W - 0,017t + 0,036Wt - 0,165, \quad (2.4)$$

зерновая масса

$$\gamma = \gamma_{20} - 0,655 + 0,405W + 0,0078t - 0,0013Wt. \quad (2.5)$$

Нетрудно заметить, что зависимости (2.4) и (2.5) в принципе не отличаются от формулы (2.3).

Температурные характеристики удельной электрической проводимости дисперсных кормовых систем подчинены известной зависимости

$$\gamma_t = a \exp(-b / t), \quad (2.6)$$

где a и b — величины, не зависящие от температуры.

Для жидкой фазы кормовых систем зависимость $\gamma(t)$ нередко представляют в виде степенной функции, разлагая (2.6) в ряд:

$$\gamma_t = \gamma_{20} (1 + \alpha\theta + \beta\theta^2 + \delta\theta^3 + \dots),$$

где α, β, δ — коэффициенты, не зависящие от температуры; γ_{20} — удельная электрическая проводимость при 20 °С; $\Theta = (t-20)$; t — температура, для которой определяют γ .

В практических расчетах используют первых два слагаемых многочлена, представляя зависимость $\gamma(t)$ в виде:

$$\gamma_t = \gamma_{20}(1 + \alpha\Theta), \quad (2.7)$$

где α — температурный коэффициент проводимости, 1/°С.

Твердая фаза кормовых систем — набухшие частицы соломы, зерна, картофеля относятся к ионным полупроводникам. Особенность их состоит в том, что они содержат кристаллизующиеся структуры: целлюлозу, легнин, крахмал. Для таких материалов удельную электрическую проводимость описывают формулой Френкеля [36]:

$$\gamma = \frac{n_0 q^2 \delta^2 \nu \exp[-W / (2kT)]}{6kT}, \quad (2.8)$$

где n_0 — концентрация свободных ионов, 1/м³; q — заряд иона, Кл; δ — длина “свободного пробега” иона, м; ν — частота свободных колебаний иона, 1/с; k — постоянная Больцмана, Дж/К; T — температура среды, К; W — энергия активации, Дж.

Энергия активации W складывается из энергии активации диссоциации W_d и энергии активации перемещения иона W_n :

$$W = W_d + W_n,$$

причем основную роль играет энергия активации диссоциации ($W_d \gg W_n$).

Формула (2.8) получена для условий слабых полей ($E \ll 10^7$ В/м), когда влиянием поля на W_d можно пренебречь. Таким образом, удельная электрическая проводимость ионных полупроводников зависит от концентрации ионов, температуры, энергии активации.

Влияние температуры практически не сказывается на величине предэкспоненциального множителя, а проявляется через степенной показатель. Следовательно, с повышением температуры проводимость частиц твердой фазы возрастает по экспоненциальному закону.

Выражения (2.6) и (2.8) имеют одинаковый смысл и структуру, характерные для любых материалов с ионной проводимостью, однако в зависимости от соотношения W/kT для конкретных сред вид кривых $\gamma(t)$ может существенно различаться.

Для рассматриваемых систем вид зависимости $\gamma(t)$ (рис.2.3, 2.4, 2.5), помимо непосредственного влияния факторов t и E , в значительной мере

определяется денатурационными процессами, протекающими в кормах при их обработке, и связанными с этим изменениями структуры, форм связи влаги, реологических и других свойств. В соломе — это потеря кристалличности и переход в высокоэластичное состояние, что сопровождается повышением проводимости. В материалах с высоким содержанием крахмала (зерно, картофель) под действием температуры происходит его клейстеризация, протекающая в несколько стадий. В начальной стадии (20...55 °С) происходит связывание влаги крахмальными зёрнами. Гидратация сопровождается выделением теплоты (экзотермический процесс), поэтому на этом участке зависимости $g(t)$ виден наибольший прирост проводимости. После достижения максимума клейстеризации вязкость массы существенно возрастает, а подвижность ионов и электрическая проводимость снижаются. У картофеля, отличающегося высоким содержанием крахмала, после 80...85 °С нарушаются связи О - Н...О, удерживающие молекулы связанной влаги с гидроксилами крахмала, вязкость массы резко падает, а проводимость возрастает (рис.2.5, кривая 1). Все эти изменения g , происходящие в материалах в процессе обработки, для каждого значения факторов t и E в известных в литературе аналитических зависимостях, включая и формулу Френкеля (2.8), не находят отражения.

Экспериментальная температурная характеристика удельной объемной электрической проводимости соломенной массы приведена на рис.2.3. Эти и последующие зависимости получены в условиях, адекватных обработке в рабочих камерах при различных значениях напряженности электрического поля E , допускаемых технологией обработки. Здесь представлены результаты, позволяющие более полно уяснить влияние определяющих факторов. На рис. 2.3. приведены средние зависимости $\gamma(t)$ при изменении E в диапазоне $(6...12)10^2$ В/м и доверительные границы возможных значений этих величин.

Вид характеристики $\gamma(t)$ укладывается в рамки приведенных выше существующих представлений о проводимости ионных материалов. Экспериментальная температурная характеристика удельной объемной электрической проводимости соломенной массы может быть представлена зависимостью:

$$\gamma_{tc} = \gamma_{20} \left(1 + 3,7 \cdot 10^{-2} \Theta - 1,44 \cdot 10^{-4} \Theta^2 \right). \quad (2.9)$$

Несколько отличается вид температурной зависимости эквивалентной проводимости $\gamma_{\text{эkv}}(t)$, что обусловлено влиянием контактных сопротивлений на электродах.

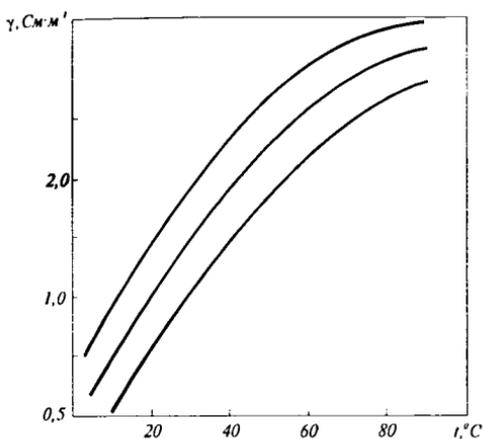


Рис. 2.3. Температурная характеристика удельной объемной электрической проводимости соломенной массы и доверительная область ее значений.

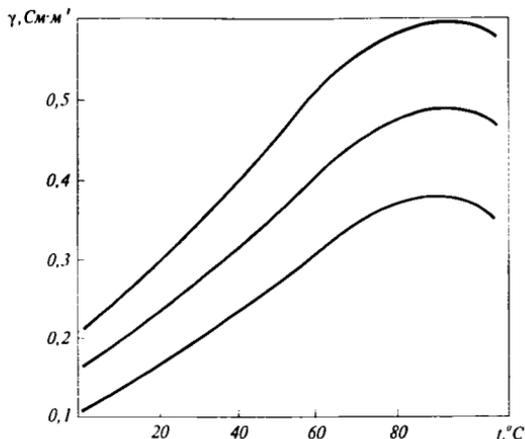


Рис. 2.4. Температурная характеристика удельной объемной электрической проводимости зерновой массы и доверительная область ее значений.

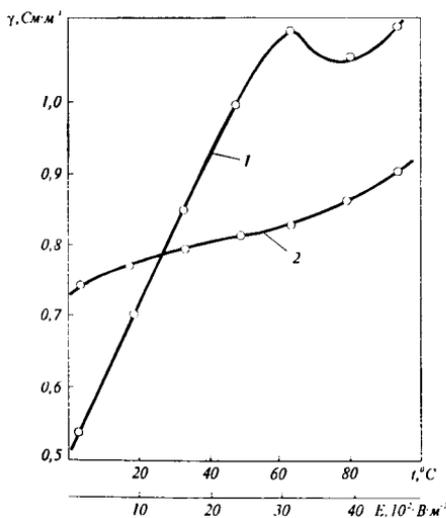


Рис. 2.5. Температурная характеристика удельной электрической проводимости картофельной массы (1, $E = 1500 \text{ В·м}^{-1}$) и ее зависимость от напряженности электрического поля (2, $t = 40^\circ\text{C}$).

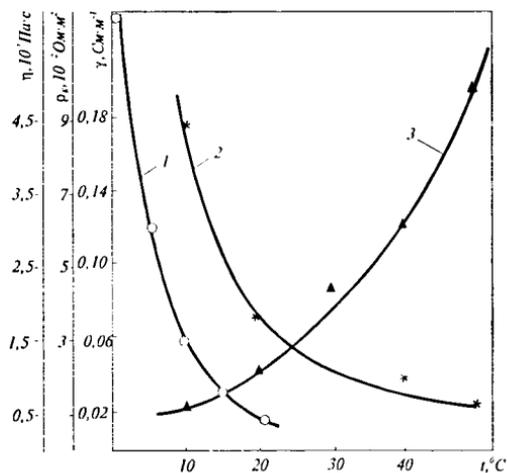


Рис. 2.6. Температурная характеристика мелассы: 1 — динамическая вязкость; 2 — удельное контактное сопротивление (электрод графит ГЭ); 3 — удельная электрическая проводимость.

Схожий вид имеют и температурные характеристики зерновой (рис.2.4.) и картофельной (рис. 2.5, кривая 1) масс. Отличие обусловлено более выраженным влиянием деструкционных процессов (главным образом, клейстеризации крахмала), особенно в картофеле (после 60 °С).

Для зерновой массы аппроксимирующая зависимость имеет вид:

$$\gamma_{t_3} = \gamma_{20} \left(1 + 6,1 \cdot 10^{-2} \Theta - 4,3 \cdot 10^{-4} \Theta^2 \right). \quad (2.10)$$

Для картофельной массы зависимость $\gamma(t)$ в диапазоне температур до 60 °С можно представить в виде линейной функции:

$$\gamma = \gamma_{20} \left(1 + 1,35 \cdot 10^{-2} \Theta \right), \quad (2.11)$$

а выше 60 °С в практических расчетах можно принять с погрешностью $\pm 5\%$ $\gamma_t = \gamma_{60}$.

Температурная характеристика удельной электрической проводимости мелассы по виду отличается от рассмотренных выше материалов и представляет собой экспоненту, аналитическое представление которой схоже с формулой для ионных полупроводников [40]

$$\gamma_t = \gamma_{20} \exp(\alpha \Theta). \quad (2.12)$$

Свойства мелассы (как и других материалов) разного происхождения могут различаться. Для кривой 3 рис.2.6. значения постоянных в (2.12) принято равным $\gamma_{20} = 0,025$ См/м, $\alpha = 0,053$ 1/°С.

Особенность мелассы состоит в низком содержании влаги (около 20%), а в сухом остатке значительное место занимают недиссоциирующие сахара, в отличие от ионных групп в рассматриваемых выше материалах. В этом причина низкой проводимости мелассы (на порядок ниже, чем у соломенной массы), приближающей ее по свойствам к ионным полупроводникам. Другой причиной, определяющей вид температурной характеристики мелассы, является снижение с температурой ее динамической вязкости η (рис.2.6, кривая 1), происходящее по экспоненте:

$$\eta = a \exp(-bt). \quad (2.13)$$

В соответствии с законом Стокса это приводит к снижению сил сопротивления среды движению ионов и повышению их подвижности и, следовательно, проводимости. Приведенное заключение подтверждается видом температурной характеристики удельного контактного сопротивления границы меласса-электрод (рис. 2.6, кривая 2). Характеристика $\rho_k(t)$ практиче-

ки повторяет вид кривой $\eta(t)$ и может быть аппроксимирована зависимостью:

$$\rho_k = 3,1 \cdot 10^{-2} \exp(-0,071t). \quad (2.14)$$

В мелассе обнаружена небольшая доля электронно-дырочной проводимости, которая не оказывает заметного влияния на общую проводимость.

Температурная характеристика удельной электрической проводимости картофельного сока описывается зависимостью:

$$\gamma_t = \gamma_{20} [1 + 0,028(t - 20)], \quad (2.15)$$

где $\gamma_{20} = 1,08$ См/м.

Дисперсионный анализ результатов исследований проводимости показал незначительное влияние сорта и срока хранения картофеля по сравнению с температурой. Наиболее вероятная величина удельной проводимости лежит в области $\gamma = \gamma_t \pm 0,37$.

Напряженность электрического поля оказывает влияние на величину удельной электрической проводимости кормовых систем (рис. 2.3, 2.4). При изменении напряженности в пределах, допускаемых технологиями, у соломы отклонение объемной проводимости от среднего значения достигает 10...15%, у зерна объемная проводимость изменяется на 20...27%. Схожий вид зависимости $\gamma(t)$ у картофельной массы (рис. 2.5, кривая 2). Исключение составляет меласса, у которой такой зависимости не обнаружено.

Из двух определяющих технологических факторов t и E основное влияние на γ оказывает температура. Однако для электротехнологии именно зависимость $\gamma(E)$ представляет наибольший интерес.

Из экспериментальных кривых $\gamma(E, t)$ следует, что с повышением E проводимость возрастает при всех температурах (рис. 2.7). Этот факт не вписывается, вообще говоря, в существующие представления, согласно которым в слабых полях ($E \ll 10^7$ В/м) проводимость ионных проводников не зависит от напряженности поля. На этих предпосылках основана и формула (2.8), рассматриваемая выше.

Вместе с тем, в литературе единого мнения на этот счет пока нет, особенно когда речь идет о материалах органического (природного) происхождения [37]. Утверждение о независимости γ от E базируется, в основном, на исследованиях промышленных полимерных материалов, имеющих однородную структуру с неменяющимися свойствами, по крайней мере, за период, сравнимый с временем обработки кормовых материалов. В отличие от них, кормовые системы имеют сложную неоднородную структуру, большую разветвленную поверхность, содержат значительное количество ионогенных

групп, их свойства в течение короткого времени обработки претерпевают существенные изменения.

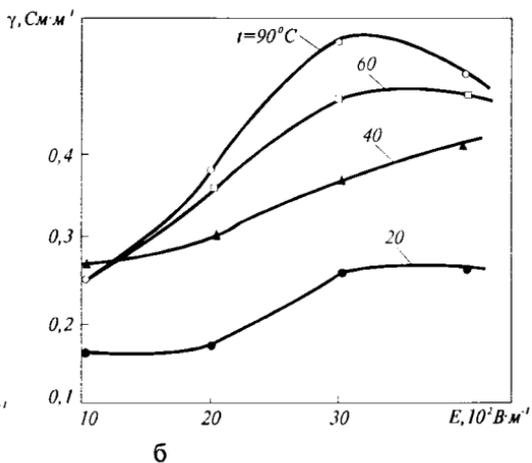
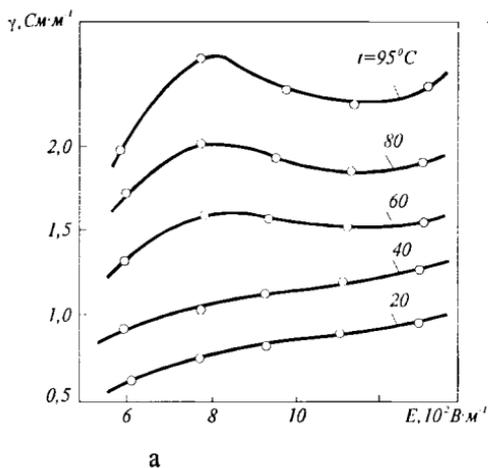
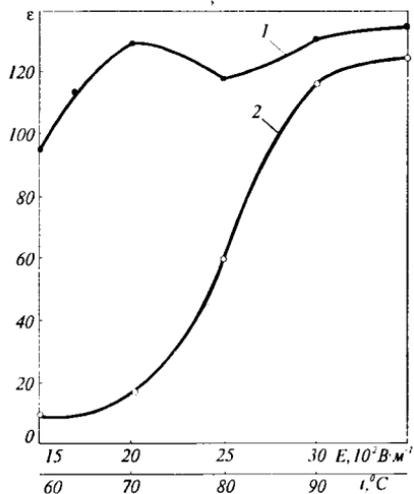
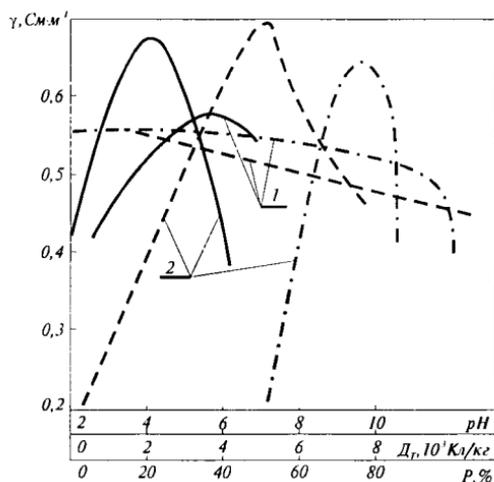


Рис. 2.7. Зависимость удельной электрической проводимости соломенной (а) и зерновой массы (б) от напряженности электрического поля.



Полученная нами зависимость $\gamma(E)$ подтверждается зависимостью их диэлектрических свойств от E . На рис. 2.9 показана зависимость диэлектрической проницаемости зерновой массы от температуры и напряженности поля. Хотя для рассматриваемых технологий диэлектрические свойства не играют существенной роли, вид приведенной зависимости $\epsilon(E, t)$ важен для истолкования экспериментальных результатов, так как γ и ϵ связаны соотношением [37]:

$$\gamma = \gamma_1 \exp(-c / \epsilon), \quad (2.16)$$

где γ_1 - начальное значение удельной электрической проводимости, c - постоянная.

Как видно из рис. 2.9, с увеличением E диэлектрическая проницаемость возрастает, а с нею в соответствии с (2.16) возрастает и проводимость.

Зависимость $\gamma(E)$ кормовых систем более сложна по сравнению с $\gamma(t)$. Их вид обуславливается комплексом электрофизикохимических явлений в материалах, определяющих их свойства и поведение в электрическом поле. Наиболее важными нетепловыми проявлениями поля, определяющими электрические свойства материала в процессе обработки, являются: дополнительная диссоциация ионогенов, поверхностная проводимость системы, поляризация растительной ткани.

Дополнительная диссоциация ионогенов изменяет электрическую проводимость через концентрацию активных ионов. В отсутствие поля концентрация активных ионов, обладающих энергией диссоциации W_d :

$$c = c_0 \exp(-W_d / kT), \quad (2.17)$$

где c_0 - общая концентрация ионов кормовой массы, ионов/моль.

При наложении электрического поля ионам сообщается дополнительная кинетическая энергия:

$$\Delta W = q l E / 2,$$

на которую уменьшается энергия активации диссоциации W_d , где q - заряд иона, Кл; l - длина "свободного пробега" иона, м. В этом случае концентрация активных ионов:

$$c = c_0 \exp[-(W_d - \Delta W) / kT]. \quad (2.18)$$

Как отмечалось, в слабых полях $\Delta W \ll kT$ и поле не оказывает существенного влияния на изменение концентрации ионов. Однако это справедливо для однородных по структуре ионных материалов. Рассматриваемые кормовые системы в этом отношении занимают особое положение. По структуре их можно отнести к матричным смесям, жидкостную матрицу которых заполняют изолирующие (по сравнению с раствором) первичные структуры растительной ткани - клеточные оболочки (растительные мембраны) имеющие толщину 1...1,5 мкм. При напряжении на образце 10...100 В потенциал мембран составляет 50...80 мВ, а напряженность электрического поля в мембранах достигает $10^7...10^8$ В/м [35, 37]. При такой напряженности величины ΔW и kT становятся соизмеримыми, а так как растительная ткань содержит большое количество ионогенов (карбоксильные, метоксильные и др. группы, вода), то в сильных микрополях существенно возрастает диссоциация ионов этих веществ. Прямым доказательством этому служат рассматриваемые здесь экспериментальные зависимости $\gamma(E)$. Косвенным подтверждением является зависимость от E водородного показателя рН жидкостных фаз (рис. 2.8, 2.10). При электрогидролизе соломы с увеличением E возрастает щелочность среды (концентрация гидроксидов OH^-) вследствие дополнительной диссоциации гидроксильных, ионогенных групп. Возрастание наблюдается несмотря на то, что основная доля ионов OH^- расходуется на нейтрализацию кислотности среды. При электролизе зерна зависимость рН (E) более сложна, хотя общая тенденция состоит в повышении кислотности в результате диссоциации ионов крахмала.

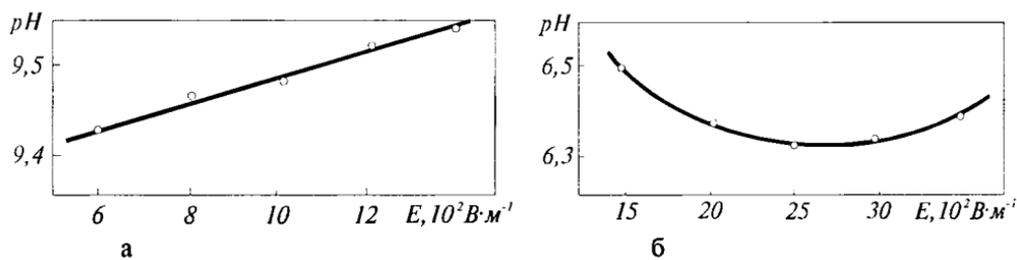


Рис. 2.10. Зависимость водородного показателя жидкостных фаз соломенной (а) и зерновой (б) масс от напряженности электрического поля.

Следует также отметить, что под действием упоминавшейся выше высокой напряженности поля, возникающей на уровне клеточных мембран, происходит их микропробой (микроплазмолиз), в результате которого электрическое сопротивление кормовой массы снижается, и тем больше, чем выше средняя в системе напряженность поля.

Поверхностная проводимость также влияет на свойства кормов, измельченные кормовые материалы, представляющие собой коллоидные капиллярно-пористые среды, при смешивании с раствором быстро насыщаются влагой под действием градиента влагосодержания. Молекулы воды (размер $2,5 \cdot 10^{-10}$ м) глубоко проникают в межмолекулярные поры растительной ткани (размер около $10 \cdot 10^{-10}$ м), нарушая водородные связи в макромолекулах, повышают их подвижность, создают условия для дополнительной диссоциации ионогенных групп. Чрезвычайно развитая поверхность частиц твердой фазы (поверхность клетчатки имеет порядок $2 \cdot 10^5$ м²/кг) и наличие влаги в порах и капиллярах обеспечивают высокую поверхностную проводимость, занимающую значительную долю в общей проводимости системы. В основе поверхностной проводимости лежат электрокинетические и электрокапиллярные явления. Скорость электрического переноса ионов в единственном капилляре в соответствии с формулой Гельмгольца прямо пропорциональна напряженности поля [38]:

$$v = \frac{\xi \epsilon_0 E}{4\pi\eta}, \quad (2.19)$$

где ξ - электрокинетический (дзета-) потенциал, В; ϵ_0 - абсолютная диэлектрическая проницаемость жидкой фазы, Ф/м; η - динамическая вязкость жидкой фазы, Пас.

В электрическом поле глубина пропитки (массоперенос влаги) возрастает под действием градиента поля в результате переноса молекул воды гидротированными ионами. В соответствии с (2.19) объем жидкости, переносимый за единицу времени, м³/с:

$$V = \frac{\xi \epsilon_0 E A}{4\pi\eta}, \quad (2.20)$$

где A - полная эффективная площадь поверхности поперечного сечения образца, м².

Повышение влагопереноса в кормовой массе и, следовательно, ее поверхностной и объемной проводимости подтверждается экспериментальной зависимостью $m_p/m_m(E)$ (рис. 2.11), где m_p - масса раствора, поглощенного образцом уплотненной соломенной массы; m_m - масса образца исходной влажности. Интересен тот факт, что при одинаковой исходной влажности в образце, обработанном в электрическом поле, содержание остаточной, трудноудаляемой механическим способом влаги на 5...8% выше, чем в образце, обработанном при косвенном нагреве.

Поляризация кормовой массы лежит в основе нетеплового технологического действия электрического поля (тока) и в значительной мере оп-

ределяет ее электрические свойства (поведение) в процессе обработки. Поляризация протекает на уровне первичных структур растительной ткани - клеточных мембран. Основными видами поляризации в рассматриваемом случае являются: ориентационная, концентрационная и активационная (электрохимическая). Общее их действие на мембраны состоит в отклонении потенциала мембраны от равновесного значения, имеющего место в отсутствии поля, и возникновении поляризационных сопротивлений, направленных против действия поля.

Наиболее важное технологическое значение имеет концентрационная поляризация, интенсифицирующая лимитирующую стадию процесса - доставку активных ионов к поверхности растительных мембран. Параллельно с этим изменяется и электрическая проводимость мембран и всей корневой массы в целом.

Вольтамперная характеристика симметричной мембраны в условиях диффузионных ограничений имеет вид [9,39]:

$$j = j_m \operatorname{th} \left(\frac{zF\phi}{RT} \right), \quad (2.21)$$

где j - плотность поляризующего тока через мембрану, образованную потоком активных ионов обоих знаков, A/m^2 ; j_m - предельная плотность тока, зависящая от концентрации активных ионов в растворе и соответствующая состоянию, когда все активные ионы вовлечены в процесс, A/m^2 ; z - зарядное число иона; F - число Фарадея, $\text{Кл}/\text{моль}$; R - универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$; T - температура среды, К ; ϕ - потенциал мембраны, В .

Для тонких (в понятиях электрохимии) мембран, когда $\phi \ll 2RT/zF$ (для одновалентных ионов при нормальной температуре можно принять $RT/zF=25$ мВ), разлагая гиперболический тангенс в (2.21) в ряд, получим линейную вольтамперную характеристику:

$$j = \frac{j_m z F \phi}{2RT}. \quad (2.22)$$

Поляризационное сопротивление в этом случае равно:

$$\Theta_{\text{кп}} = \frac{\phi}{j} = \frac{2RT}{zFj_m}, \quad (2.23)$$

не зависит от потенциала мембраны.

При больших значениях ϕ (определяемых напряженностью внешнего электрического поля) гиперболический тангенс в (2.21) стремится к еди-

нице, $j - \kappa j_m$. Поляризационное сопротивление при этом возрастает, а удельная электрическая проводимость стремится к нулю (рис. 2.12). При потенциале мембраны $\varphi = 80 \text{ мВ}$, $j \approx 0,9j_m$, т.е. концентрационная поляризация существенно влияет на вид вольтамперных характеристик кормовых систем и их электрическую проводимость. Приведенные зависимости получены для постоянного тока, но они справедливы и для переменного тока, т.к. время релаксации концентрационной поляризации является комплексным и известно как диффузионный импеданс Варбурга Z_D [9]. Выражение для Z_D можно получить, преобразовав соответствующим образом формулу (2.23). Для гармонического тока Z_D имеет вид:

$$Z_D = \bar{\varphi} / \bar{j} = RT / z^2 F^2 c \sqrt{j\omega D} = (1 - i)W / \sqrt{\omega}, \quad (2.24)$$

где $W = RT / z^2 F^2 c \sqrt{2D}$ - постоянная Варбурга; $\bar{\varphi}$ и \bar{j} - комплексные амплитуды потенциала и тока; c и D - концентрация и коэффициент диффузии активных ионов; ω - круговая частота тока.

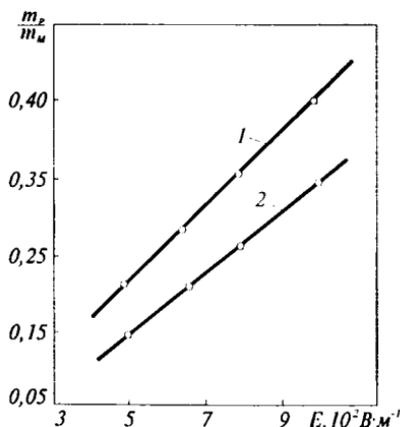


Рис. 2.11. Зависимость глубины пропитки в свободном растворе образцов соломенной (1) и зерновой (2) масс от напряженности электрического поля.

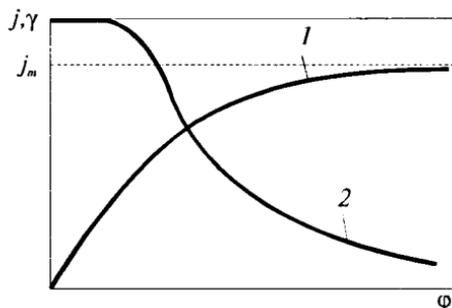


Рис. 2.12. Иллюстрационные кривые теоретической вольтамперной характеристики растительной мембраны (1) и зависимости ее удельной электрической проводимости от потенциала (2) при концентрационной поляризации.

Упомянутыми выше опытными факторами не исчерпывается влияние электрического поля на свойства и поведение кормовых систем в процессе обработки. Подробное рассмотрение всей совокупности факторов воз-

действия, в т.ч. ориентационной и активационной поляризации, десольватации ионов и др., составляет самостоятельную задачу.

В свете приведенного вернемся к рассмотрению зависимостей $\gamma(E, t)$. Вид этих зависимостей (рис. 2.5, 2.7, 2.8) и вольтамперных характеристик (рис. 2.13, 2.14) показывает, что кормовые системы, как электрическая нагрузка, являются нелинейными, и их электрическую проводимость следует характеризовать удельной дифференциальной проводимостью $\gamma = dj/dE$.

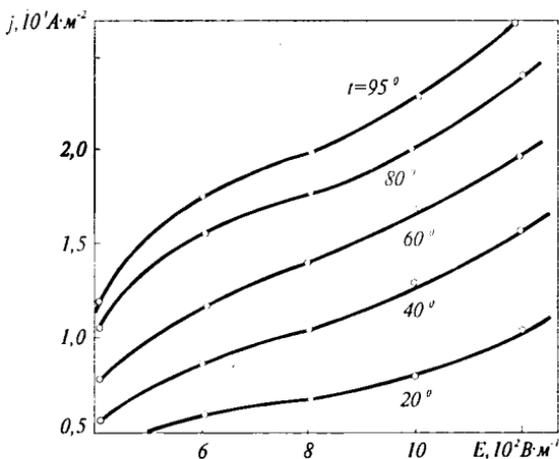


Рис. 2.13. Вольтамперные характеристики соло-массы при разной температуре.

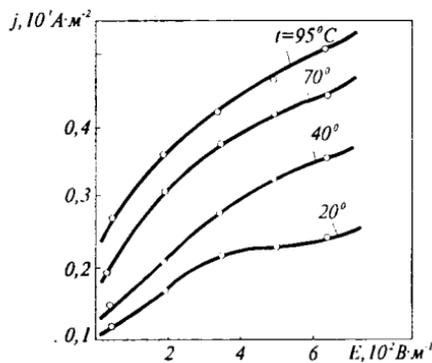


Рис. 2.14. Вольтамперные характеристики зерновой массы при разной температуре.

Зависимости $\gamma(E, t)$ имеют сложный характер (рис. 2.7, 2.8). С увеличением E удельная проводимость γ возрастает вследствие повышения концентрации носителей и поверхностной проводимости в соответствии с формулами (2.18, 2.19, 2.20). Одновременно возрастают поляризация и поляризационное сопротивление по (2.23, 2.24), действующее на γ в обратном направлении. Характер зависимостей $\gamma(E)$ показывает, что действие первых двух факторов преобладает над влиянием поляризации.

С повышением температуры зависимость $\gamma(E)$ усложняется вследствие увеличения теплового движения (трансляторного колебания) ионов, дезориентирующего поляризацию в соответствии с общей закономерностью:

$$P = kE / T,$$

где P - степень поляризованности, E - напряженность поля, T - температура, k - коэффициент, не зависящий от E и T .

Зависимость $\gamma(E)$ соломенной массы (рис. 2.7) можно условно разделить на три области. При малых значениях E (до 750...950 В/м) γ интенсивно возрастает, и тем больше, чем выше температура. На этом участке в соответствии с формулой (2.23) сопротивление концентрационной поляризации $\theta_{\text{кп}}$ не зависит от плотности поляризационного тока (напряженности поля). Это видно из кривых рис. 2.12, начальный участок можно аппроксимировать линейной зависимостью. Помимо упомянутых выше факторов, интенсивному возрастанию γ на этом участке способствует потеря соломой при повышенной температуре кристалличности и переход в высокоэластичное состояние, характеризующее повышенной проводимостью. Вторая условная область (750...1050 В/м в зависимости от температуры) характеризуется стабилизацией зависимости $\gamma(E)$ при низких температурах и даже снижением γ при $t > 60$ °С. Основную роль здесь играет концентрационная поляризация. Значения E , разделяющие первую и вторую области, соответствуют концентрационному насыщению мембран ионами, когда все активные ионы уже вовлечены в процесс и дальнейшее повышение E в этой области (при $t = 95$ °С это 750...950 В/м) уже не приводит к повышению тока и, следовательно, проводимости. Это соответствует значению E , когда $j \rightarrow j_m$ (рис. 2.12). В этом случае дифференциальная проводимость мембраны:

$$\gamma_{\text{кп}} = \left[\frac{dj}{d\varphi(E)} \right]_{j \rightarrow j_m} \rightarrow 0$$

Локальный максимум γ (точка раздела первой и второй области) при повышении температуры смещается в сторону меньших значений E , то есть с повышением температуры диффузионное насыщение мембран наступает при меньших значениях E , т.е. поляризационного тока, вследствие повышения подвижности ионов. При дальнейшем повышении E (третья область при $t = 95$ °С это более 950 В/м) значение γ вновь возрастает в результате диссоциации молекул воды, вовлечения в процесс новых видов ионов и влияния денатурационных процессов в материале.

Приведенные выше суждения о характере зависимости $\gamma(E)$ соломенной массы подтверждаются видом ее вольтамперных характеристик (рис. 2.13). Характеристики нелинейны, и тем больше, чем выше температура. В них тоже усматриваются три области. Две первые из них напоминают теоретическую вольтамперную характеристику растительной мембраны (рис. 2.12), но существенно деформированы вследствие влияния сквозной проводимости массы.

Зависимость $\gamma(E)$ зерновой (рис. 2.8) и картофельной (рис. 2.5) масс по виду несколько отличаются от соломенной. Отличие состоит в том, что у

зерна после 75 °С проводимость снижается (видно из температурной характеристики рис. 2.4), а при $t = 100$ °С кривая $\gamma(E)$ лежит ниже, чем при 80 °С. Максимум γ с ростом температуры снижается в область более низких значений E . Схожи и вольтамперные характеристики зерновой (рис. 2.14) и соломенной масс.

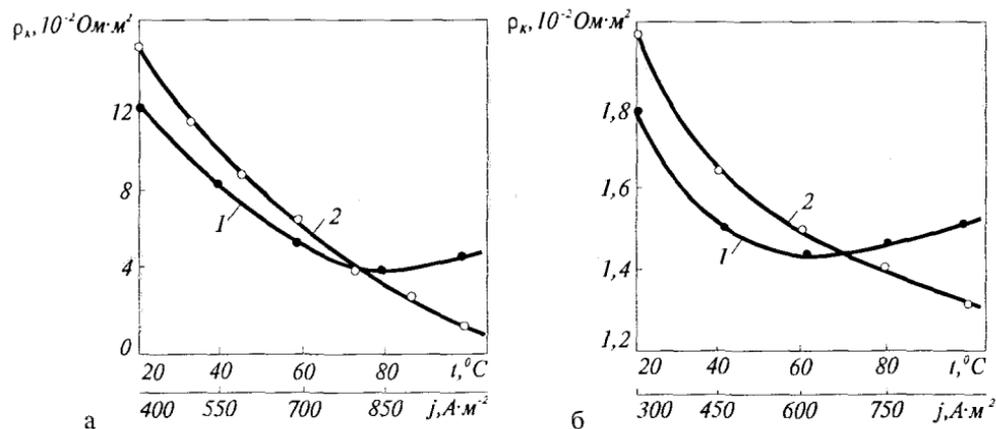


Рис. 2.15. Зависимость удельного контактного сопротивления соломенной массы-электрод (а) и зерновой массы-электрод (б) от температуры массы (1) и плотности тока на электродах (2).

Контактное сопротивление масса-электрод при равных прочих условиях проведения процессов, оговоренных в табл. 1.18, определяется двумя факторами: температурой массы t и плотностью тока на электродах j [41].

Виды зависимостей $\rho_k(t, j)$ соломенной и зерновой масс схожи (рис. 2.15): ρ_k снижается с возрастанием обоих факторов. Основную роль играет температура, влияние плотности тока проявляется через температуру. С повышением температуры уменьшается жесткость частиц и увеличивается их контактируемость с поверхностью электродов. Это особенно заметно у соломенной массы, у которой в силу жесткости частиц контактное сопротивление почти на порядок выше, чем у зерна. При нагреве частицы соломы теряют кристалличность и переходят в эластичное состояние. Снижение ρ_k зерна в том же диапазоне температур более, чем в два раза. Вместе с тем влияние температуры двояко: снижение ρ_k происходит лишь до определенной температуры, а затем опять возрастает. Это видно из рис. 2.15, особенно для зерновой массы. Начиная с некоторой температуры массы (соломенной - 75 °С, зерновой - 60 °С), температура поверхностных слоев материала интенсивно повышается, происходит ускорение денатурационных изменений контакт-

ного слоя материала, преобразование и подсушивание. В результате ρ_k повышается и даже может нарушиться контакт. Значение ρ_k зависит от материала электродов, состояния их поверхности, температуры и других факторов.

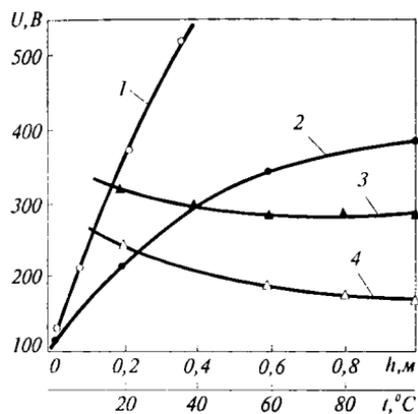


Рис. 2.16. Зависимость пробивного напряжения зерновой (1) и соломенной (2) масс от толщины образца и температуры (соответственно 3 и 4).

Электрическая прочность. В литературе обычно рассматривают закономерности пробоя жидких и твердых материалов, используемых, главным образом, в целях электрической изоляции. Кормовые системы сочетают обе фазы и имеют иное назначение. На рис. 2.16 показаны экспериментальные зависимости напряжения пробоя $U_{пр}$ соломенной и зерновой масс от двух определяющих факторов: толщины образца h (расстояние между электродами l_0) и температуры массы t . Вид зависимостей позволяет отнести характер нарушения электрической прочности кормовых систем к тепловому пробоям.

Наиболее известна теория теплового пробоя [37]. В соответствии с этой теорией при упрощенных предпосылках зависимость $U_{пр}(h, t)$ можно представить в виде:

$$U_{пр} = 2\sqrt{\lambda / (\gamma_0 \alpha)} \exp[-\alpha(t - t_0) / 2] \varphi(c), \quad (2.25)$$

где λ - теплопроводность материала, Вт/(м·°C); γ_0 - начальная удельная электрическая проводимость материала, См/м; α - температурный коэффициент проводимости, $1/°C$; t, t_0 - температура материала и окружающей среды, °C; $\varphi(c)$ - сложная функция величины $c = \beta h$, где β - параметр, определяющий условия охлаждения образца, $1/м$; h - толщина образца, м. Функция $\varphi(c)$ возрастает с увеличением h .

Вид экспериментальных зависимостей (рис. 2.16) подтверждает, в основном, формулу (2.25). Пробивное напряжение $U_{пр}$ возрастает с увеличе-

нием толщины образца h , причем для зерновой массы, у которой удельная проводимость γ и ее температурный коэффициент α значительно меньше, чем у соломенной, этот рост происходит значительно быстрее. С повышением температуры $U_{пр}$ снижается, однако оно незначительно, особенно для зерновой массы вследствие низкого ее температурного коэффициента проводимости.

Вместе с тем, пробой кормовых систем нельзя отнести к "чисто" тепловому. Для него характерны и некоторые черты электрического пробоя, обусловленные неоднородностью структуры кормовых систем и неравномерностью электрического поля в них, протекающего вследствие поляризации мембран. Этим объясняется слабая зависимость $U_{пр}(t)$ и проявляющаяся зависимость $U_{пр}$ от напряжения на образце. Строение и состав кормовых систем таковы, что в физической картине нарушения их электрической прочности можно наблюдать и элементы, присущие ионизационному пробую.

2.1. Электрические характеристики кормовых систем

Характеристики	Фуражное зерно (ЭГТО)	Солома (ЭТХО)	Меласса	Сок картофеля
Удельная электрическая проводимость при 20 °С, См/м	0,15 ± 0,05	0,25 ± 0,12	0,025 ± 0,07	1,08 ± 0,37
Температурный коэффициент проводимости, 1/°С	0,037	0,061	0,053	0,028
Диапазон изменения контактного сопротивления, Ом·м ²	0,013...0,20	0,01...0,15	0,01...0,09	0,005...0,15
Пробивное напряжение при 90 °С, В	170	280	625	700

2.3. Физико-механические свойства

Основными факторами, влияющими на физико-механические свойства кормовых систем в условиях обработки электрическим током, являются: давление уплотнения, влажность, температура, вид конструкционного материала стенок рабочих камер и электродов. Исследованию физико-механических свойств зерна и соломы посвящены работы [42...50].

Усилие, необходимое для создания требуемой плотности соломенной или зерновой массы в зоне обработки, Па:

$$P = A [\exp a (\rho_c \dots \rho_0) - 1], \quad (2.26)$$

где A , a — эмпирические коэффициенты, характеризующие сопротивление материала сжатию, соответственно, Па и $\text{м}^3/\text{кг}$; ρ_0 , ρ_c — начальная и текущая плотность кормового материала, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Зависимость коэффициентов от температуры t , $^{\circ}\text{C}$, длины частиц измельчения l , м, и влажности ω , %, для соломы имеет вид:

$$A = 7,14 \cdot 10^6 \cdot (0,4 - 5 \cdot 10^{-4} t) (0,2 + 4,7 l - 9,5 l^2) (0,4 + 1,7 \cdot 10^{-3} \omega + 1,5 \cdot 10^{-5} \omega^2),$$

$$a = 5,64 \cdot 10^{-3} (2,8 - 2,7 \cdot 10^{-3} t) 1,8^{\omega^{0,26}}, \quad (2.27)$$

для фуражного зерна:

$$A = 1,65 \cdot 10^6 (0,3 - 3,8 \cdot 10^{-4} t) (0,3 + 1,7 \cdot 10^{-3} \omega),$$

$$a = 3,42 \cdot 10^{-3} (1,6 - 1,1 \cdot 10^{-3} t) 1,6^{\omega^{0,2}}.$$

Плотность после уплотнения соломенной массы

$$\rho = (\omega + 1) (\rho_0 + 1/a \ln[(P+A)/A]), \quad (2.28)$$

зерновой массы

$$\rho = \rho_0 \exp dW (1 + bP + cP^2),$$

где $d = 0,55$; $b = 15,7 \cdot 10^{-3}$; $c = 8,6 \cdot 10^{-5}$ — эмпирические коэффициенты; W — модуль увлажнения. Уравнения справедливы при $P \leq 500$ кПа и $W = 0,6 \dots 1,2$.

При уплотнении материала в открытой камере, что имеет место при обработке соломы и зерна, противодавление создается в результате трения спрессованного материала о ее стенки. Наряду с осевым, уплотняющим P , возникает боковое давление, кПа:

$$q = \mu P, \quad (2.29)$$

где μ — коэффициент бокового давления; P — осевое давление (2.26), здесь кПа.

Зависимость μ от основных факторов показана на рис. 2.17. В области до 1 Мпа зависимость коэффициента μ для соломы от давления уплотнения незначительная. После снятия осевого давления боковое понижается до какой-то величины, составляющей примерно 10 % от величины бокового, и называется остаточным давлением.

Коэффициенты трения соломы и зерна о поверхность рабочей камеры и их зависимости от факторов, сопутствующих электрообработке, показаны на рис. 2.18. Они определены по методике, изложенной в [45,46,48].

Изменение температуры от начальной до конечной, предусмотренной технологией, уменьшает коэффициенты в 1,8...2,0 раза.

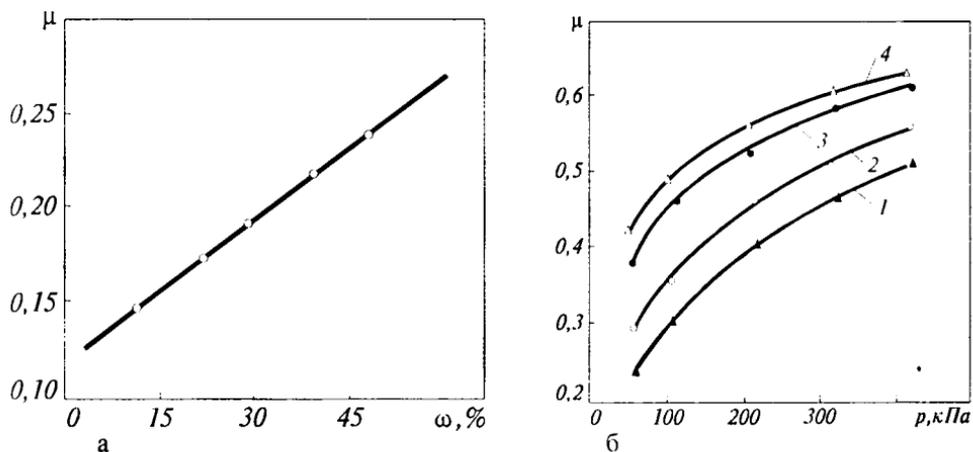


Рис. 2.17. Зависимость коэффициентов бокового давления зерновой (а) и соломенной (б) массы от осевого давления P и влажности $\omega=30$ (1); 35 (2); 40 (3) и 45 % (4).

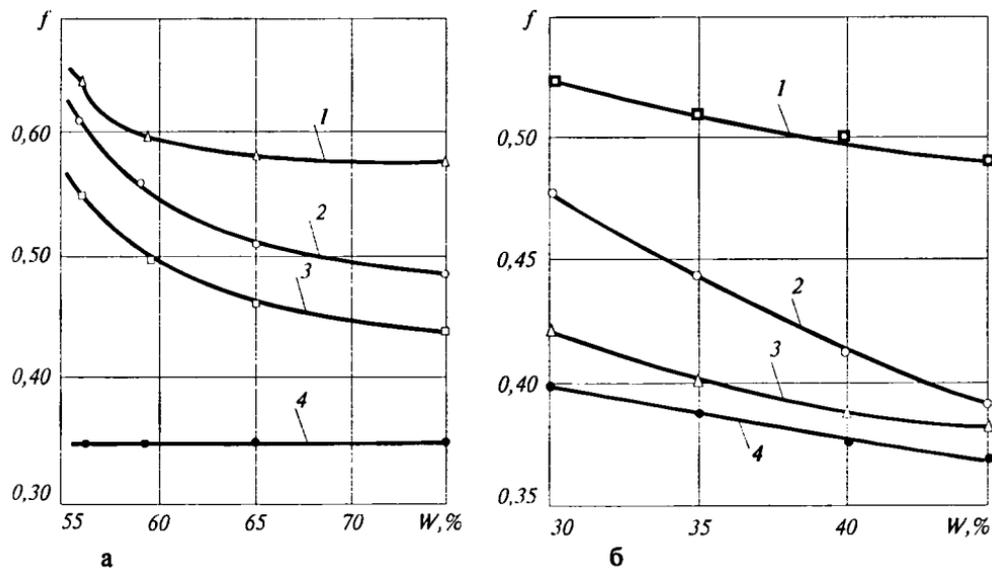


Рис. 2.18. Зависимость коэффициентов трения соломенной (а) и зерновой (б) массы от влажности ω по абсцementsу (1), стали Х18Н10Т (2), текстолиту ПТ (3), графиту ГЭ (4).

Угол естественного откоса α соломенной массы, свободно насыпанной на плоскую поверхность, составляет 50...60, зерновой — 40...45 градусов.

Уплотнение влияет на релогические, электрические и теплофизические характеристики кормосмеси, энергоемкость процесса [50].

Затраты энергии на уплотнение сено-соломистых материалов [44]

$$Q_y = B \frac{LS}{m} \left[a \rho_o e^{-a \rho_o} \left(\text{li} e^{a \rho_o \frac{L}{h}} - \text{li} e^{a \rho_o} \right) - \frac{h}{L} \left(e^{a \rho_o \frac{L-h}{h}} - 1 \right) \right] \quad (2.30)$$

где m — масса корма; ρ_o — начальная плотность корма; li — интегральный логарифм; a , B — эмпирические коэффициенты, характеризующие сопротивление корма уплотнению; LS , hS — объем корма до и после уплотнения.

Введем в (2.30) степень уплотнения корма $K = L/h$ (рис. 2.19) и перейдем к удельным энергозатратам на уплотнение:

$$q_y = \frac{B}{\rho_o} \left[a \rho_o e^{-a \rho_o} \left(\text{li} e^{a \rho_o K} - \text{li} e^{a \rho_o} \right) - \frac{1}{K} \left(e^{a \rho_o (K-1)} - 1 \right) \right]. \quad (2.31)$$

Затраты энергии на выталкивание корма [44]

$$Q_B = \frac{S}{m} \left[\frac{S}{f \mu_1 l} \left(P + \frac{q_o}{\mu_1} \right) \left(1 - e^{-f \mu_1 \frac{h}{S}} \right) - \frac{q_o}{\mu_1} h \right], \quad (2.32)$$

где S — сечение рабочей камеры; q_o — остаточное боковое давление; μ_1 — коэффициент бокового давления; f — коэффициент трения корма о стенки камеры; l — периметр камеры; P — давление уплотнения; h — толщина уплотненного слоя (слоя выталкивания); b — ширина камеры.

Удельные энергозатраты на выталкивание

$$Q_B = \frac{1}{\rho_o K h} \left[\frac{b}{4 f \mu_1} \left(P + \frac{q_o}{\mu_1} \right) \left(1 - e^{-\frac{4 f \mu_1 h}{b}} \right) - \frac{q_o}{\mu_1} h \right], \quad (2.33)$$

Рассмотрим влияние уплотнения на плотность ρ_c , удельную теплоемкость c_c и удельную электрическую проводимость γ_c кормовой массы.

Плотность увлажненного корма

$$\rho_c = \frac{\rho V + \rho_p V_p}{V_c}, \quad (2.34)$$

где ρ, ρ_c — масса неувлажненного корма и увлажняющего раствора в объеме увлажненного корма V_c ; V, V_p — объем, занимаемый, соответственно, неувлажненным кормом и увлажняющим раствором в объеме V_c .

Примем $V_c = 1 \text{ м}^3$, тогда

$$V = \frac{\rho}{\rho_{nc}}, \quad V_p = \frac{\rho_p}{\rho_{np}}, \quad (2.35)$$

где ρ_{nc}, ρ_{np} — пикнометрическая плотность корма и увлажняющего раствора, приближенно для соломы — 880...1200, для фуражного зерна — 900...1050 кг/м³.

$$\rho = \rho_o K, \quad \rho_p = \rho_{nc} - \rho_o K. \quad (2.36)$$

Подставим (2.35) и (2.36) в (2.34) и получим зависимость $\rho_c(K)$:

$$\rho_c = \frac{\rho_o^2 K^2}{\rho_{nc}} = \frac{(\rho_{nc} - \rho_o K)^2}{\rho_{np}}. \quad (2.37)$$

Удельная теплоемкость увлажненного корма

$$c_c = \frac{\rho c + \rho_p c_p}{\rho_c}, \quad (2.38)$$

где c, c_p — удельная теплоемкость неувлажненного корма и увлажняющего раствора.

Формула (2.38) с учетом (2.35) принимает вид:

$$c_c = \frac{c \rho_o K + (\rho_{nc} - \rho_o K) c_p}{\rho_c}. \quad (2.39)$$

Формулы (2.37) и (2.39) справедливы при условии, что в корм вносится максимально возможное при данной степени уплотнения количество увлажняющего раствора.

Максимальное количество раствора, которое можно внести в корм при данном уплотнении

$$\rho_{pm} = \rho_{nc} - \rho = \rho_{nc} - \rho_o K,$$

в относительных единицах

$$W_m = \frac{\rho_{nc} - \rho_o K}{\rho_o K}, \quad (2.40)$$

где W_m — максимальное значение модуля увлажнения корма.

Увлажненная солома или зерно могут быть рассмотрены как двухфазные среды, удельная проводимость которых зависит от степени уплотнения K :

$$\gamma_c = \frac{\gamma_{np} \rho_o K + \gamma_p (\rho_{nc}^2 - \rho_{nc} \rho_o K)}{\rho_{nc}^2 + \rho_o K (\rho_{np} - \rho_{nc})}, \quad (2.41)$$

где γ , γ_p — удельная проводимость неувлажненного корма и увлажняющего раствора.

Усилие, необходимое для создания требуемой степени уплотнения

$$P = B [\exp a(\rho_o K - \rho_o) - 1]. \quad (2.42)$$

Численное решение (2.31), (2.32), (2.37), (2.39), (2.41), (2.42) применительно к электрохимической обработке соломы представлено на рис. 2.20. Исходными данными принято: $\rho_{nc} = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{np} = 1000 \text{ кг/м}^3$, $c = 2,3 \text{ кДж/(кг } ^\circ\text{C)}$, $c_p = 4,19 \text{ кДж/(кг } ^\circ\text{C)}$, $\gamma = 1 \cdot 10^{-3} \text{ См/м}$, $\gamma_p = 3,5 \text{ См/м}$, $B = 317 \text{ кПа}$, $a = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$, $\mu_1 = 0,4$, $q_o = 0,5P$, $h = 0,05 \text{ м}$, $f = 0,55$.

На примере электрообработки соломы видно, что степень уплотнения существенно влияет на удельную теплоемкость и удельную проводимость материала, предельную степень увлажнения корма, усилие уплотнения и, в конечном счете, на энергоемкость процесса. С увеличением степени уплотнения материала энергоемкость процесса снижается в результате уменьшения количества увлажняющего раствора, который можно внести в корм. Фактором, ограничивающим снижение увлажненности соломы и энергоемкости обработки, является удельная проводимость. При заданных технологических параметрах процесса существует минимальное

значение удельной проводимости корма, при которой можно осуществить его электрообработку:

$$\gamma_{c \min} = \frac{\rho_c c_c \theta}{E^2 \tau}, \quad (2.43)$$

где τ — время, за которое необходимо обработать корм массой ρ_c ; E — напряженность электрического поля.

Применительно к технологии и устройствам электрообработки соломы производительностью 1 т/ч минимальная удельная проводимость $\gamma_{c \min} = 0,13$ См/м. Эта величина удельной проводимости достигается при плотности увлажненного корма $\rho_c = 580$ кг/м³ (рис. 2.19,б). Дальнейшее увеличение ρ_c не позволит осуществить электрообработку при заданных технологических требованиях из-за низкой удельной проводимости.

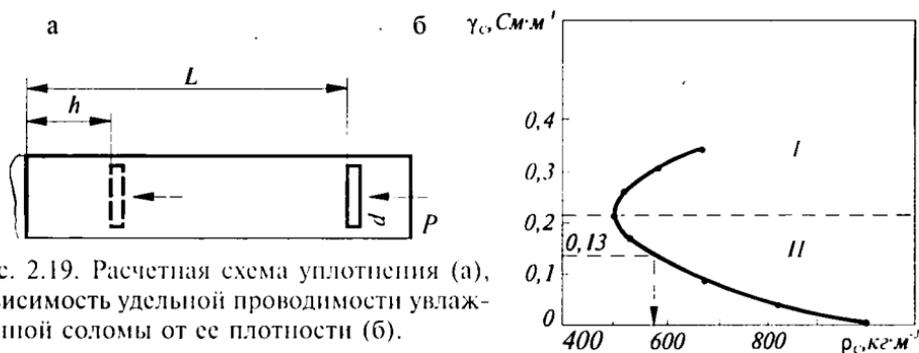


Рис. 2.19. Расчетная схема уплотнения (а), зависимость удельной проводимости увлажненной соломы от ее плотности (б).

Согласно результатам расчетов (рис. 2.20) минимальное значение степени увлажнения $W = 0,4$, минимальный возможный расход энергии $Q=270$ кДж/кг, максимальное усилие уплотнения $P=(15...20) 10^5$ Па. Степень уплотнения соломы до $\rho_c = 580$ кг/м³ зависит от исходной плотности измельченной соломы.

Плотность картофельного сока подчинена общей зависимости для соков [49]:

$$\rho = 1501,19 - 5,16\omega - 0,97t + 0,006 \omega t. \quad (2.44)$$

При температуре 20 °С и влажности 90 % плотность сока из картофеля составляет 1028 кг/м³.

Динамическая вязкость сока, Па·с, зависит от температуры:

$$\eta = 2,585 - 0,082t + 0,001t^2. \quad (2.45)$$

Реологические свойства мелассы, как ни одного из кормов, сильно зависят от температуры и связанной с ней вязкости. При низких температурах (5°C) меласса густеет и теряет текучесть ($130\text{ Па}\cdot\text{с}$). При 20°C ее удельная плотность составляет $(1,38...1,44) \cdot 10^3\text{ кг/м}^3$ и вязкость $15\text{ Па}\cdot\text{с}$. При 100°C плотность понижается до $0,72 \cdot 10^3\text{ кг/м}^3$, а вязкость до $2,0...2,5\text{ Па}\cdot\text{с}$. При переработке свеклы с пониженными технологическими качествами вязкость мелассы может быть выше в $2...3$ раза, заметно изменятся и другие свойства.

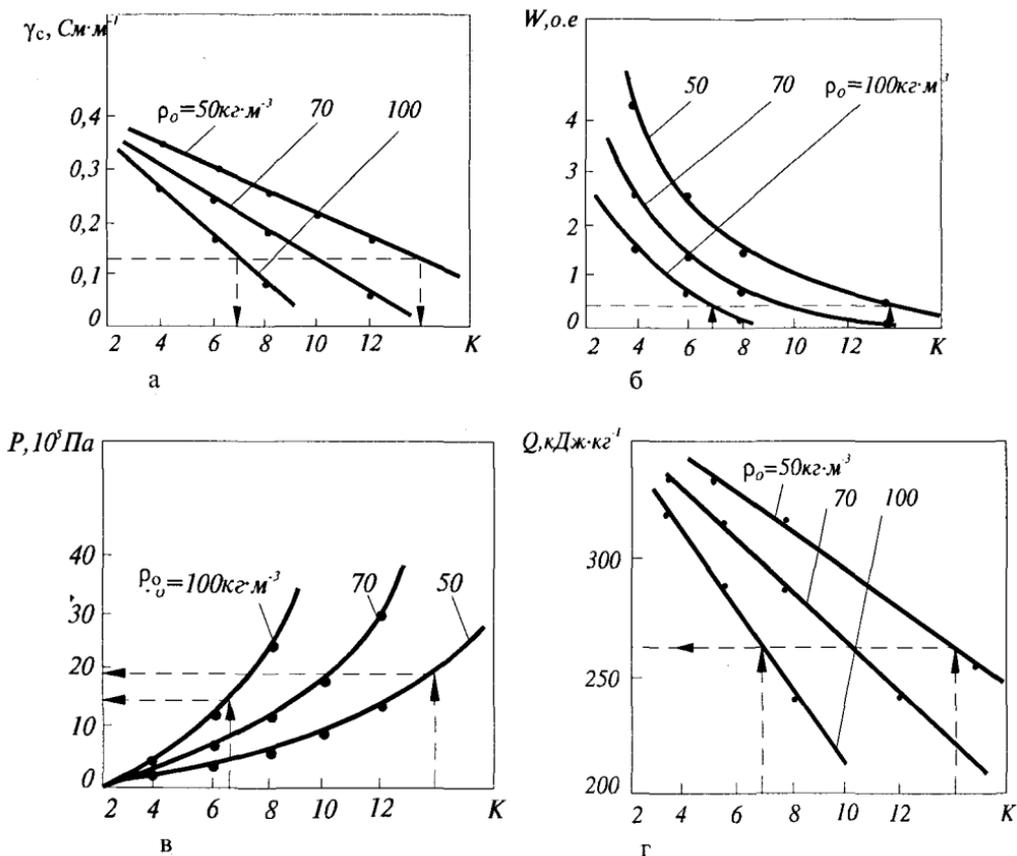


Рис. 2.20. Зависимость удельной проводимости увлажненной соломы (а) степени увлажнения (б), усилия уплотнения (в) и энергоемкости обработки (г) от степени уплотнения соломы.

2.4. Теплофизические свойства

Рассматриваемые корма имеют коллоидное, капиллярно-пористое строение, для которого характерна дисперсная структура, различающаяся по фракциям в зависимости от размера частиц веществ. Эти смеси могут быть охарактеризованы только эффективными значениями теплофизических характеристик.

Усредненные значения теплофизических характеристик ячменя и соломы приняты из [51, 52] соломенной и зерновой масс, мелассы и картофельного сока — по результатам наших исследований. Численные значения характеристик (табл. 2.2) соответствуют базовым технологиям (табл. 1.18).

2.2. Теплофизические характеристики кормовых материалов при 20 °С

Характеристики	Ячмень, влажность, 13 %	Солома измельченная, влажность 15 %	Зерновая масса	Соломенная масса	Меласса	Сок картофеля
Плотность, кг/м ³	629	60	500...550	600...700	1380...1440	1028
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·°С)	1,6	2,2...2,3	2,1...2,2	3,25	2,51	3,14
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	0,09	0,05...0,06	0,30...0,32	0,28...0,30	0,32	0,58
Температуропроводность, 10 ⁻⁸ м ² /с	8,8	42,0...42,4	26,4...28,6	13,2...14,3	9,20	18,0

3. НЕКОТОРЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

3.1. Электротермохимическая обработка соломы

Технология электротермохимической обработки (ЭТХО) соломы осуществлена на базе оборудования кормоцеха КОРК-15 [29]. Основные технологические операции включают (рис.3.1): прием соломы из автотранспорта; рыхление рулонов, тюков и предварительное измельчение; выравнивание потока предварительно измельченной соломы и удаление посторонних предметов; измельчение и смешивание с раствором химреагентов; прием кристаллического или жидкого химического реагента; приготовление водного раствора химреагента необходимой концентрации; дозированную подачу химреагента в измельчитель-смеситель; прием и дозирование измельченной и увлажненной соломы в установку электротермохимической обработки; уплотнение и перемещение соломенной массы в зоне обработки; электротермохимическое воздействие на солому; выгрузку обработанной соломы на линию смешивания для получения кормосмеси.

Технологический процесс ЭТХО соломы осуществляют следующим образом (рис. 3.2). Солому в рулонах, тюках или в рассыпанном виде выгружают из транспортных средств в питатель-загрузчик 1 линии измельчения соломы, где ее предварительно измельчают, дозируют и подают на транспортер-камнеотделитель. Здесь поток соломы выравнивают по объему, удаляют тяжелые примеси и подают в измельчитель-смеситель кормов. В резервуар оборудования для приготовления и дозирования раствора химреактивов 9 заливают воду. Химический реагент (кальцинированная сода, хлористый натрий) подают шнеком в емкость с мешалкой, заполненной водой. Раствор перекачивают в расходную емкость и оттуда насосом-дозатором подают в измельчитель-смеситель кормов 3. Измельченная и увлажненная соломенная масса поступает по пневмотранспорту 4 через циклон 5 в накопитель-дозатор 6, откуда дозированно по транспортеру 8 ее подают в приемный бункер установки ЭТХО 7. В установке соломенную массу уплотняют и проталкивают через камеру обработки, в которой на нее действуют электрический ток, теплота, влага и химреагенты. Обработанная солома поступает на сборный транспортер кормоцеха КОРК-15.

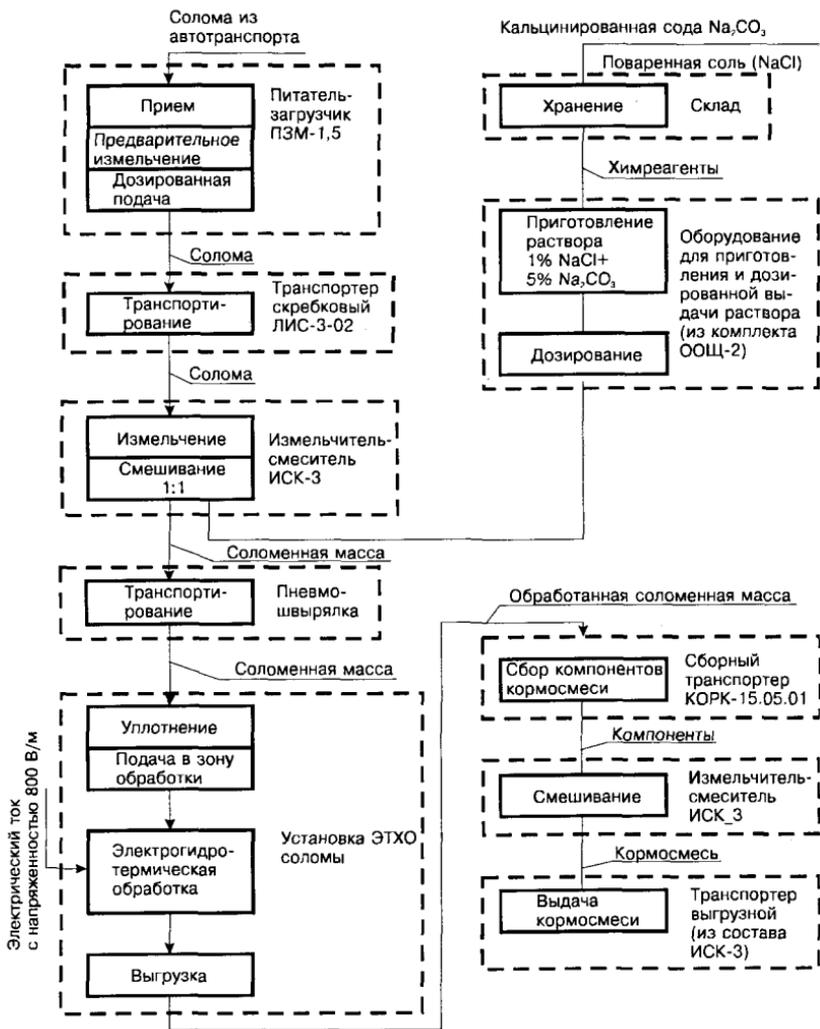


Рис. 3.1. Схема последовательности процессов ЭТХО соломы.

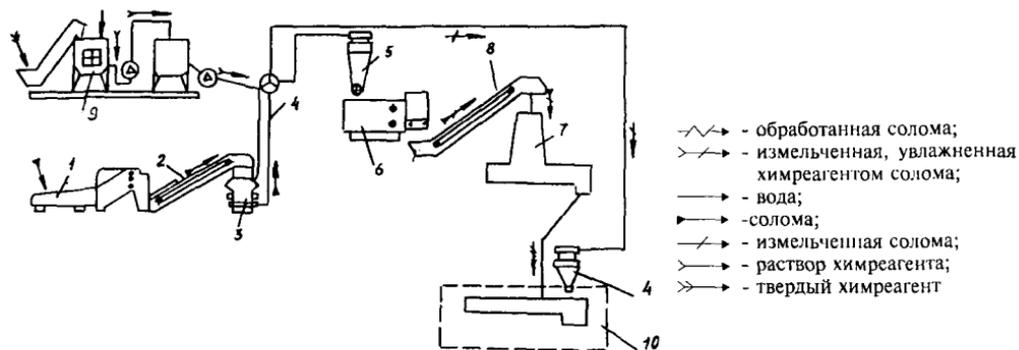


Рис. 3.2. Технологическая схема линии ЭТХО соломы:

1 - питатель-загрузчик кормов; 2 - транспортер-камнеуловитель; 3 - измельчитель-смеситель кормов; 4, 5 - пневмосистема; 6 - накопитель-дозатор; 7 - установка ЭТХО соломы; 8 - транспортер; 9 - оборудование для приготовления и дозирования химического реагента; 10 - сборный транспортер.

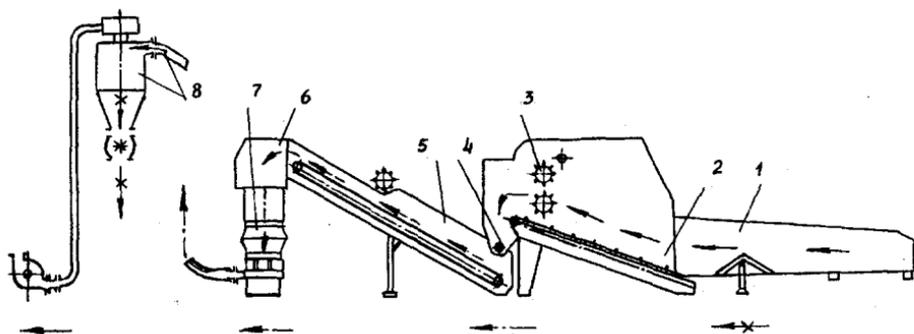


Рис. 3.3. Схема технологического процесса ЛИС - 3 - 1:

1 - лоток питателя-загрузчика кормов; 2 - конвейер; 3 - режущие барабаны; 4 - шнек; 5 - транспортер; 6 - головка транспортера; 7 - измельчитель-смеситель кормов; 8 - пневмосистема.

Комплект оборудования для электротермохимической обработки соломы состоит из линии измельчения соломы ЛИС-3-1, оборудования приготовления и дозирования химического реагента ООЩ-2, накопителя-дозатора КТУ-10А с электроприводом, установки ЭТХО соломы, вспомогательных транспортеров.

Линия измельчения соломы ЛИС-3-1 показана на рис.3.3. Солома из транспортного средства поступает на приемный лоток питателя-загрузчика

1. Свободный конец лотка поднимают гидроцилиндрами вверх, и солома под собственной массой сдвигается на конвейер 2, который подает ее с заданной скоростью к режущему устройству 3. Барабаны режущего устройства разрыхляют рулоны и предварительно измельчают солому, которая затем поступает с помощью сборного шнека 4 на транспортер 5. В головке транспортера 6 солому очищают от тяжелых предметов и направляют в измельчитель-смеситель кормов 7, где ее окончательно измельчают.

Производительность линии до 5т/ч при измельчении соломы влажностью 40%. Степень измельчения частиц длиной 50 мм в общей массе 85%. Установленная мощность электродвигателей 76,9 кВт. Габариты в метрах 17,3 × 9,94 × 7,48. Масса 9900 кг.

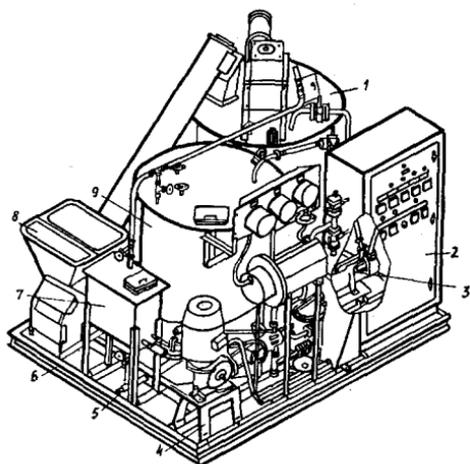


Рис. 3.4. Оборудование для приготовления и дозирования щелочи ООЩ - 2: 1 - реактор; 2 - электрошкаф; 3 - насос щелочи; 4 - блок дозирования и подогрева щелочи; 5 - труба для слива; 6 - рама; 7 - резервуар для воды; 8 - устройство загрузочное; 9 - резервуар расходный.

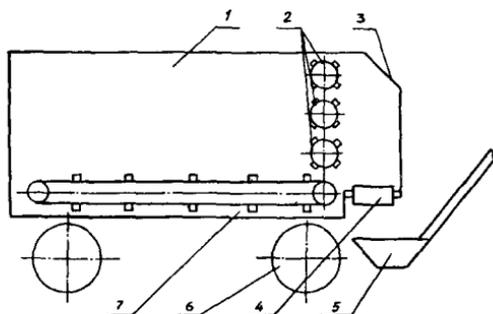


Рис. 3.5. Схема кормораздатчика КТУ - 10А:

1 - кузов; 2 - битеры; 3 - стенка защитная; 4 - транспортер поперечный; 5 - транспортер; 6 - ходовые колеса; 7 - транспортер продольный.

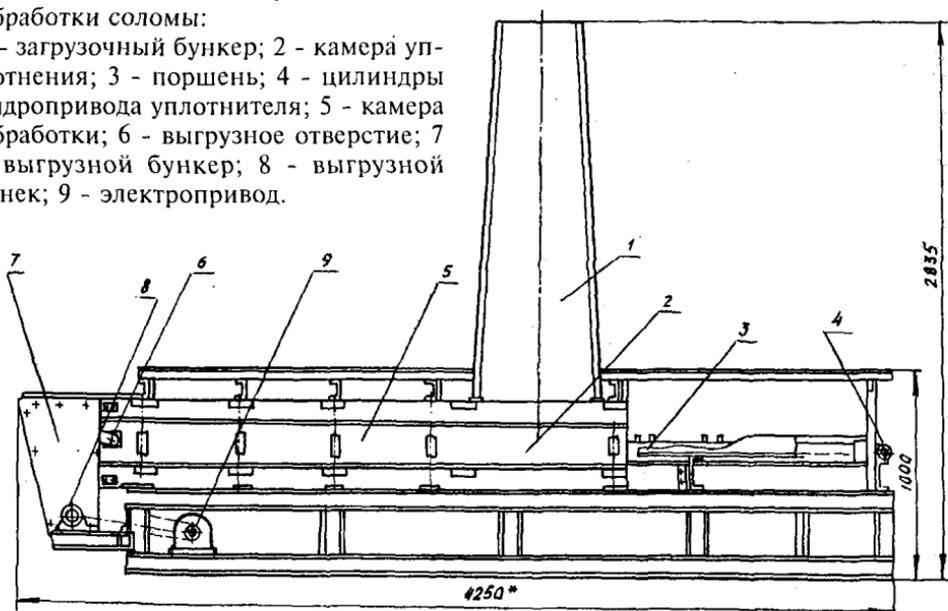
Оборудование приготовления и дозирования щелочи (рис.3.4.) смешивает воду с химическими реагентами, поддерживает при необходимости температуру раствора и дозирует его подачу в солому. Применительно к ЭТХО соломы раствор химреагентов состоит из 5 % кальцинированной соды, 1,5 % поваренной соли и воды. На одну тонну воздушно-сухой соломы вносят та-

кое же количество водного раствора химреагентов. Химреагенты засыпают в бункер загрузочного устройства 8, подают транспортером в реактор 1 и там предварительно растворяют в воде. Рабочий раствор готовят и хранят в резервуаре 9. Вместимость резервуаров 1,6 м³. Подача раствора 50...400 л/ч. Установленная мощность 10, 9 кВт. Габариты, м, 2,5 × 2 × 2,2. Масса 1460 кг.

Накопитель-дозатор предназначен для приема и равномерной подачи измельченной и увлажненной соломы в установку электротермохимической обработки (рис.3.5). Для этого используют стационарную модификацию кормораздатчика КТУ-10А, оборудованного комплектом сменных частей КТУ-20.000. Сверху накопителя устанавливают циклон, соединенный с пневмопроводом от измельчителя. Солома из кузова 1 поступает через транспортер 4 и дополнительный транспортер ТС-40С в установку ЭТХО. Подачу регулируют механизмом КТУ и частотой включения электропривода транспортеров 4 и 7. Производительность от 1 до 3 т/ч. Вместимость бункера 8,6 м³. Установленная мощность 7,5 кВт. Габаритные размеры, м, 6,2 × 2,3 × 2,9. Масса 2585 кг.

Рис. 3.6. Установка электрохимической обработки соломы:

1 - загрузочный бункер; 2 - камера уплотнения; 3 - поршень; 4 - цилиндры гидропривода уплотнителя; 5 - камера обработки; 6 - выгрузное отверстие; 7 - выгрузной бункер; 8 - выгрузной шнек; 9 - электропривод.



Установка электротермохимической обработки (рис.3.6.) предназначена для повышения питательности соломы. Измельченная и увлажненная

раствором химреагентов солома поступает из КТУ-10А по транспортеру ТС-40С в приемный бункер 1 и в камеру уплотнения 2. Поршень 3 с гидроцилиндрами 4 уплотняют солому до 350...400 кг/м³ и перемещают в рабочую камеру, в которой установлены электроды. Напряженность электрического поля между электродами (8...10)10² В/м. Ток протекает между электродами через соломенную массу, вызывая в ней термические и химические процессы обработки, нагревает ее до 90...95 °С в течение 10...12 минут. Подает необработанную солому выталкивают обработанную на выгрузной шнек 8. Производительность установки 1000 кг/ч увлажненной соломы. Мощность электроприемников установки 100 кВт. Мощность гидростанции 9 кВт. Давление в системе гидростанции в рабочем режиме 12 МПа, на холостом ходу 6 МПа. Габаритные размеры, м, 2,84 × 4,25 × 2,7. Масса без гидростанции 1200 кг.

Исследования эффективности электротермохимической обработки соломы, проведенные совместно с БелНИИЖ в ОПХ Будагово Смоленского района, в учхозе им. Фрунзе Минского района и других хозяйствах, показали увеличение кормовой ценности по сравнению с исходной в 1,5...2,0 раза. Прирост массы молодняка КРС на 13,3 % выше по сравнению со скармливанием необработанной соломы. Энергоемкость ниже на 40...80 % по сравнению с различными термическими способами обработки.

3.2. Электрогидротермохимическая обработка зерна

Технология электрогидротермической обработки (ЭГТО) фуражного зерна включает плющение зерна до толщины хлопьев 1,0...1,5 мм, внесение 1 % хлорида натрия и 80...90 % воды к массе зерна, уплотнение, перемещение и обработку увлажненных хлопьев зерна в электрическом поле до 80°С [30].

Основные технологические операции включают (рис. 3.7): загрузку фуражного зерна в приемный бункер; дозированное плющение и подачу хлопьев в смеситель; прием кристаллического или жидкого химреагента; приготовление водного раствора химреагента требуемой концентрации; дозирование раствора в смеситель; смешивание хлопьев зерна с раствором; подачу, уплотнение, перемещение и обработку зерновой массы электрическим током в рабочей камере; выгрузку обработанного корма.

Технологический процесс ЭГТО фуражного зерна осуществляют следующим образом (рис.3.8). Фуражное зерно выгружают из транспортного средства в завальную яму 1 и оттуда шнеком 2 подают в дозатор 3, который питает плющилку 4. После измельчения хлопья требуемых размеров посту-

пают по шнековому транспортеру 5 в смеситель 6. В емкость для приготовления химреагента 7 заливают воду. Хлорид натрия подают шнеком из приемного устройства в емкость с водой и перемешивают мешалкой. Раствор химреагента перекачивают насосом в расходную емкость и оттуда вводят в шнековый смеситель.

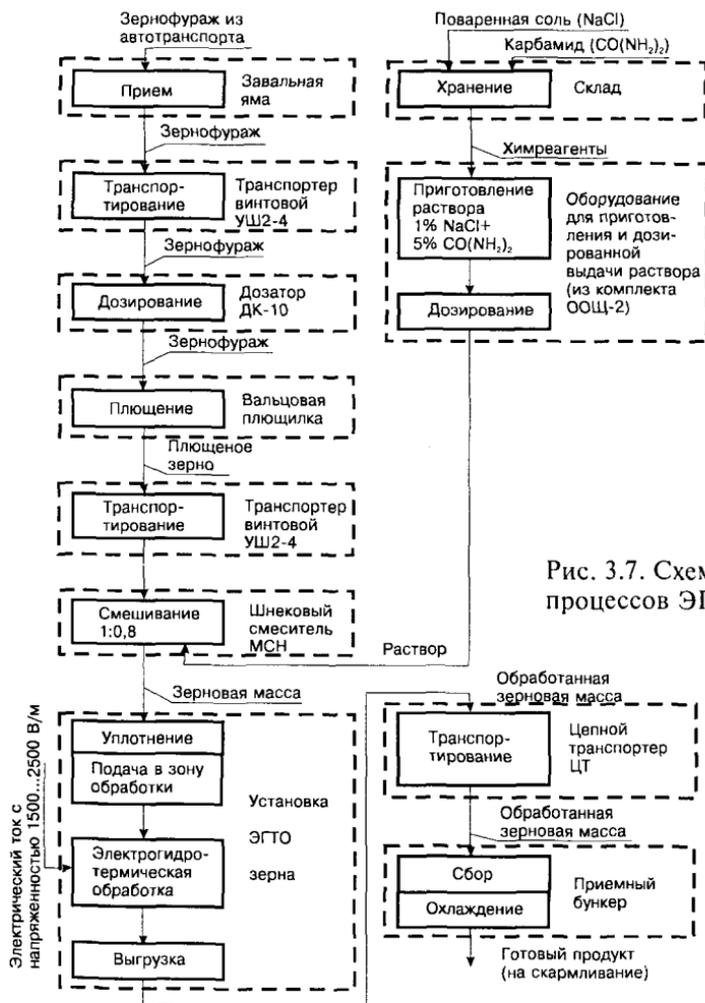
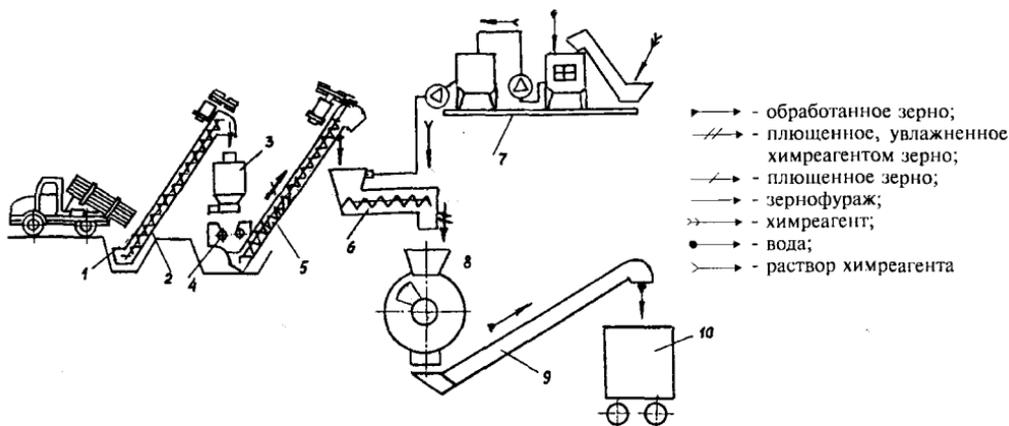


Рис. 3.7. Схема последовательности процессов ЭГТО фуражного зерна.

Приготовленную зерновую массу подают в приемный бункер 8 установки ЭГТО зерна и далее в рабочую камеру, в которой ее уплотняют с давлением 20 кПа, перемещают и обрабатывают в электрическом поле напряженностью $(10...15) \cdot 10^2$ В/м до 80°C в течение 10...15 мин. Обработанное зерно выгружают и транспортером 9 подают в приемный бункер 10 транспортного устройства.



3.8. Технологическая схема линии ЭГТО фуражного зерна:

1 - завальная яма; 2, 5 - шнековый транспортер; 3 - дозатор; 4 - плющилка зерна; 6 - шнековый смеситель; 7 - оборудование приготовления и дозирования химреагента; 8 - установка ЭГТО зерна; 9 - выгрузной транспортер; 10 - транспортное средство.

Комплект оборудования для ЭГТО фуражного зерна включает: вспомогательные транспортеры УШ2-4 и ЦТ; оборудование для приготовления и дозирования химреагента ООЩ-2 (рис.3.4); шнековый смеситель МСН; дозатор концентрированных кормов ДК-10; вальцовую плющилку СП.00.000.СБ; установку ЭГТО зерна.

Стационарный винтовой транспортер УШ2-4 состоит из сплошного шнека, расположенного в желобе. Приводная станция левого или правого расположения смонтирована на транспортере. В зависимости от модификации и плотности перемещаемого материала подача транспортера может быть от 0,8 до 22 т/ч, мощность электропривода от 1,1 до 2,2 кВт, длина от 1 до 40 м.

Цепной транспортер ЦТ представляет собой втулочно-роликовую цепь со скребками, две ветви которой скользят по деревянному настилу. В линии ЭГТО зерна используют транспортер ЦТ-12. Его производительность 12 т/ч, мощность электропривода 3 кВт, максимальная длина 12 м.

Вальцовая плющилка (рис. 3.9.) делает из зерна хлопя толщиной 1,0...1,5 мм. Зерновая масса из бункера 4 проходит между встречно-вращающимися вальцами 1 плющителя и из накопителя 5 по транспортеру поступает в смеситель. Производительность плющилки 0,3...3 т/ч, мощность электропривода 3 кВт, габаритные размеры, м, 0,82 × 0,85 × 1,3, масса 270 кг.

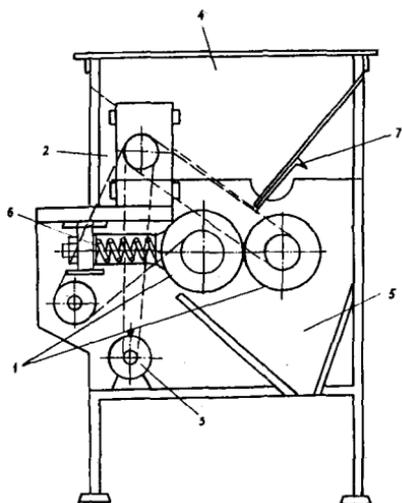


Рис. 3.9. Плющилка вальцовая:
1 - вальцы; 2 - редуктор; 3 - электродвигатель; 4 - загрузочный бункер; 5 - разгрузочный бункер; 6 - прижимное устройство; 7 - заслонка.

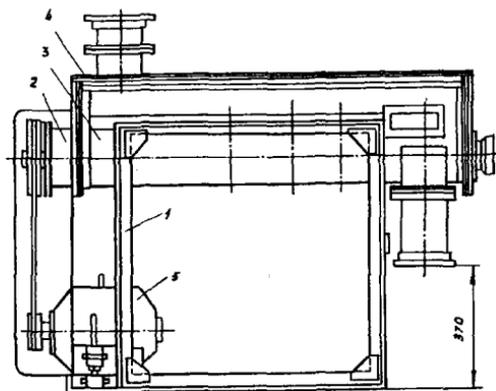


Рис. 3.10. Смеситель МСН:
1 - станина; 2 - редуктор; 3 - шнек; 4 - крышка; 5 - электродвигатель.

Горизонтальный двухвальный шнековый смеситель МСН (рис.3.10) состоит из двух валов с лопастями, установленными под углом к оси вала. Скорость движения и интенсивность перемешивания корма регулируют углом установки лопастей. Производительность смесителя до 5,5 т/ч, мощность электропривода 1,1 кВт, габаритные размеры, м, 1,52 × 0,53 × 1,12. Масса без электродвигателя 240 кг.

Комбинированный дозатор ДК-10 (рис.3.11) принимает зерно из завальнй ямы и дозирует его в плющилку и далее на обработку. Подачу фуражного зерна регулируют дозирующей заслонкой, установленной на выгрузном окне дозатора. Расход материала устанавливают вручную, его подачу включают дистанционно. Производительность дозатора 600 кг/ч, мощность электропривода 1,6 кВт, габаритные размеры, м, 1,45 × 0,65 × 1,11, масса 385 кг.

Установка электрогидротермической обработки зерна (рис.3.12) состоит из приемного бункера 1, в котором установлены крыльчатки 2 с электроприводом, которые распределяют зерновую массу через загрузочные отверстия 4 в камеры уплотнения 5. Поршни 3, движимые кривошипно-шатунным механизмом 6,7 и электроприводом 8, уплотняют зерновую массу в рабочей камере 9, на боковых стенках которой установлены токоподводящие электроды 10. Обработанный корм выгружают через отверстия 11 на шнек 12 с электроприводом 13.

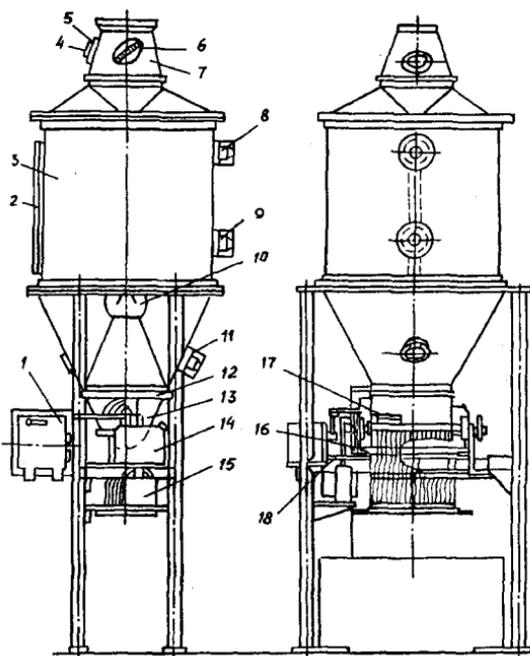


Рис. 3.11. Дозатор концкормов ДК - 10:

1, 14 - исполнительные механизмы; 2, 4 - смотровые окна; 3 - бункер; 5 - люк; 6 - сетка; 7 - приемная горловина; 8,9,11 - датчики уровня; 10 - разгрузитель; 15 - электромагнит; 16 - рабочая заслонка; 17 - ворошилка; 18 - дозирующая заслонка.

Плющенное и увлажненное раствором химреагентов зерно поступает в загрузочный бункер 1. Крыльчатки 2 через окна 4 распределяют зерновую массу по камерам уплотнения 5. Поршни проталкивают и уплотняют корм в результате его трения о стенки камеры. Давление уплотнения 80..100 кПа. В рабочей камере ток протекает между электродами 10 через зерновую массу и обрабатывает ее до 70...80 °С. Обработанное зерно выгружается через отверстие 11 на шнек 12 и далее в линию смешивания кормов.

Мощность установки 45 кВт, производительность 500 кг/ч, масса 450 кг, габаритные размеры, м, 1,68 × 0,88 × 2,3.

Сравнительные исследования эффективности способов обработки зерна, проведенные В.С.Корко и В.А.Пашинским совместно с институтом БелНИИЖ, ЦНИИМЭСХ, БелНИИЭСХ в совхозе "Городейский" Несвижского района, показали следующие результаты (табл.3.1).

Такие же исследования в учхозе им. Фрунзе Минского района подтвердили, что коэффициент перевариваемости органического вещества зерна выше на 15,1 и 4,0 по сравнению соответственно с дроблением на ДКМ-5, запариванием и плющением на ПЗ-3 и экструдированием на КМЗ-2. Увеличение прироста массы бычков по сравнению с дроблением составило соответственно: экструдирование — 8,6; пропаривание и плющение — 6,1; ЭГТО — 22 %.

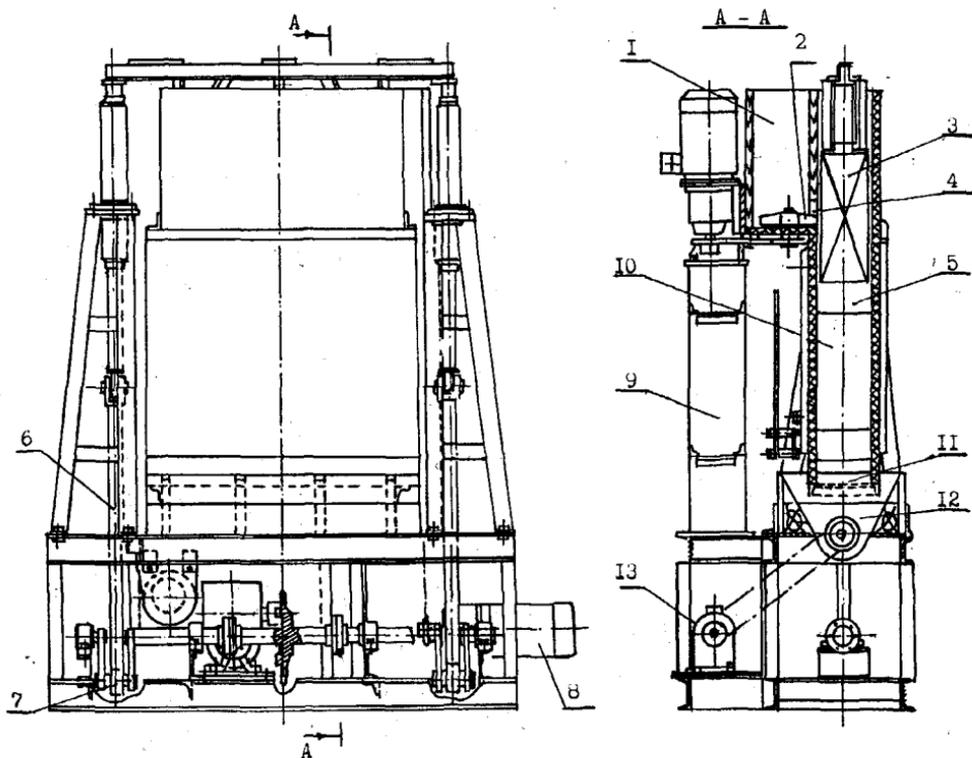


Рис. 3.12. Установка электрогидротермической обработки фуражного зерна.

3.1. Сравнительные показатели способов обработки фуражного зерна

Способ обработки	Прирост массы молодняка КРС		Затрачено на прирост массы		Энерго-емкость обработки кВт·ч/т	Прибыль на 1 гол. животного в % к контролю
	г./сут	%	к. ед/кг	протеина		
Дробление на КДМ-2 (контроль)	800,6	100	9,8	852,0	5,5	100
Экструдирование на КМЗ-2,0	832,7	104	8,75	824,0	142,6	105
Пропаривание и плющение на ПЗ-3	805,0	100,5	9,13	847,9	92,2	99,6
ЭГТО	845,0	105,6	8,66	820,5	62,0	107,5

3.3. Электротепловая обработка мелассы

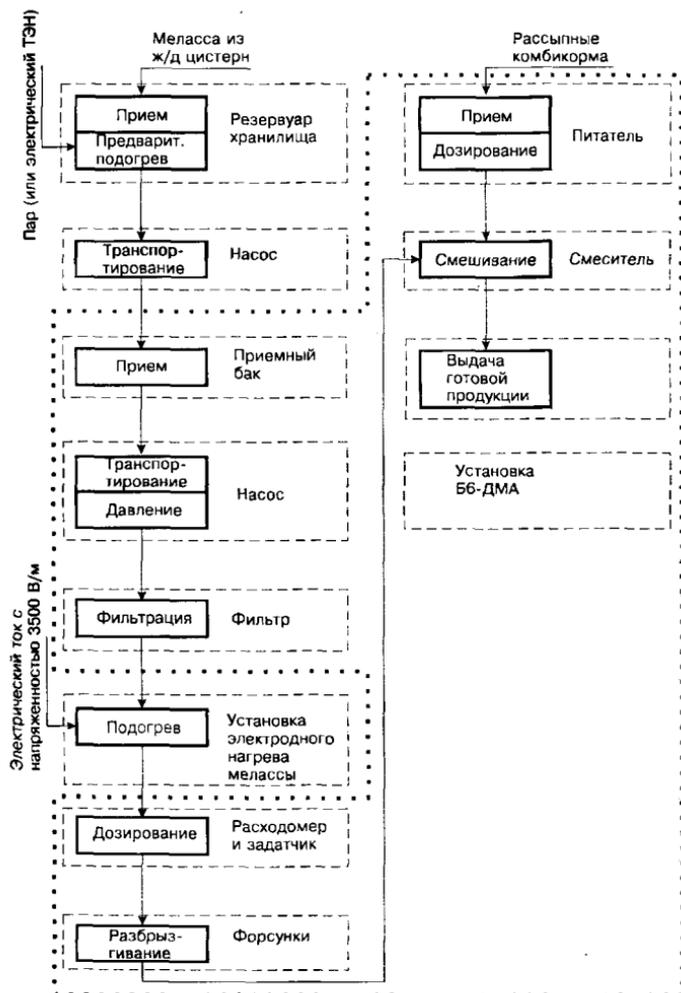
Технология электрического подогрева мелассы разработана применительно к нуждам комбикормового производства и преследует снижение ее вязкости и карамелизации, повышение точности дозирования, улучшение смешиваемости с ингредиентами комбикормов и их качества [31,53...55].

Технология мелассирования комбикормов (рис.3.13) включает выгрузку мелассы из железнодорожных цистерн в приемный резервуар хранилища, предварительный подогрев в хранилище вблизи заборного патрубка, транспортировку мелассы из хранилища в заборный бак и оттуда в установку подогрева до оптимальной температуры, дозированную подачу через форсунки в смеситель, смешивание с ингредиентами и получение готового комбикорма.

Технологическая линия ввода мелассы с электроподогревом на базе установки приготовления комбикормов Б6-ДМА показана на рис.3.14. Установка состоит из расходного бака мелассы 10, насоса-дозатора 6, фильтра 4, электродного подогревателя мелассы 3, расходомера мелассы 18, приемника-питателя ингредиентов комбикорма 23 и смесителя 25. Сухой рассыпной комбикорм подают питателем в смеситель (рис.3.15). Насосом мелассу перекачивают из расходного бака через фильтр, электродный подогреватель, расходомер в коллектор смесителя и разбрызгивают радиально расположенными форсунками. Установленный на вертикальном валу смесителя нож создает вихревое движение и перемешивание комбикорма. При изменении количества поступающего комбикорма изменяют количество пропускаемой через расходомер мелассы путем ее возврата в расходный бак. Для откачки мелассы из форсунки смесителя и участка коммуникаций от трехходового

клапана до смесителя при переключении потока мелассы на возвратную линию установлен насос. Он включается автоматически при срабатывании трехходового крана. Расходный бак сварной, закрыт крышкой; в нем установлены датчики верхнего и нижнего уровня мелассы. Датчики включают автоматически насос подачи мелассы из хранилища. Индукционный расходомер с дистанционным показанием мгновенного и суммарного расхода автоматически определяет количество введенной мелассы.

Рис. 3.13. Схема последовательности ввода мелассы в комбикорма.



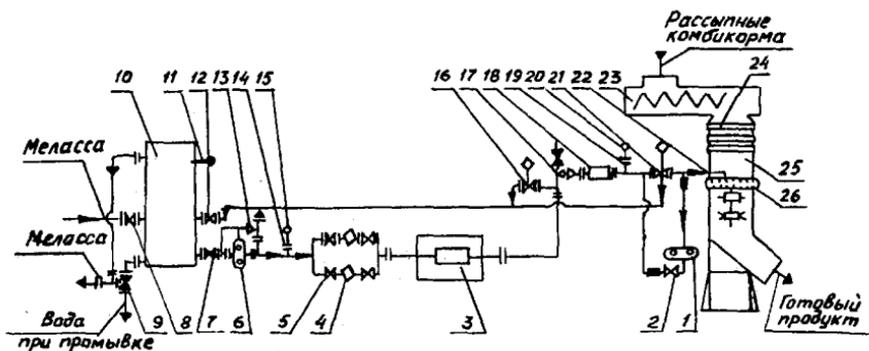


Рис. 3.14. Технологическая схема линии ввода мелассы в комбикорма:
 1, 6 - насосы; 2, 13, 16, 17, 21 - клапаны; 3 - электроподогреватель мелассы; 4 - фильтры; 5 - вентили; 7, 8, 9, 12 - краны; 10 - бак; 11 - термометр; 14, 19 - мембранные разделители; 15, 20 - манометры; 18 - расходомеры; 22 - линия подачи мелассы; 23 - питатель; 24 - заслонка; 25 - смеситель; 26 - форсунки.

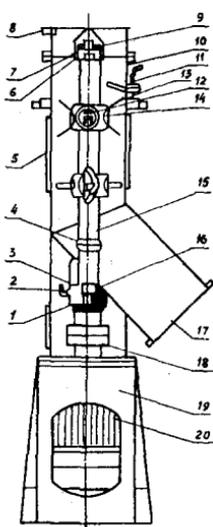


Рис. 3.15. Смеситель установки Б6-ДМА:
 1, 3, 16 - манжеты; 2 - масленка; 4, 9 - подшипники; 5 - люк; 6 - уплотнение; 7 - крышка; 8 - конечный выключатель; 10 - корпус; 11 - пружина; 12 - форсунка; 13 - нож; 14 - держатель ножей; 15 - вал; 17 - патрубков; 18 - муфта; 19 - рама; 20 - электродвигатель.

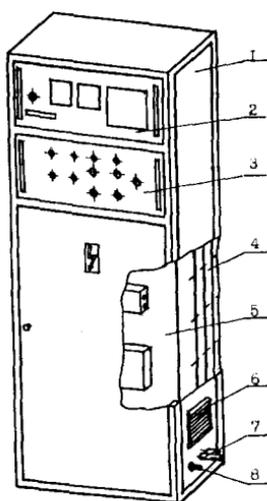


Рис. 3.16. Электродный подогреватель мелассы: 1 - корпус; 2 - панель приборов; 3 - панель управления; 4 - электродная камера; 5 - панель с электроаппаратами; 6 - отверстия вентиляционные; 7, 8 - патрубки слива, ввода и вывода мелассы.

Электродный подогреватель мелассы (рис.3.16) состоит из электродной камеры подогрева, трубопроводов, обратного и защитного клапанов, аппаратуры автоматического управления и защиты, смонтированных в общем шкафу [55]. Тиристорная схема регулирования напряжения поддерживает температуру в требуемом диапазоне вне зависимости от подачи мелассы, ее температуры и проводимости.

Производительность установки 250 кг/ч при подогреве мелассы на 50 °С. Номинальная мощность 10 кВт. Габаритные размеры, м, 1,8 × 0,8 × 0,5. Масса 78 кг.

Исследования, проведенные на Краснознаменском комбикормовом заводе Смоленского района, показали снижение потерь мелассы на 5...7 %, энергоемкости процесса на 12 %, содержания микробов в 1,8...2 раза, увеличение содержания усвояемых сахаров [56].

3.4. Электрокоагуляция белков картофельного сока

Электрокоагуляция белков входит составляющей в технологию переработки картофеля на крахмал [32]. Технологические операции включают очистку от примеси, мойку, взвешивание и измельчение картофеля, разделение сока и каши для дальнейшей переработки на белок, жидкий срод и крахмал. Участок электрокоагуляции линии переработки картофеля на крахмал показан на рис. 3.17.

Комплект оборудования технологической линии содержит: соломоловушку СБГМ, камнеловушку РЗ-ПЛП-200, картофелемойку КМЗ-57, автоматические весы ДКФ, картофелетерку ЗТ-340, две центрифуги ОГШ 802К-4, электрокоагулятор, насосы 2К-6 и 1В615, вальцовую сушилку, молотковую дробилку.

На участке электрокоагуляции картофельный сок поступает в сборник 1, оттуда насосом 2 его перекачивают в электрокоагулятор 3. Обработанный сок из анодных камер подают в центрифугу 5 для выделения коагулята. Сок из катодных камер собирают в емкость 4 и возвращают в емкость 1 на повторное использование. Остаток белка из центрифуги перекачивают винтовым насосом 6 в вальцовую сушилку 7. После сушки белок измельчают в дробилке 8, взвешивают и упаковывают.

Электрокоагулятор выполнен в виде прямоугольной стальной емкости, внутренние стенки которой изолированы винипластом (рис. 3.18). В емкости установлены анодные 1 и катодные 3 камеры, разделенные мембранными перегородками 2. На наружных стенках расположены подводящий патрубок 7, сборные карманы для отвода католита 5 и анолита 8. Аноды

выполнены из графита, катоды — из нержавеющей стали. Перфорированный катод покрыт бельтинговой мембраной. Напряжение к электродам подводят по перемычкам 4 от источника постоянного тока.

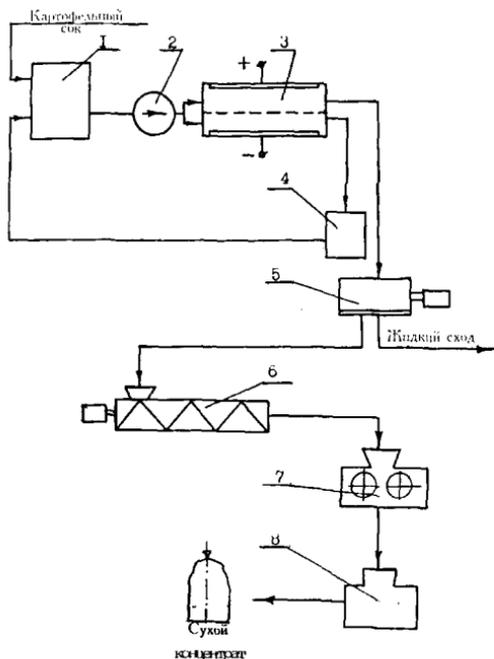
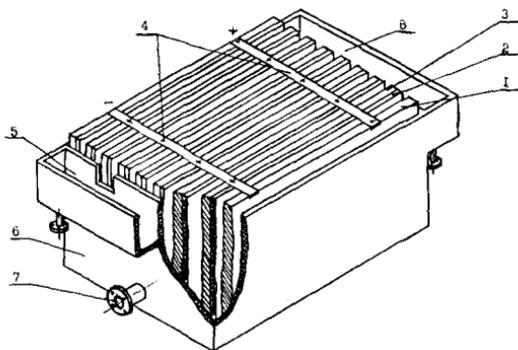


Рис. 3.17. Принципиальная схема линии электрокоагуляции белка картофельного сока:

1 - приемный сборник; 2 - насос; 3 - электрокоагулятор; 4 - сборник католита; 5 - центрифуга; 6 - винтовой насос; 7 - вальцовая сушилка; 8 - молотковая дробилка.

Рис. 3.18. Электрокоагулятор белка картофельного сока:

1 - анод; 2 - мембрана; 3 - катод; 4 - токоподводящий стержень; 5 - сборный карман для отвода католита; 6 - корпус; 7 - подводящий коллектор; 8 - сборный карман для отвода анолита.



Испытания опытного электрокоагулятора в НПО "Потенциал-ЭКО", г. Ровно, показали следующие результаты: выход белка 93...95%, степень осветления сока 0,5...0,7, номинальная температура 35...40 °С, энергоемкость 14...15 кВт·ч/т сока.

3.5. Размещение оборудования

Электротехнологические установки для обработки кормов могут работать в отдельных технологических линиях или в составе оборудования кормоцехов или других перерабатывающих предприятий. На рис.3.19 и 3.20 показаны варианты размещения оборудования отдельных и в составе кормоцеха КОРК-15 линий электротермохимической обработки соломы.

Технологическое оборудование установлено в здании размером 12х9 м² (рис.3.19). К зданию примыкают два навеса — для приема соломы и для выгрузки готовой продукции. Состав оборудования дан в подрисуночной надписи. Солому в рулонах, тюках или в рассыпном виде выгружают из транспортного средства в питатель-загрузчик ПЗМ-1,5, в котором ее предварительно измельчают и дозированно подают на транспортер-камнеуловитель ЛИС-3.02.00.000. Здесь поток соломы выравнивают по объему, удаляют тяжелые примеси и подают в измельчитель-смеситель ИСК-3,0. Туда же подают раствор химреагента из смесителя СМ-1,7. Транспортер ИСК-3-02 подает измельченную и увлажненную солому в установку электрохимической обработки ЭХОС-01.00.000. Обработанную соломенную массу выгружают транспортером ТС-40М в транспортное средство.

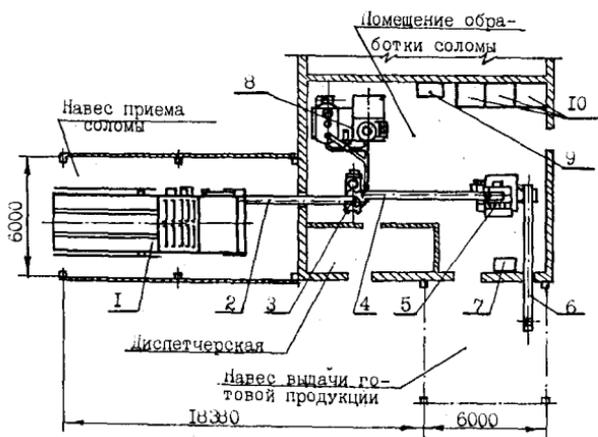


Рис. 3.19. План расположения технологического оборудования линии электротермохимической обработки соломы:

1 - питатель-загрузчик кормов ПЗМ - 1,5 (ЛИС.3.01); 2 - транспортер ЛИС-3.02; 3 - измельчитель-смеситель кормов ИСК-3.01; 4 - транспортер ИСК-3.02; 5 - блок электрообработки соломы ЭХОС01; 6 - транспортер скребковый ТС-40М; 7 - гидравлическая станция; 8 - смеситель мелассы СМ-1,7; 9 - весы; 10 - емкость для хранения химреагентов.

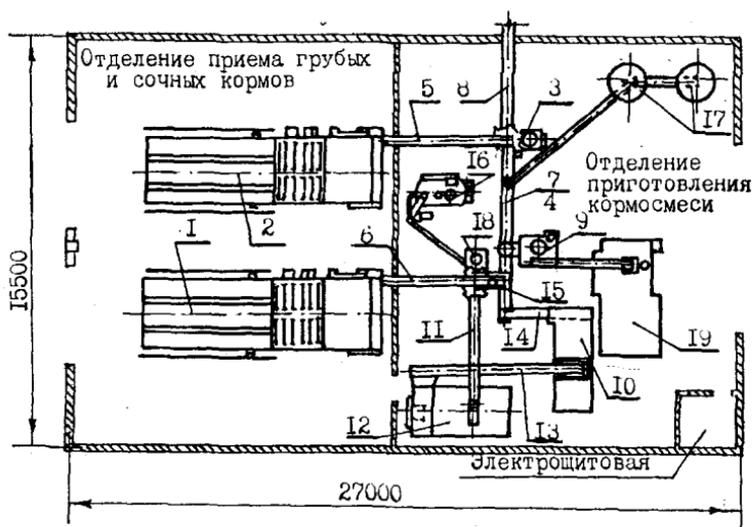


Рис. 3.20. План расположения технологического оборудования в кормоцехе КОРК-15:

1,2 - питатели-загрузчики соломы и силоса ПЗМ-1,5; 3 - измельчитель-смеситель ИСК-3.01; 4 - дозатор корнеклубнеплодов КОРК-15.03.01; 5,6,7,8, - транспортеры ЛИС-3.02, АВВ -0,4, КОРК-15.05.000, выгрузной; 9 - измельчитель-камнеуловитель ИКМ-5; 10 - блок электрообработки соломы С.00; 11 - транспортер выгрузной ИСК-3.02; 12 - кормораздатчик с электроприводом РММ-5; 13, 14 - транспортеры ТС-40; 15 - разделитель потока; 16 - оборудование приготовления и дозирования химвагентов ООЩ-2; 17 - дозаторы концентратов; 18 - измельчитель-смеситель ИСК-3.01.

Размещение линии электротермохимической обработки соломы в составе оборудования кормоцеха КОРК-15 в учхозе им. М.Фрунзе Минского района показано на рис. 3.20. Кормоцех расположен в помещении размером $27 \times 15,5 \text{ м}^2$. Предусмотрены линии грубых кормов и силоса, корнеклубнеплодов, концентратов, приготовления растворов, электрообработки соломы, смешивания и выдачи готовой кормосмеси.

Солому из транспортного средства выгружают в питатель-загрузчик кормов ЛИС-3.01., там предварительно измельчают битерами и транспортерами ЛИС-3.02. и КОРК-15.06.01 подают либо на линию смешивания, либо на линию электрохимической обработки соломы в зависимости от положения рукоятки делителя потока. Подачу дозируют скоростью движения конвейера питателя-загрузчика. В случае электрообработки делитель потока направляет солому в измельчитель-смеситель ИСК-3.01. Туда же насосом-дозатором подают раствор химвагента из емкости для его приготовления и

хранения. После измельчителя транспортер ИСК-3.02 подает соломенную массу в бункер-накопитель кормораздатчика РММ-5, установленного стационарно и оборудованного электроприводом. Подачу соломенной массы регулируют скоростью движения конвейера-кормораздатчика. Транспортер ТС-40С загружает солому в приемный бункер электротехнологической установки. Обработанная масса выгружается из установки на транспортер ТС-40С и далее поступает на сборный транспортер КОРК-15.05.00.

Силос, сенаж, зеленые корма разгружают в питатель-загрузчик кормов ПЗМ-1.5, дозируют и транспортером АВВ-0.4 подают в измельчитель-смеситель ИСК-3.

Корнеклубнеплоды из хранилища или из буртов загружают в бункер и транспортером ТК-5Б подают на мойку и измельчение в измельчитель-камнеуловитель ИКМ-5. Измельченная масса поступает в бункер-дозатор корнеклубнеплодов КОРК-15.05.01 и далее сборным транспортером КОРК-15.05.00 загружается в измельчитель-смеситель ИСК-3.

Концентрированные корма доставляют загрузчиком кормов ЗСК-10 в бункеры-дозаторы КОРК-15.04.15 и оттуда винтовым конвейером КОРК-15.04.07 и КОРК-15.04.08 подают на сборный транспортер КОРК-15.05.00.

Раствор химического реагента готовят в комплексе ООЩ-2. Кальцинированную соду 5% и поваренную соль 1,5% по отношению к массе соломы загружают шнеком в емкость смешивания и оттуда насосом перекачивают в расходный бак. Температуру раствора поддерживают электронагревателями на уровне 15-20 °С. Из расходного бака насос-дозатор подает раствор химреагента в распылитель, установленный в зоне измельчения ИСК-3.

Все компоненты корма поступают по сборному транспортеру КОРК-15.05.00 на окончательное смешивание в ИСК-3 и оттуда по транспортеру ИСК-3.02 выгружаются в транспортное средство.

4. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОРМОВ

4.1 Классификация электротехнологических установок

Установки для обработки кормов электрическим током классифицируют по следующим признакам: по назначению — установки для электрохимической обработки (фуражного зерна, соломы и т.п.), установки для электротепловой обработки (картофеля, мелассы, отходов перерабатывающей промышленности), электрические коагуляторы (картофельный и другие соки, продукты переработки мясной промышленности); по принципу действия — установки периодического действия и установки непрерывного действия; по виду тока — установки переменного тока промышленной частоты и установки постоянного тока; по числу фаз и рабочих камер — однофазные ($n=1,2,3...$) и трехфазные ($3n$ -камерные), различающиеся схемой соединения (звезда, треугольник). Установки различаются технологическими режимами, способами предварительной обработки сырья, конструктивным оформлением. Они могут быть специализированными — для обработки одного вида материалов, универсальными — для обработки разных, но схожих по физико-механическим и электрическим свойствам материалов. Установки различаются также уровнями мощности, напряжения, силы тока, которые находятся в пределах: единичная мощность — 1,0...160 кВА, фазное напряжение рабочих камер — 12...220 В, сила тока фазы — 5...500 А.

Независимо от классификационного признака электротехнологическая установка состоит из приемного устройства 1, механизма распределения корма по рабочим камерам 2, механизма уплотнения (подачи и уплотнения) корма 3, рабочей камеры 4, механизма выгрузки 5, источника питания 6, станции управления 7 (рис. 4.1). Состав и конструктивное исполнение этих механизмов изменяют в зависимости от назначения установки.

4.2 Приемное устройство

Приемное устройство электротехнологической установки представляет собой закрытую или открытую емкость прямоугольной формы. Служит для согласования поступления и расхода корма перед обработкой в случаях

непрерывной подачи и пропорционального расхода, а также сглаживания различий в производительности предшествующей машины и установки (рис.4.2).

Минимальный объем бункера приемного устройства, m^3 :

$$V_{\min} = \frac{m_{i1}\tau_1}{\rho_0 k_2}, \quad (4.1)$$

где m_{i1} — производительность предшествующей машины, кг/с; τ_1 — время на транспортировку единичной порции обрабатываемого корма, с; ρ_0 — плотность корма, поступающего в бункер, $кг/м^3$; $k_2 = 0,7...0,8$ — коэффициент заполнения бункера.

Максимальный объем бункера:

$$V_{\max} = \frac{(m_{i1} - m_i)\tau_1}{\rho_0 k_2}, \quad (4.2)$$

где m_i — производительность электротехнологической установки, кг/с.

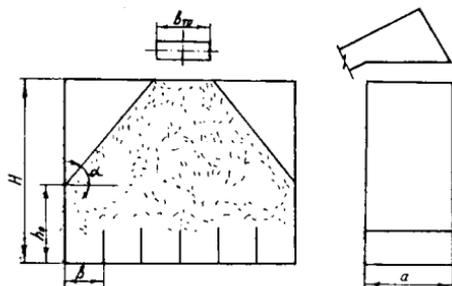
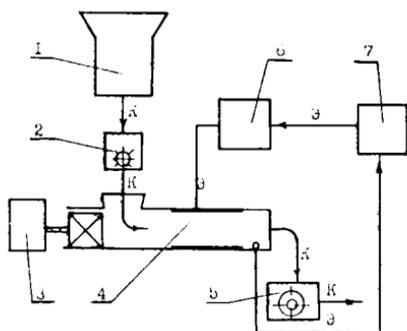


Рис. 4.1. Структурно-технологическая схема электротехнологической установки: 1 - приемное устройство; 2, 3 - механизмы распределения, подачи и уплотнения корма; 4 - рабочая камера; 5 - механизм выгрузки; 6 - источник питания; 7 - станция управления; к - корм; э - электроэнергия.

Рис. 4.2. К определению высоты приемного бункера.

Если реальный объем приемного бункера V находится в диапазоне $V_{\min} \leq V \leq V_{\max}$, то необходим регулятор уровня корма, отключающий и включающий подающую машину при соответствующем заполнении бункера.

Приемное устройство грубо-дисперсных кормов размещают над рабочими камерами. При отсутствии механизма распределения корма по камерам высоту бункера H определяют с учетом числа n_k и ширины b рабочей камеры, а также угла естественного откоса корма α (рис. 4.2):

$$H = h_0 + \frac{(n_k b - b_{\text{тр}}) \operatorname{tg} \alpha}{2}, \quad (4.3)$$

где $h_0 = V_{\text{мин}} / (a n_k b)$ — минимальная высота бункера, м; $b_{\text{тр}}$ — ширина загрузочного транспортера, м; a — длина приемного бункера, м; α — угол естественного откоса, град.

С целью исключения зависания корма приемный бункер выполняют с одинаковым поперечным сечением по высоте, а в установках без механизма распределения корма по камерам — расширяющимся к низу.

4.3 Механизмы распределения

Механизм распределения служит для подачи корма в рабочие камеры. В процессе исследования испытаны виброрешетчатый, транспортерный, шнековый и крыльчатый типы распределителей (рис. 4.3...4.5).

Механизм распределения в виде бесконечного транспортера (рис. 4.3,а) не обеспечивает равномерную загрузку камер обработки, заклинивает на участках закругления, особенно при работе с соломой.

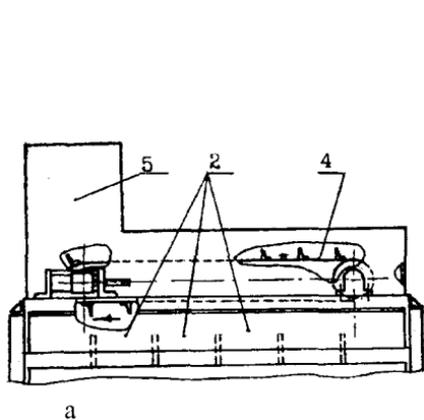
Виброрешетчатый распределитель с качающимися боковыми стенками удовлетворительно подает корм в рабочие камеры (рис. 4.3,б). Неравномерность загрузки камер не превышает 8% при частоте колебаний решетки 2 с^{-1} и амплитуде, равной половине ширины камеры обработки. Ширина фронта рабочих камер не должна превышать 1 м. При большей ширине равномерность загрузки ухудшается, вибрационная нагрузка растет.

Шнековый распределитель представляет собой два встречно-вращающихся шнека с одинаковой навивкой спиралей (рис. 4.4). На концах шнеков установлены половины витков спиралей противоположной навивки. Это снижает заклинивание и обеспечивает перебрасывание корма с одного на другой шнек и его вращение в горизонтальной плоскости бункера.

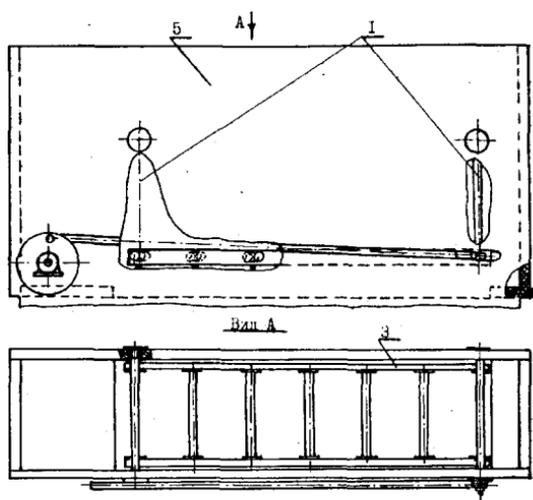
Необходимая частота вращения шнека, с^{-1} , [57]:

$$\omega = 4 m_t [\pi (D^2 - d^2) D \operatorname{tg}(45^\circ - 0,5 \arctg f_{\text{тр}}) r_0 k_t]^{-1}, \quad (4.4)$$

где m_t — производительность электротехнологической установки, кг/с; D , d — наружный и внутренний диаметры шнека, м; $f_{\text{тр}}$ — коэффициент трения кормовой массы по корпусу приемного бункера.



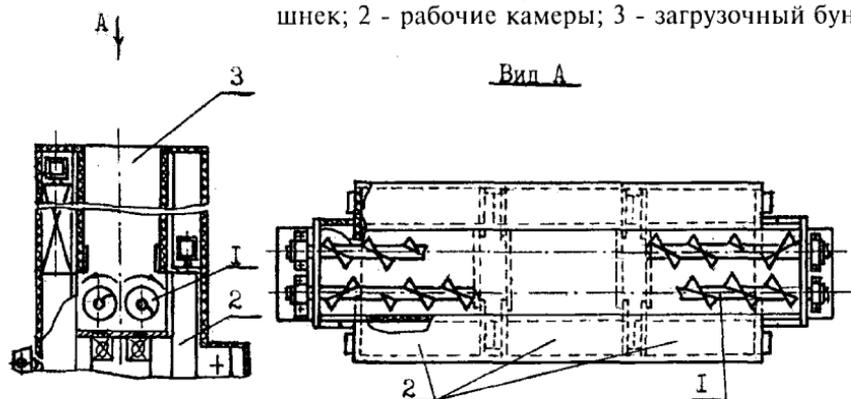
а



б

Рис. 4.3. Механизмы распределения корма транспортерного (а) и решетчатого (б) типов: 1 - качающиеся боковые стенки; 2 - рабочие камеры; 3 - решетка; 4 - транспортер; 5 - загрузочный бункер.

Рис. 4.4. Механизм распределения шнекового типа: 1 - шнек; 2 - рабочие камеры; 3 - загрузочный бункер.



Крыльчатый распределитель представляет собой вращающиеся навстречу друг другу четырехлопастные крыльчатки (рис. 4.5). Этот механизм применим к сыпучим материалам, таким как зерно. Корм распределяется равномерно как по фронту, так и при боковой подаче в зону обработки. Частота вращения крыльчаток 80...120 об/мин.

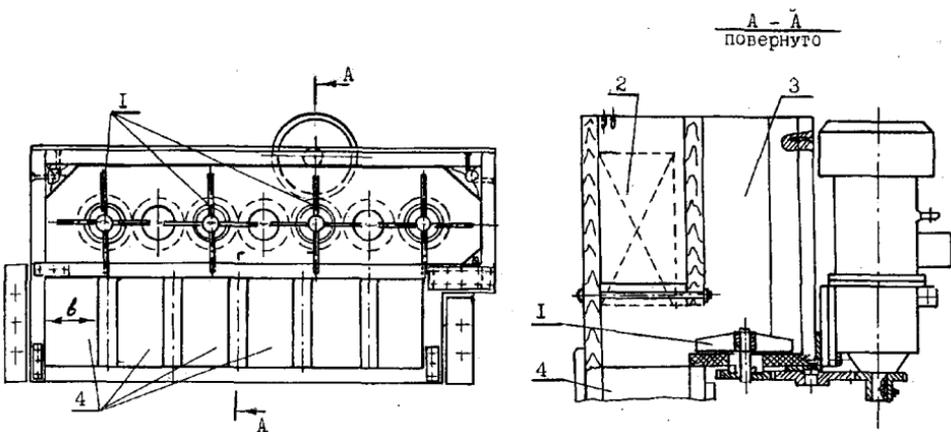


Рис. 4.5. Механизм распределения крыльчатый: 1 - крыльчатка; 2 - уплотнитель; 3 - загрузочный бункер; 4 - рабочие камеры.

Сопоставление рассмотренных механизмов распределения кормовых материалов по рабочим камерам показывает, что все они обладают теми или иными недостатками и низкой надежностью в работе. Наиболее эффективен и надежен шнековый распределитель, особенно для соломенной массы. Для фуражного зерна можно использовать крыльчатый механизм распределения.

Механизмы распределения и выгрузки корма, как правило, совершают вращательное (шнеки, транспортеры), реже качающиеся движения при сравнительно небольших моментах и частоте менее 20 с^{-1} . Для привода этих органов можно использовать червячные цилиндрические редукторы общего назначения РЧУ (табл. П.1), мотор-редукторы цилиндрические одноступенчатые типа МЦ (табл. П.2) и двухступенчатые соосные типа МЦ2С (табл. П.3) с межосевым расстоянием 63 и 80 мм.

4.4 Механизмы уплотнения

Механизм уплотнения создает требуемую технологией плотность и скорость перемещения кормовой массы в рабочей камере. Применительно к обработке соломы и зерна исследованы типовые конструкции механизмов уплотнения (рис. 4.6): вальцовые с цилиндрическими и коническими вальцами, шнековые, транспортерные, поршневые с прямоходовым и поворотным поршнем [44, 57].

Вальцовый цилиндрический механизм уплотнения представляет собой пару встречновращающихся цилиндров, выполненных рифлеными для лучшего сцепления с кормовым материалом (рис. 4.6, а). Этот механизм создает сравнительно небольшую степень сжатия или уплотнения материала и усилие проталкивания корма через рабочую камеру. Повышение степени сжатия увеличением диаметра вальцов малоэффективно из-за низкого коэффициента трения увлажненной соломы о поверхность цилиндров и их проскальзывания.

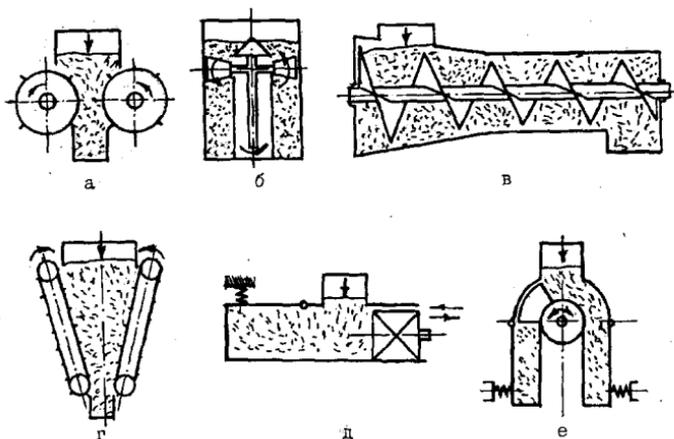


Рис. 4.6. Технологические схемы механизмов уплотнения: а - вальцовые цилиндрические, б - вальцовые конические, в - шнековые, г - транспортные, д - поршневые прямоходовые, е - поршневые поворотные.

Большие усилия уплотнения и проталкивания материала через рабочую камеру создают вальцовые конические уплотнители, принудительно вращаемые на собственных осях и на вертикальном валу (рис. 4.6,б). Основные параметры конического вальцового уплотнителя (рис. 4.7) можно рассчитать по следующим соотношениям [57]:

Длина открытой рабочей камеры, м:

$$L = \frac{S}{\pi \mu f} \ln \left(\frac{P + q_0 / \mu}{q_0 / \mu} \right), \quad (4.5)$$

где $S=0,5(D+d)l$ — площадь поперечного сечения рабочей камеры, m^2 ; $l=0,5(D+d)$ — расстояние между стенками камеры, м; P — давление уплотнения материала, Па; μ — коэффициент бокового давления; q_0 — остаточное боковое давление материала, Па; f — коэффициент трения материала о стенку.

Численные значения величин, входящих в (4.5) и их расчет даны в разделе 2.3.

Частота вращения вальцов (рис. 4.7):

$$\omega = \sqrt[3]{4Qg / 1,8n(D - l_B)l_B\rho_o [2D(0,5Q - l_B) + l_B^2]}, \quad (4.6)$$

где g — ускорение свободного падения, м/с²; n — количество вальцов, шт; l_B — длина вальца, м; Q — производительность, кг/с.

Толщина единичного уплотняемого слоя, м:

$$h = Q/1,8nl_B\rho_o\omega(D-l_B). \quad (4.7)$$

Длина вальца, м:

$$l_B = l - 0,01. \quad (4.8)$$

Меньший диаметр конусного вальца:

$$d_B = 2h/(1 - \cos\varphi), \quad (4.9)$$

где $\varphi \approx 60^\circ$ — угол трения о поверхность вальца.

Угол конусности вальца:

$$\alpha = \frac{\arctg(2h / d_B)}{1 - \cos\varphi}. \quad (4.10)$$

Вальцовые уплотнители могут быть использованы в коаксиальных рабочих камерах. Их недостаток — неполная выгрузка корма из зоны обработки.

Транспортерный уплотнитель (рис. 4.6, г) перемещает материал через рабочую камеру. Однако наличие подвижных частей в зоне обработки и необходимость надежной электрической изоляции создают серьезные трудности при использовании этого типа уплотнителей.

Шнековый пресс обеспечивает уплотнение и транспортировку материала и превосходит по усилиям и надежности рассмотренные уплотнители (рис. 4.6, в). Его недостаток — невысокий КПД, не превышающий 45%, необходимость размещения в рабочей зоне или, в противном случае, неполная выгрузка корма.

Шаг t и наружный диаметр шнека D (рис. 4.8) определяют из системы уравнений [44]:

$$t = (\pi/2)(D+d)\operatorname{tg}(45 - \varphi/2), \quad (4.11)$$

$$(D^2 - d^2)t = 4Q/(\omega\rho_o k_3),$$

где d — диаметр вала, м; $\varphi = \arctg f$ — угол трения; f — коэффициент трения корма по спирали шнека.

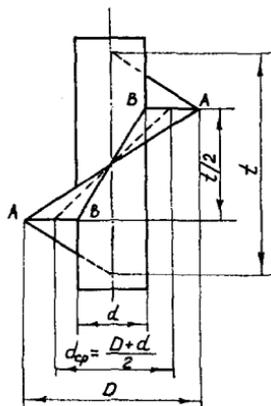
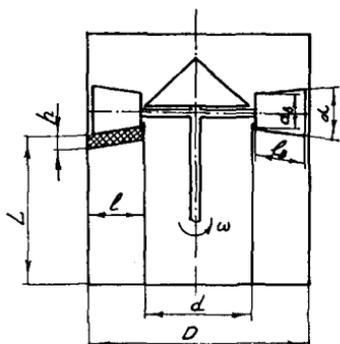


Рис. 4.7. Расчетно-технологическая схема конического вальцового уплотнительного механизма.

Рис. 4.8. К расчету параметров шнекового уплотнителя.

Для увеличения уплотнения шнеки выполняют коническим с углом наклона стенок $\beta \leq 10^\circ$. Степень сжатия материала:

$$\varepsilon = \frac{(D - \operatorname{tg} \beta)^2 - d^2}{[D - \operatorname{tg} \beta(2L_2 - t)]^2 - d^2}, \quad (4.12)$$

где L_2 — длина конической части шнека, м.

$$L_2 = \frac{D - D_{\min}}{2 \operatorname{tg} \beta}, \quad (4.13)$$

где D_{\min} — диаметр шнека на выходе.

Осевое усилие шнека, необходимое для получения требуемой плотности материала P , рассчитывают по формуле раздела 2.3.

Мощность привода шнека, Вт:

$$P_{\text{пр}} = \frac{nt P \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}{1432,4\pi \operatorname{tg} \alpha}, \quad (4.14)$$

где $\alpha = 45^\circ - \varphi/2$.

Поршневые уплотнители с прямоходовым и поворотным поршнями (рис. 4.6, д, е) в наибольшей мере отвечают условиям уплотнения

материалов в электрическом поле. Эти механизмы создают любое необходимое усилие уплотнения и перемещения при равномерной плотности материала по объему камеры. Уплотнение может быть в открытой и закрытой камерах. В открытой камере противодействие возникает в результате трения материала о стенки камеры и бокового давления. Плотность материала при постоянном давлении уплотнения можно регулировать величиной поперечного сечения камеры, изменяя угол наклона одной из ее стенок α к продольной оси. В закрытой камере противодействие создают соответствующим упором.

Уплотнители с поворотным поршнем исключают холостой ход и повышают КПД механизма. Однако их конструктивное исполнение сложнее прямоходовых.

Параметры механизма уплотнения тесно связаны с параметрами рабочей камеры. Поэтому расчет уплотнителей рассмотрен совместно с механическим расчетом рабочих камер.

Привод механизмов уплотнения вальцового и шнекового типа, имеющих малую частоту вращения и большой момент на валу, осуществляют от мотор-редукторов двухступенчатых цилиндрических соосных с межосевым расстоянием 125 мм (табл. П.1).

Механизмы уплотнения поршневого типа приводят в движение при небольших усилиях от мотор-редуктора типа РЦУ (табл. П.2) через кривошипношатунный механизм и при больших усилиях — от гидропривода. Перечень некоторых гидростанций дан в табл. П.4...П.6.

4.5 Рабочие камеры

Рабочая камера электротехнологической установки является устройством, в котором корм обрабатывают электрическим током. Конструктивное исполнение этих камер, как и большинства рабочих органов электротехнологических установок (индукторы, конденсаторы, магнитостриктеры и т.п.), простое. Эта система токоподводящих плоских, чаще всего, или коаксиальных электродов, расположенных соответствующим образом в диалектическом корпусе. Конструктивно рабочие камеры различают по: геометрической форме — прямые и криволинейные, плоские и цилиндрические, с постоянным и с переменным сечением; расположению в пространстве — вертикальные, горизонтальные; расположению электродов в камере — однозонные и многозонные, вертикального и горизонтального расположения; относительному перемещению — материал подвижен или не подвижен относительно токоподводящих электродов.

Рассмотрим некоторые опробированные конструктивные схемы рабочих камер. Для лучшего понимания устройства рабочие камеры показаны совместно с другими узлами электротехнологической установки.

Рабочая камера вертикального, прямого исполнения с прямым ходом уплотняющего поршня показана на рис. 4.9. Общий вид установки, выполненной по этому принципу, дан в приложении на рис. П.1.

Рабочие камеры 4 расположены в два ряда, над ними установлен приемный бункер 1. Внутри бункера размещены два встречновращающиеся шнека, распределяющие корм в зоны уплотнения. Внешние стенки 5 рабочих камер в верхней части закреплены на шарнире, что позволяет регулировать площадь поперечного сечения камер. Поршни 2 с гидроприводом уплотняют, подают и перемещают корм в зоне обработки. Плотность корма и степень уплотнения регулируют углом поворота подвижных стенок. Обработанный корм поступает на выгрузные шнеки 6.

Разновидностью установок с вертикальными прямыми рабочими камерами и прямым ходом поршня уплотнения являются установки с электрическим приводом механизма уплотнения (рис.3.12).

Вертикальная камера с криволинейным ходом уплотняющего поршня показана на рис. 4.10, а установка на рис. П.2. В этой схеме исключен холостой ход уплотнителя [58]. Загрузочный бункер 1 установлен над двумя рядами камер 2. Подвижные стенки 3 закреплены на шарнирах 4. Качающаяся решетка 5 распределяет корм по камерам. Барабан 6 уплотняет и перемещает материал сегментным поршнем 7. На боковых стенках камер расположены электроды 8. Степень уплотнения корма регулируют углом наклона стенок 3 и усилием подуплотнения, заданным на регуляторе 9. После обработки корм поступает на транспортер 10 [59].

Камеры с горизонтальным расположением уменьшают высоту установки. Конструктивно-технологические схемы некоторых таких установок, опробованных в хозяйственных условиях, показаны на рис. 4.11 и 4.12 [60]. Установка с винтовым электроприводом уплотняющего поршня рассчитана на небольшую производительность и может применяться для обработки соломой или зерна.

Установка с кривошипно-шатунным приводом поршней и горизонтальными камерами 2 содержит те же основные механизмы и узлы, что и другие установки. На боковых стенках камер обработки установлены электроды 3. Верхние стенки 4 шарнирно-подвешены. Усилие на поршни 5 передают кривошипно-шатунным механизмом 6 от электропривода 7. Качающаяся решетка 8 распределяет корм по камерам. Шнек 9 удаляет обработанный корм, вентилятор 10 отсасывает пар. Плотность корма регулируют винтом 11. На входе и выходе рабочей камеры установлены защитные электроды 12, подключенные к нулевой точке источника питания (рис. 4.12).

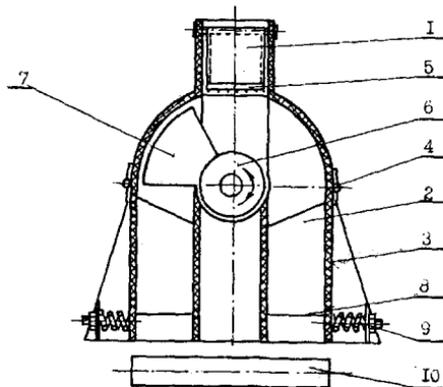
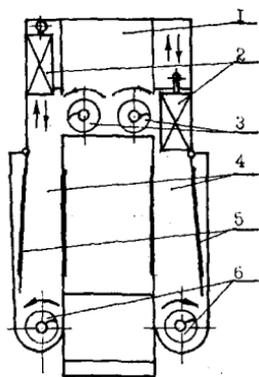


Рис. 4.9. Технологическая схема поршневой установки с вертикальными рабочими камерами: 1 - загрузочный бункер; 2 - поршни уплотнения; 3 - загрузочные шнеки; 4 - рабочие камеры; 5 - подвижные стенки; 6 - выгрузные шнеки.

Рис. 4.10. Технологическая схема установки с вертикальными камерами и поворотным поршнем: 1 - бункер; 2 - камера; 3 - стенка подвижная; 4 - шарнир; 5 - распределитель корма; 6, 7 - уплотнитель; 8 - электроды; 9 - регулятор плотности; 10 - транспортер.

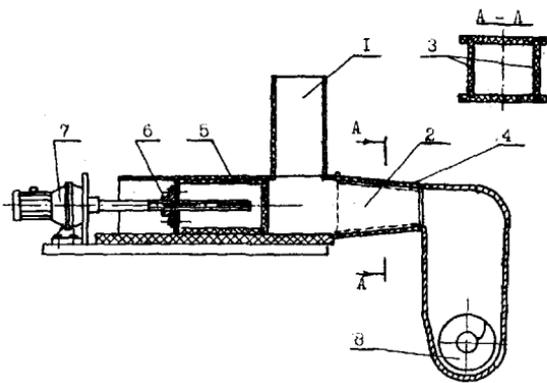


Рис. 4.11. Конструктивно-технологическая схема установки с горизонтальными рабочими камерами и винтовым приводом поршней уплотнения: 1 - бункер; 2 - рабочая камера; 3 - электроды; 4 - регулируемая стенка; 5 - поршень; 6 - винтовой механизм; 7 - электропривод; 8 - выгрузной шнек.

Криволинейная рабочая камера с поворотным поршнем (рис. 4.13) содержит бункер 1, распределитель-ворошилку 2 в виде качающейся решетки, поворачивающийся барабан 3 с сегментными поршнями 4, уплотняющими корм в камере уплотнения 5 и подающим его в зоны обработки 6, разделенные перегородками 7, на которых установлены электроды. Подвиж-

ные стенки 8 и механизм 9 создают необходимую плотность корма. Защитные электроды 10 исключают вынос потенциала из рабочей зоны. Транспортер 11 и вентилятор 12 удаляют корм и пар из установки.

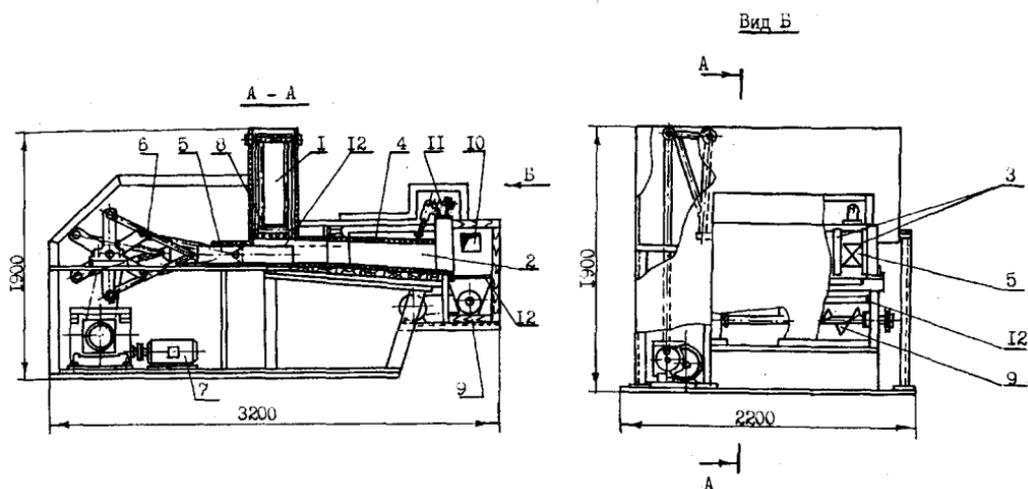


Рис. 4.12. Конструктивно-технологическая схема установки с горизонтальными рабочими камерами и кривошипно-шатунным механизмом привода поршней уплотнения.

Рабочая камера коаксиальной формы с вальцовым уплотняющим механизмом [61] удобна тем, что снижает неравномерность нагрузки на привод механизма уплотнения (рис. 4.17). Установка содержит корпус 1, выполненный в виде двух вертикально установленных коаксиальных цилиндров, образующих рабочую камеру 2, снабженную электродами 3 и выгрузным транспортером 4, установленным в нижней части рабочей камеры под выгрузным отверстием 5. Над корпусом установки соосно с рабочей камерой смонтирован цилиндрический загрузочный бункер 6, в котором на вертикальном валу 7 вращается конусоподобный распределитель 8 со спиральной навивкой. В нижней части распределителя закреплены уплотнители 10, выполненные из диэлектрического материала в виде конических шестерен 11, связанных зубчатой передачей с закрепленной на корпусе неподвижной конической шестерней 12, являющейся общей для всех уплотнителей. При работе установки корм подается в загрузочный бункер и попадает на вращающийся на вертикальном валу 7 распределитель 8 со спиральной навивкой, которым выравнивается равномерно по периметру поперечного сечения рабочей камеры 2, где методом прокатки уплотняется уплотнителями 10, вращающимися как

совместно с распределителем 8, так и относительно собственных осей 9 посредством конических шестерен 11, жестко связанных с вальцами уплотнителей 10 и неподвижной конической шестерни 12, закрепленной в верхней части корпуса 1. Попадая в пространство, образованное электродами 3, корм подвергается обработке электрическим током, транспортером 4 выгружается через отверстие 5. Благодаря трению о стенки рабочей камеры движущегося корма создается противодавление, обеспечивающее необходимое уплотнение и надежный электрический контакт между электродами и обрабатываемой массой. При этом процесс уплотнения, обработки и транспортировки материала происходит непрерывно, снижаются динамические нагрузки на конструкцию установки, установленная мощность электропривода уплотнения.

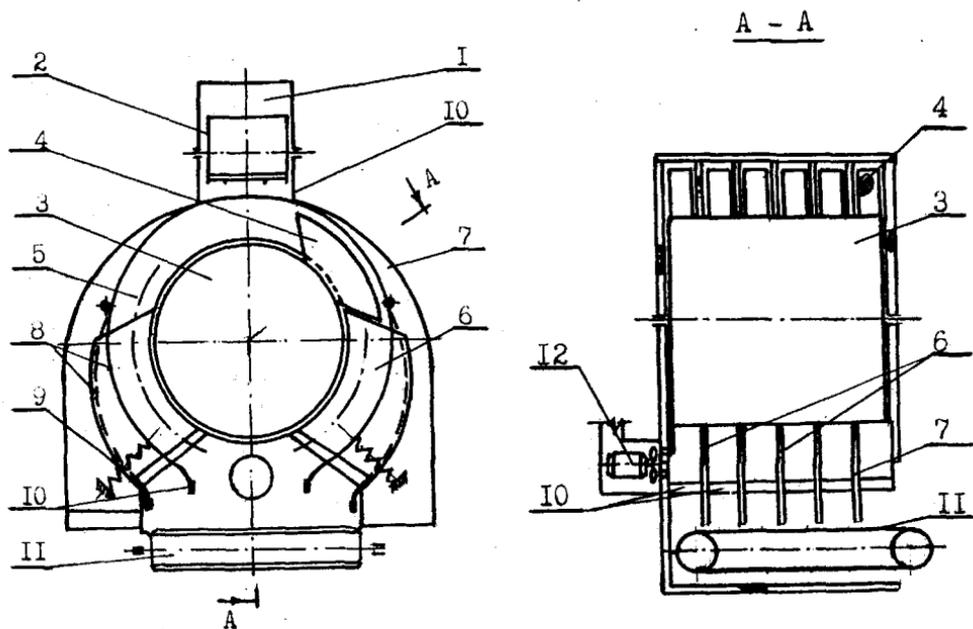


Рис. 4.13. Технологическая схема установки с криволинейной рабочей камерой и поворотным уплотнителем.

Недостаток рассмотренных установок состоит в неполной выгрузке корма из камеры по окончании работы. Установки, показанные на рис. 4.14...4.16, полностью выгружают корм из зоны обработки.

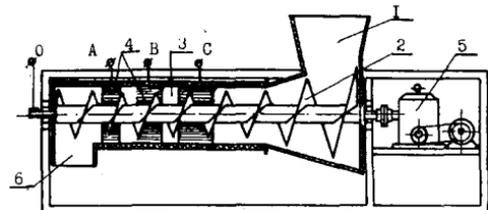


Рис. 4.14. Технологическая схема установки со шнековым уплотнителем и коаксиальной рабочей камерой.

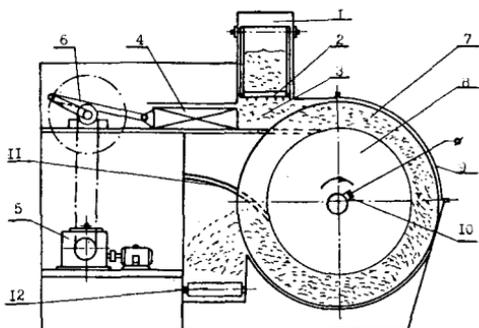


Рис. 4.15. Технологическая схема установки с вращающимися рабочими камерами катушечного типа.

Установка с коаксиальной рабочей камерой и шнековым уплотнителем (рис. 4.14) состоит из загрузочного бункера 1, шнека 2, коническая часть которого уплотняет, а цилиндрическая транспортирует материал через рабочую камеру 3 [62]. В камере установлены кольцеобразные электроды 4. Витки шнека выполнены из изоляционного материала, а вал служит электродом и подключается к нулевой точке источника питания. Недостаток коаксиальной рабочей камеры, как уже указывалось в 1.3, это высокая неравномерность температуры и трудности изоляции витков спирали вала шнека от корпуса установки. Кроме того, при транспортировке поток корма разрывается, что ухудшает его контакт с электродом.

Камера катушечного типа (рис. 4.15) вращается в процессе работы. Корм в зоне обработки неподвижен относительно токоподводящих электродов. Эта конструкция создает наиболее надежный токоподвод к материалу. Бункер 1 и качающаяся решетка 2 установлены над камерами уплотнения 3, в которых находятся поршни уплотнения 4. Привод состоит из электродвигателя, мотор-редуктора, коленчатого вала и кривошипно-шатунного механизма. Рабочие камеры 7 образованы обечайками из диэлектрика 9, закрепленными на цилиндре 8. Электроды установлены на стенках обечаек. Напряжение к ним подводят через щеточно-коллекторный механизм 10. Корм, уплотненный между обечайками, вращается вместе с барабаном и скребками 11 удаляется из камеры на транспортер 12. В установках этого типа необходимо согласовывать усилие уплотнения корма и противотормозящее усилие на валу барабана.

Вертикальная камера с транспортерным уплотнителем (рис. 4.16), расположенная в основу такой же установки, содержит встречновращающиеся

транспортеры 1, под бункером 2. Транспортеры захватывают планками 3 корм, уплотняют его и перемещают через зону обработки 4. Фазные электроды 5 установлены между транспортерами, нулевые — на боковых стенках. Недостаток подобной конструкции состоит в сложности транспортера из диэлектрических материалов, заклинивании корма на центральных электродах, нарушении контакта материала с электродами из-за его разрыва скребками при транспортировке.

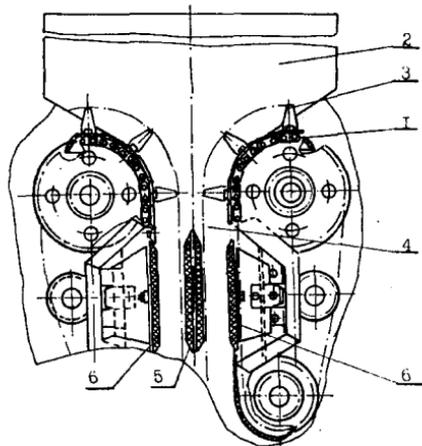


Рис. 4.16. Конструктивно-технологическая схема установки транспортерного типа.

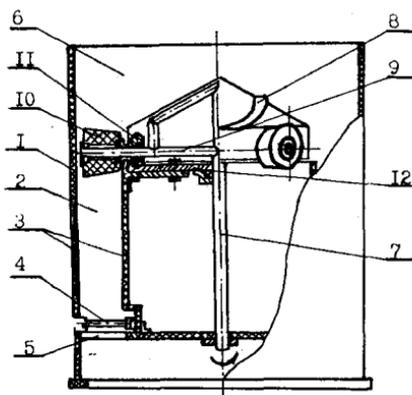


Рис. 4.17. Конструктивно-технологическая схема установки вальцового типа с коаксиальной рабочей камерой.

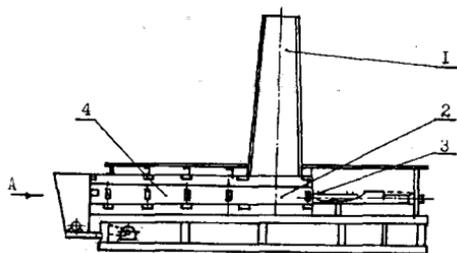
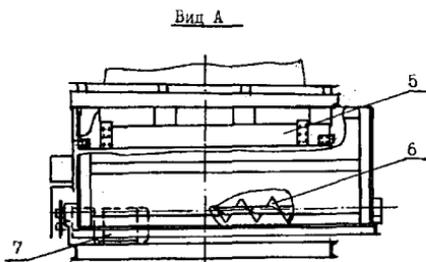


Рис. 4.18. Конструктивно-технологическая схема горизонтальной установки с прямым ходом уплотнителя.



Рассмотренные конструкции работают при трехфазном напряжении питания. Число рабочих камер пропорционально числу фаз источника пита-

ния. Установки существенно проще по конструкции и более надежны в эксплуатации при однокамерном трех- или однофазном питании. В установках подобного типа (рис. 4.18) исключен механизм распределения корма по камерам, снижены вибрационные нагрузки и масса оборудования. Корм из накопителя 1 проваливается в зону уплотнения 2, и оттуда поршень 3 проталкивает его в рабочую камеру 4, в которой на горизонтальных стенках установлены электроды. Козырек 5 с ручным регулятором подуплотняет корм до необходимой величины и одновременно направляет его на выгрузной транспортер 6 с электроприводом 7.

Таким образом, из рассмотренных устройств распределения, уплотнения и транспортировки корма, формы и расположения рабочей камеры наиболее полно отвечают требованиям электрической обработки установки со шнековым распределением и поршневым уплотнением. В установках производительностью 1000 кг/ч и более рабочие камеры следует размещать вертикально. В установках производительностью до 500 кг можно использовать камеры с горизонтальным размещением. Необходимо стремиться к однокамерным установкам. Это значительно упрощает конструкцию, снижает материалоемкость оборудования, однако усложняет и удорожает источник питания. В качестве базовых конструкций можно рекомендовать: для обработки соломы установку производительностью 500...1000 кг/ч, показанную на рис. П.1, и установку производительностью до 500 кг/ч (рис. 4.18); для обработки фуражного зерна установку производительностью до 500 кг/ч (рис. 3.12).

4.6. Источники питания

Источники питания (ИП) предназначены для преобразования параметров электрической энергии питающей сети к виду, требуемому технологией процессов, и должны отвечать требованиям:

1. Выходные параметры ИП должны соответствовать требованиям технологии по виду (частоте) тока, плотности тока, напряженности электрического поля. В процессах электротермической обработки используют преимущественно переменный ток промышленной частоты 50 Гц. Процессы электрохимической обработки эффективны на постоянном токе.

2. Возможность регулирования выходных параметров. В специализированных установках необходимость в этом возникает при отклонениях от номинального режима, вызванных технологическими причинами, при изменении свойств исходного (одного и того же по виду) сырья, а также колебании сетевого напряжения. В универсальных установках регулирование необходимо при переходе от одного вида сырья к другому.

3. Вид внешней характеристики ИП должен соответствовать статистическим и динамическим характеристикам нагрузки. Основную роль играют

статические вольтамперные характеристики (ВАХ) кормовых систем, которые имеют, как правило, возрастающий вид (рис. 2.13, 2.14), поэтому для стабилизации режимов работы ИП должен иметь падающую внешнюю характеристику.

4. Число фаз выходного напряжения должно соответствовать фазности технологической установки.

5. Надежностью источника питания, которая в совокупности с технологической частью должна обеспечить достаточную надежность работы установки. Система «ИП — технологическая установка» должна обладать способностью саморегуляции («запирания») и исключать возможность возникновения искрений в объеме твердообразных кормов и на электродах.

6. Безопасность обслуживания должна отвечать соответствующим требованиям ПУЭ, ПТЭ и ПТБ, ведомственным нормам, с учетом того, что обслуживать установки должен, как правило, неэлектротехнический персонал.

7. Быстродействие защит — одно из условий надежности, призвано обеспечить быстрое отключение питания при нарушении электрической изоляции в технологической и электрической частях установки, при появлении токов утечки или потенциалов на оборудовании, при возникновении искрений и др.

8. Высокий КПД, который наряду с технологическими приемами обработки призван способствовать снижению энергоемкости процессов.

9. Простота и невысокая стоимость. Современные технические средства преобразования электрической энергии способны удовлетворять самым строгим требованиям к ИП. Однако стоимость ИП может составить значительную долю в единовременных затратах на установку: до половины общей стоимости в установках обработки твердообразных материалов и существенно большую в установках обработки жидкообразных кормов. Установки электрообработки относятся к массовому оборудованию ферм, поэтому простота и стоимостные показатели играют важную роль при выборе ИП. Вместе с тем, высокая эффективность технологий при обеспечении надежной работы оборудования позволяет окупать все затраты в короткий срок.

Наиболее простой и экономичный способ электропитания установок — подключение их непосредственно к сети 380/220 В. Однако это возможно лишь в отдельных случаях при следующих условиях: установки переменного тока трехфазного исполнения; конструктивное исполнение и условия эксплуатации таковы, что несмотря на гальваническую связь рабочих камер с питающей сетью надлежащие требования по технике безопасности соблюдаются; сетевое напряжение допустимо по условиям технологии для питания рабочих камер; не требуется регулирование напряжения.

Перечисленные условия могут быть соблюдены лишь для специализированных установок (как правило, с жидкостными средами) на крупных кормообработывающих предприятиях при размещении установок в отдельном помещении и обслуживании квалифицированным персоналом.

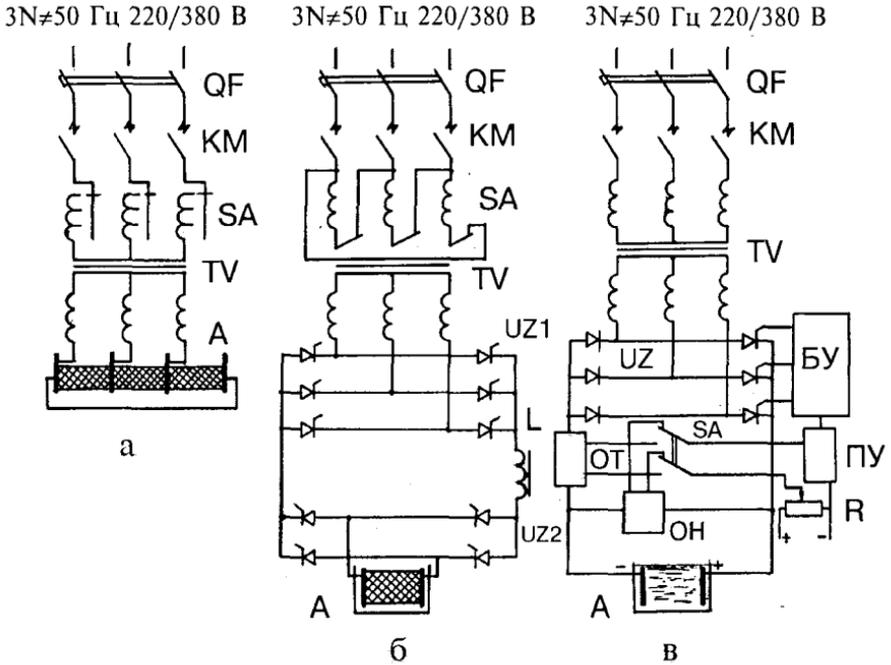


Рис. 4.19. Принципиальные электрические схемы силовых цепей основных видов источников питания: а - регулируемый электропечной трансформатор; А - технологическая установка; б - тиристорный преобразователь тока; в - регулируемый выпрямитель для питания установок постоянного тока; БУ - блок управления; ОТ, ОН - обратная связь по току и напряжению; R - задатчик тока.

При необходимости снижения, по сравнению с сетевым, напряжения питания, а также по условиям безопасности обслуживания следует применять понижающие электропечные трансформаторы, выполняющие одновременно и роль разделительных (рис. 4.19,а). Серийно выпускаемые электропечные трансформаторы трехфазные (типа ТПТ на 40...250 кВА) и однофазные (типа ТПО на 15...250 кВА) имеют по 8 ступеней вторичного напряжения, что позволяет их использовать для питания широкого круга специализированных и универсальных установок различного назначения и

мощности. В ответственных установках, где требуется плавное регулирование напряжения, следует использовать регулируемые трехфазные (типа РОТ, РОТМ) трансформаторы такого же диапазона мощностей.

Установки обработки твердообразных кормов часто наиболее целесообразно выполнять однокамерными (однофазными), что облегчает задачу обеспечения требуемых технологических режимов, упрощения и повышения надежности функционирования технологической части установок. Однако задача выбора ИП при этом усложняется. Включение однофазных установок в трехфазную сеть допустимо лишь при малой мощности (не более 10...25 кВт). При более высоких мощностях необходимо симметрирование нагрузки, которое в данном случае возможно тремя путями:

1) применением симметрирующих устройств по схеме Штейнметца и др.,

2) использованием параметрического источника питания (ПИТ), обеспечивающего не только симметрирование нагрузки, но и высокую устойчивость и стабилизацию процесса,

3) применением тиристорных преобразователей напряжения и тока.

Первые два решения мало приемлемы по экономическим соображениям и по причине невысокой надежности их функционирования при непостоянстве нагрузки, характерном для процессов электрообработки. Наиболее приемлемым по технико-экономическим критериям следует считать третий путь.

По виду внешней характеристики преобразователей (источники мощности, напряжения, тока) высокую стабильность и устойчивость процессов обеспечивают источники мощности, но они и наиболее дорогостоящи. Условиям работы установок электрообработки в достаточной мере отвечают тиристорные преобразователи тока, выполненные по упрощенной схеме автономного инвертора (рис. 4.19,б). Отличие их от обычных схем автономных инверторов состоит, в основном, в отсутствии коммутирующего конденсатора, что уменьшает стоимость ИП. Ток нагрузки при этом становится прерывистым в виде знакопеременных импульсов с частотой 50 Гц. Разрывы длительностью до 100 мс обусловлены временем, необходимым для восстановления коммутационной способности вентилях. Однако для рассматриваемых процессов это не является отрицательным фактором, а даже играет положительную роль, способствуя более полному проявлению поляризационных явлений, лежащих в основе нетеплового действия тока. Такой ИП имеет вогнуто-падающую внешнюю характеристику, приближающуюся к характеристике источника мощности. Одновременно он выполняет функции симметрирующего устройства и регулятора силы тока. Диапазон токов устанавливается переключением схемы соединения первичных обмоток разделительного трансформатора.

Специально для питания установок электрообработки кормов Челябинским и Белорусским институтами механизации сельского хозяйства разработан преобразователь трехфазного напряжения промышленной частоты в однофазное регулируемое ТПЧН-160.

Силовая схема (рис. П.3,а) представляет собой трехфазно-однофазный мостовой преобразователь частоты, выполненный в виде двух встречно-параллельных мостовых управляемых выпрямителей, что обеспечивает равномерную загрузку питающей сети.

Схема управления (рис. П.4) выполнена на интегральных микросхемах 155 и 140 серий и содержит систему синхронизации, компенсирующую влияние нестабильности параметров питающего напряжения; одноканальное смещающее устройство, обеспечивающее наибольшую симметрию управляющих импульсов; распределительное устройство, формирующее сводные импульсы, требуемые для управления мостовыми схемами, и распределяющее импульсы управления по управляющим переходам силовых тиристоров, и задающий генератор, формирующий требуемую технологическую частоту выходного напряжения генератора. Диаграмма работы схемы управления для прямого или обратного мостового выпрямителя показана на рис. П.5. Условные обозначения выходных сигналов диаграммы соответствуют условным обозначениям выходных сигналов схемы управления (рис. П.4.).

Блок питания (рис. П.3,б) содержит три трансформатора, включенные в трехфазную сеть; два стабилизированных источника ± 5 В, для питания логических элементов серии 155 и операционных усилителей серии 140; нестабилизированный источник +30 В для питания цепей управления тиристоров.

Максимальная мощность преобразователя 160 кВА. Напряжение питающей сети трехфазное 380 В, 50 Гц. Диапазон изменения выходного напряжения 70...240 В при частоте $17 \pm 15\%$ Гц. Номинальный ток однофазной нагрузки 720 А. Габариты преобразователя, м, $0,3 \times 0,6 \times 0,8$. Масса 80 кг.

Для питания установок постоянного тока применяют различные по схемным решениям одно- и трехфазные нерегулируемые и регулируемые выпрямители, в том числе и специализированного назначения. К последним относятся, в частности, выпрямительные агрегаты типа ВАК, ВАКР, источники питания серии ИПТУ, ИПП и др. Они предназначены для питания близких по характеру процессов и выпускаются в широком диапазоне мощностей — от единиц до сотен кВт, но имеют сравнительно низкое выходное напряжение (до 60 В). Выбор или проектирование ИП в данном случае представляет собой главным образом экономическую задачу минимизации затрат при выполнении требований технологии и стремления к возможно большей простоте схемного решения на достаточной надежности. Этим требованиям отвечает ИП, приведенный на рис. 4.19,в. Он представляет со-

бой полууправляемый выпрямитель, собранный по мостовой схеме, способной работать на жестких (при включении обратной связи по напряжению ОН) или крутопадающих (при включении обратной связи по току ОТ) характеристиках, что важно при обработке жидкостных сред, где температурный фактор играет меньшую роль, а электрофизические свойства их заметно отличаются.

Приведенные рекомендации указывают основные направления решения задач выбора ИП для основных типов установок электрообработки. Подробное рассмотрение этих вопросов, применительно к различным ИП и установкам, составляет вполне самостоятельную и интересную область исследований.

Источник питания оказывает существенное влияние на энергетические и электрические характеристики установки по сравнению с питанием их непосредственно от сети, которую можно рассматривать как источник напряжения бесконечно большой мощности. Это необходимо учитывать при выборе ИП, ибо совместные рабочие характеристики системы "источник питания — нагрузка" определяют области оптимальных режимов работы, которые должны согласовываться с режимами допустимых технологией процессов.

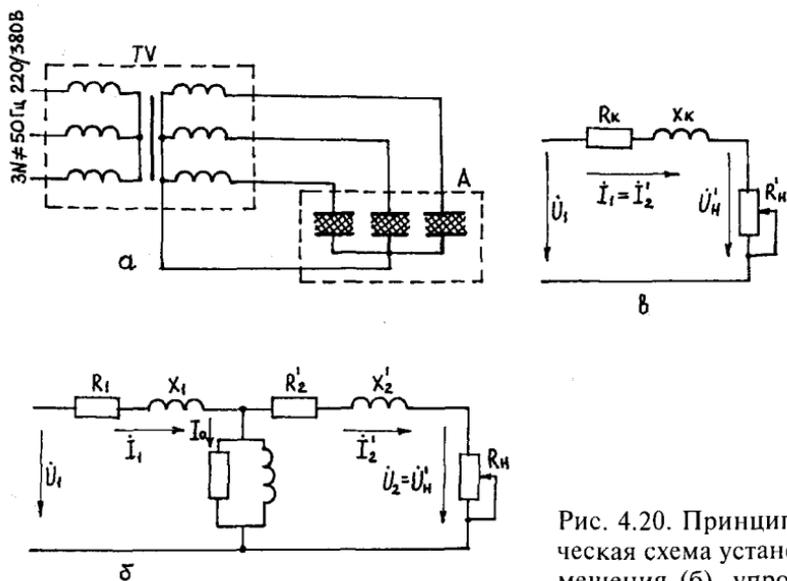


Рис. 4.20. Принципиальная электрическая схема установки (а), схема замещения (б), упрощенная схема замещения (в).

Рассмотрим энергетические и электрические характеристики установок с понижающим трансформатором в качестве ИП. При иных ИП подход к построению и анализу характеристик принципиально не отличается. Для решения задачи используем метод круговых диаграмм, применимый при анализе работы электротермического и иного электрооборудования [63...65].

Принципиальная электрическая схема установки приведена на рис. 4.20, а. Там же показана Т-образная (рис. 4.20, б) и упрощенная (рис. 4.20, в) схема замещения. На схемах величины, помеченные штрихом, приведены к напряжению первичной обмотки трансформатора, R_H — сопротивление нагрузки. Упрощенная схема замещения получена в допущении, что ток намагничивания трансформатора $I_0=0$. Параметры упрощенной схемы:

$$R_k = R_1 + R'_2, \quad x_k = x_1 + x'_2$$

определяют из опыта короткого замыкания трансформатора. Примем еще одно допущение, положим, что приведенное индуктивное сопротивление x_k не зависит от величины тока. Это упрощает дальнейшие выкладки, не оказывая заметного влияния на конечные результаты.

Напишем выражение для электрических параметров установки, используя упрощенную схему замещения и опуская для упрощения записей штрихи при приведенных к первичной обмотке трансформатора величинах I_2 , R'_H , U'_H .

Мощность, выделенная в нагрузке:

$$P_H = 3I_2^2 R_H = 3I_2 \left[\sqrt{U_1^2 - (I_2 x)^2} - I_2 R_k \right]. \quad (4.16)$$

Электрические потери установки:

$$\Delta P_3 = 3I_2^2 R_k. \quad (4.17)$$

Активная мощность, потребляемая установкой:

$$P_A = P_H + \Delta P_3 = 3I_2^2 (R_H + R_k) I_2 \sqrt{U_1^2 - (I_2 x_k)^2}. \quad (4.18)$$

Электрический КПД:

$$\eta_3 = \frac{P_H \sigma_H}{P_A} = \left(1 - \frac{I_2 R_k}{\left[U_1^2 - (I_2 x)^2 \right]^{0.5}} \right) \sigma_H, \quad (4.19)$$

где $\sigma_n < 1$ — коэффициент, учитывающий снижение активной мощности вследствие асимметрии напряжений при неравномерной загрузке камер (трехфазный вариант установки) или искажения формы кривых токов и напряжений по сравнению с синусоидальной формой (однокамерный вариант установки при питании от симметрирующего источника).

Коэффициент мощности:

$$\cos \varphi = \frac{P_A}{S} = \sqrt{1 - \left(I_2 \frac{x_k}{U_1} \right)^2}, \quad (4.20)$$

где S — полная мощность установки.

Напряжение на рабочих камерах:

$$U_n = \sqrt{U_1^2 - (I_2 x_k)^2} - I_2 R_K, \quad (4.21)$$

Как видно, основные электрические параметры установки являются функцией тока I_2 , которая в комплексной форме выражается как:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_1}{(R_n + R_K) + jx_k}. \quad (4.22)$$

Перепишем (4.22) в виде:

$$\dot{I}_2 - j\dot{I}_2 (R_n + R_K) / x_k = -j\dot{U}_1 / x_k. \quad (4.23)$$

Из формулы (4.23) видно, что при принятом выше допущении $x_k = \text{const}$;

1) геометрическая сумма векторов \dot{I}_2 и $-j\dot{I}_2 (R_n + R_K) / x_k$ равна постоянной величине — венцу $-j\dot{U}_1 / x_k$;

2) вектор $-j\dot{U}_1 / x_k$, сдвинутый относительно вектора \dot{U}_1 на $\pi/2$ в отрицательную сторону;

3) вектор $-j\dot{I}_2 (R_n + R_K) / x_k$ также сдвинутый относительно вектора \dot{I}_2 на $\pi/2$ в отрицательную сторону.

В соответствии с (4.22) модуль тока I_2 теоретически изменяется от 0 ($R_n = \infty$ — холостой ход) до значения тока короткого замыкания ($R_n = 0$)

$$I_2 = I_{K3} = U_1 / \sqrt{R_K^2 + x_K^2}. \quad (4.24)$$

Из этого следует, что геометрическим местом точек конца вектора \dot{I}_2 является полуокружность, построенная на векторе $-j\dot{U}_1/x_k = \overline{OA}$ как на диаметре (рис. 4.21). Вектор \dot{U}_1 направлен по оси ординат. Векторная диаграмма позволяет получить все основные электрические характеристики установки при изменении тока нагрузки I_2 . Это имеет важное значение для выбора оптимального режима работы, а в установках периодического действия позволяет проследить за изменением всех параметров в процессе обработки. Построение круговой диаграммы производится обычным методом.

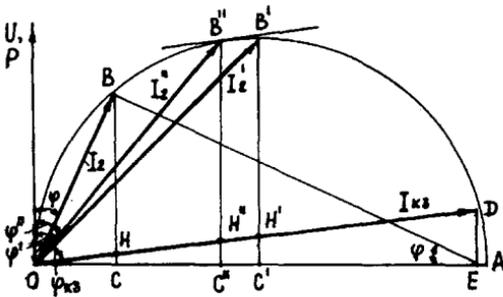


Рис. 4.21. Круговая диаграмма установки.

Для некоторого промежуточного режима $0 < R_H < \infty$ (точка В, рис. 4.21) вектор \overline{OB} определяет в определенном масштабе величину полного тока \dot{I}_2 , а \overline{BA} — вектор $B[-j\dot{I}_2(R_H + R_K)/x_K]$. Активная составляющая тока \dot{I}_2 соответствует отрезку $\overline{BC} = I_2 \cos \varphi$. Опустив из точки В перпендикуляр на \overline{OA} , получим отрезок $\overline{OC} = I_2 \sin \varphi$, определяющий реальную составляющую тока, φ — угол сдвига вектора тока относительно вектора напряжения U_1 .

Точка Д соответствует режиму короткого замыкания (к.з.), а вектор \overline{OD} — I_{K3} — току к.з., модуль которого определяется формулой (4.24). Вектор $\overline{DE} = I_{K3} \cos \varphi U_1 = I_{K3}^2 R_K$ определяет величину потерь при к.з. Потери при токе I_2 (соответствующем точке В) определяют отрезком $\overline{CH} = \Delta P_0 = I_2^2 R_K$, а мощность нагревательных камер — отрезком \overline{HB} .

Максимальная активная мощность P , потребляемая установкой, соответствует режиму в точке B , полученной при пересечении окружности с перпендикуляром, восстановленным в центре окружности C' . При этом

$P' = \overline{B'C'}$, полный ток $I_2' = \overline{OB'}$, мощность, потребляемая нагрузкой $P_H' = \overline{B'H'}$, потери $\Delta P_3 = \overline{H'C'}$; $\varphi' = \pi/4$. Абсолютные значения этих величин:

$$I_2' = U_1 \cos \varphi' / x_k = U_1 / \sqrt{2} x_k; \quad P' = U_1 I_2' \cos \varphi' = U_1^2 / (2x_k^2);$$

$$P_H' = I_2'^2 R_H = U_1^2 R_H / (2x_k^2); \quad \Delta P_3' = I_2'^2 R_K = U_1^2 R_K / (2x_k^2). \quad (4.25)$$

Максимальная мощность, потребляемая нагрузкой, достигается в точке B'' , в которой касательная к окружности параллельна вектору \overline{OD} . При этом ток $I_2'' = \overline{OB''}$ меньше тока $I_2' = \overline{OB'}$, $P_H'' = \overline{B''H''}$, $\Delta P_3'' = \overline{H''C''}$.

Величину тока I_2'' , при которой P_H достигает максимума, можно определить аналитически, взяв производную $\partial P_H / \partial I_2$ по выражению (4.16) и приравняв ее к нулю. В результате получим известный в электротехнике результат: максимум мощности будет при условии равенства внутреннего сопротивления источника сопротивлению нагрузки:

$$R_H = Z_K = \sqrt{R_K^2 + x_k^2}. \quad (4.26)$$

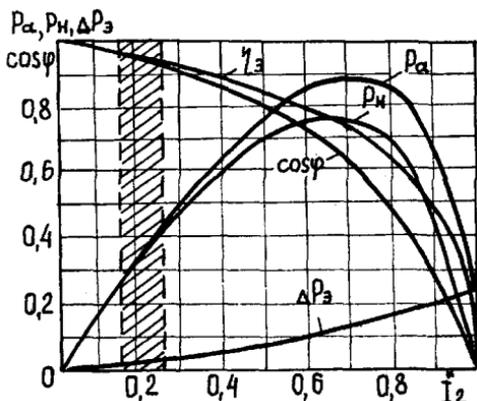


Рис. 4.22. Электрические характеристики установки электрогидротермической обработки фуражного зерна (штриховкой показана область рациональных режимов работы).

При затруднении с построением круговой диаграммы (когда $Z_K \ll R_H$) электрические характеристики установки можно построить, воспользовавшись зависимостями (4.16...4.20) и прибегнув к относительным величинам.

В качестве базовой величины принимают ток идеального короткого замыкания:

$$I_6 = U_1 / x_K. \quad (4.27)$$

За базовую мощность принимают:

$$S_6 = 3U_1 I_6. \quad (4.28)$$

Расчетные параметры:

$$I_2^* = I_2 / I_6; \quad P_H^* = P_H / S_6; \quad P_A^* = P_A / S_6;$$

$$\Delta P_3 = \Delta P_3 / S_6, \quad j = x_k / R_k. \quad (4.29)$$

Расчетные зависимости (4.16...4.20) для построения электрических характеристик в относительных величинах имеют вид:

$$P_H^* = I_2^* \left(\left[1 - I_2^{*2} \right]^{0.5} - I_2 / j \right); \quad \Delta P_3^* = I_2^2 / j;$$

$$P_a^* = I_2^* \left(1 - I_2^{*2} \right)^{0.5}; \quad \eta_3 = \left(1 - I_2 / \left[j \left(1 - I_2^{*2} \right)^{0.5} \right] \right) \sigma_H;$$

$$\cos \varphi = \left(1 - I_2^* \right)^{0.5}.$$

На рис. 4.22 приведены электрические характеристики установки электрохимической обработки фуражного зерна производительностью 0,5 т/ч, построенные по изложенной методике. Штриховкой показана область рациональных режимов работы.

Таким образом, применение круговых диаграмм или зависимостей (4.27)...(4.30) позволяет рассчитать и построить электрические характерис-

тики установок обработки кормов электрическим током и выявить влияние факторов на работу установок, выбрать рациональный режим работы по току, уточнить энергетические показатели процессов.

4.7. Электрические схемы управления

Установки электрохимической и тепловой обработки кормов относят к объектам автоматического регулирования с распределенными параметрами. При построении моделей и схем управления следует учитывать особенности этих установок.

1. Зависимость сопротивления рабочей камеры от исходного состояния материала (качества, сроков заготовки и хранения, влажности и др.), которое в конечном счете влияет на удельную проводимость. Установлено, что дисперсия удельной начальной проводимости кормовых материалов под действием ряда факторов может достигать 20...50%, наиболее вероятное значение 30%.

2. Зависимость удельной проводимости от температуры. Для большинства кормов изменение температуры от начальной до конечной обработки увеличивает проводимость в 2,5...4 раза, а для мелассы в 10...12 раз.

3. Необходимость интенсификации переходного процесса в начальный момент вывода установки на рабочий режим путем изменения напряжения питания на электродах рабочей камеры.

4. Возможность возникновения неравномерного сопротивления фаз рабочей камеры.

Для снижения влияния особенностей, отмеченных в п.п.1., 2, система автоматического регулирования (САР) температуры или мощности должна устанавливать величину напряжения на установке в зависимости от начальной величины удельной проводимости обрабатываемого материала и поддерживать температуру на выходе из установки при ее изменении на входе. В момент включения установки регулятор устанавливает на электродах рабочей камеры напряжение, пропорциональное удельной проводимости среды. После того, как процесс установится, температуру или ток поддерживают изменением напряжения от уже установленной величины, пропорциональной проводимости. Закон изменения напряжения имеет вид:

$$U_p = U_H \sqrt{\gamma_H / \gamma_p}, \quad (4.31)$$

где U_p - напряжение, подводимое к рабочей камере, В; U_H - номинальное напряжение рабочей камеры, В; γ_H - номинальная удельная проводимость кормового материала в рабочей камере, См/м; γ_p - фактическая удельная проводимость кормового материала, См/м.

Система автоматического регулирования (рис. 4.23) состоит из тиристорного регулятора 1, подключенного к сети и установке для обработки кормов 2, датчика 3 и задатчика 4 температуры корма, блоков управления по температуре 5 и проводимости 6, задатчика 7 и датчика 8 проводимости корма, блока питания 9 [66].

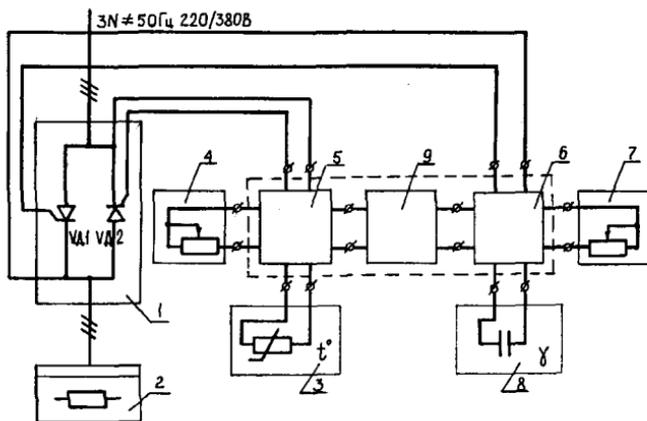


Рис. 4.23. Принципиальная схема устройства регулирования мощности установок обработки кормов: 1 - тиристорный регулятор; 2 - установка обработки кормов; 3, 4 - датчик и задатчик температуры; 5, 6 - блоки управления по температуре и проводимости; 7, 8 - задатчик и датчик проводимости; 9 - блок питания схемы.

В качестве датчика проводимости использована мостовая схема, содержащая потенциометры и два электрода, вмонтированные в зоне, через которую проходит обрабатываемый материал.

Система регулирования работает следующим образом. После включения питания задатчиком устанавливают температуру обработки. Задатчиком проводимости устанавливают опорный сигнал компаратора, пропорциональный номинальной проводимости, на которую рассчитана рабочая камера установки. Сигнал от датчика проводимости, пропорциональный фактической проводимости среды в рабочей камере, сравнивается в компараторе с заданным опорным, и их сумма (разность) поступает на регулируемый источник питания и на нем устанавливает начальное напряжение, соответствующее фактической проводимости среды. Включают обработку. Напряжение от источника питания подается на электроды рабочей камеры. Температура повышается и достигает заданной. При температуре ниже заданной сигнал от датчика температуры сравнивается в компараторе с сигналом задатчика, и их разность воздействует на исполнительное устройство таким образом,

что на установке поддерживается максимальное напряжение, пропорциональное проводимости. При отклонении температуры сверх заданной суммарный сигнал от задатчика и датчика температуры воздействует на исполнительное устройство так, что напряжение на нагревателе начинает снижаться, соответственно понижается и температура.

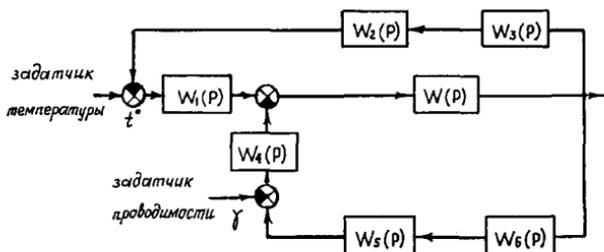
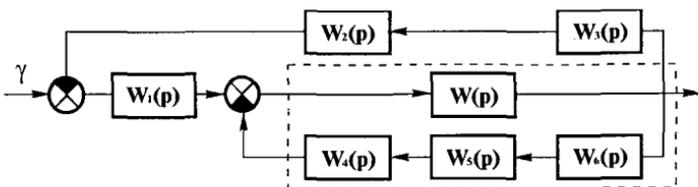


Рис. 4.24. Структурная схема САУ установок обработки кормов: $W_2(p)$, $W_5(p)$ - датчики проводимости и температуры; $W_3(p)$, $W_1(p)$ - блоки преобразования проводимости; $W_4(p)$, $W_6(p)$ - блоки преобразования температуры; $W(p)$ - объект управления.

САУ электрообработкой может быть представлена линейной системой с сосредоточенными параметрами. Ее структурная схема показана на рис. 4.24. САУ является многомерной с безинерционными звеньями, так как нормальное функционирование объекта управления требует изменения по заданному закону двух физических величин - температуры и проводимости. Структурная схема содержит местную (W_6, W_5, W_4) и общую обратную связь (звенья W_2, W_3). Задающими воздействиями являются сигналы, поступающие с датчиков проводимости и температуры среды.

Определим передаточные функции, используя принцип суперпозиции, применимый к любой линейной системе. Как известно, он позволяет выразить реакцию системы на любые произвольные воздействия через реакцию системы на элементарное единичное воздействие. Наиболее часто используют ступенчатое воздействие.

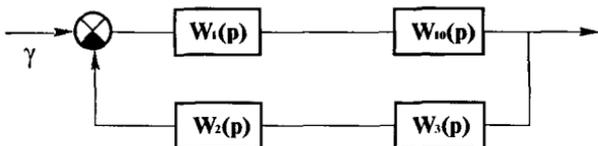
При воздействии задатчика температуры, равном нулю, схема имеет вид



Передаточная функция

$$W_{10}(p) = \frac{W(p)}{1 + W(p)W_4(p)W_6(p)W_5(p)}. \quad (4.32)$$

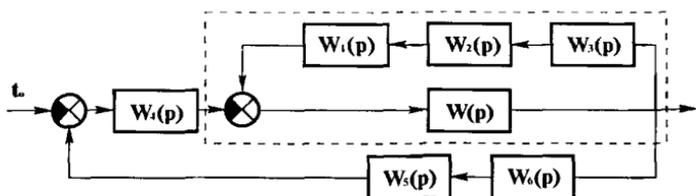
После упрощения схема примет вид:



Передаточная функция для этой схемы:

$$W_{100}(p) = \frac{W(p)W_{10}(p)}{1 + W_{10}(p)W_2(p)W_3(p)W_1(p)}. \quad (4.33)$$

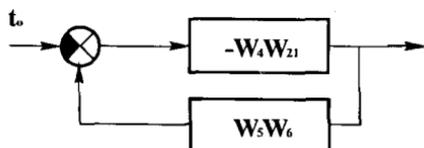
При воздействии задатчика проводимости, равном нулю, структурную схему можно представить:



Передаточная функция этой схемы:

$$W_{21}(p) = \frac{W(p)}{1 + W(p)W_1(p)W_2(p)W_3(p)}. \quad (4.34)$$

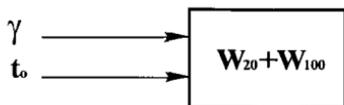
После преобразования схемы и объединения звеньев получим:



и следующее уравнение

$$W_{20}(p) = - \frac{W_4(p)W_{21}(p)}{1 + W_5(p)W_6(p)W_4(p)W_{21}(p)}. \quad (4.35)$$

Окончательное уравнение для всей схемы:



$$W(p) = W_{20} + W_{100} = \left(\frac{W_3(p)W_{10}}{1 + W_{10}W_3(p)W_1(p)W_2(p)} \right) + \left(\frac{W_4(p)W_{21}}{1 + W_{21}W_5(p)W_4(p)W_6(p)} \right). \quad (4.36)$$

Как видно, уравнение передаточной функции САР электрообработки кормовых материалов достаточно сложное.

Для оценки работоспособности и динамических свойств этой САР необходимо знать конкретные численные значения параметров всех звеньев схемы и объекта управления.

Согласно рекомендациям по выбору параметров отдельных звеньев САР [67...69] структурная схема с параметрами звеньев может быть представлена в следующем виде:

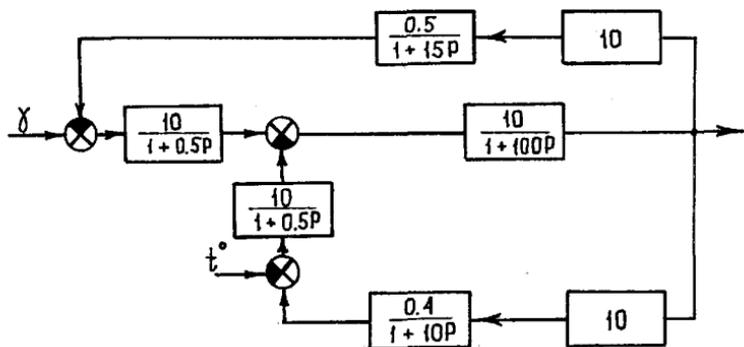


Рис. 4.25. Структурная схема САР с параметрами.

В этом случае передаточная функция с числовыми значениями приобретает вид

$$W(p) = \frac{10W_{10}}{1 + \frac{0,5}{1 + 15p} 10 \frac{10}{1 + 0,5p} W_{10}} + \frac{\frac{10}{1 + 0,5p} W_{21}}{1 + \frac{0,4}{1 + 10p} 10 \frac{10}{1 + 0,5p} W_{21}}. \quad (4.37)$$

При этом

$$W_{10} = \frac{\frac{10}{1 + 100p}}{1 + \frac{10}{1 + 100p} \frac{10}{1 + 0,5p} 10 \frac{0,4}{1 + 10p}}; \quad (4.38)$$

$$W_{21} = \frac{\frac{10}{10 + 100p}}{1 + \frac{10}{10 + 100p} \frac{10}{1 + 0,5p} \frac{0,5}{1 + 15p} 10}$$

Для оценки качества САР и ее динамических свойств преобразуем полученные выражения и решим соответствующие уравнения по известным методам [67,68].

В данной системе используется пропорциональное уравнение. Передаточная функция объекта управления по управляющему воздействию имеет вид

$$W_{0y} = \frac{K}{1 + pT}.$$

Численные значения K и T приняты из экспериментальных данных. В зависимости от вида объекта регулирования получены различные разгонные характеристики, которые представляют собой кривые, соответствующие апериодическим звеньям 1-го и 2-го порядков. Например, для установки электротепловой обработки мелассы производительностью 250 кг/ч передаточная функция приобретает вид

$$W_{0y} = \frac{10}{1 + 100p}.$$

Уравнение переходной функции при входном единичном воздействии

$$h(\tau) = K(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}) = 10 \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}} \right). \quad (4.39)$$

Задаваясь значениями τ , рассчитаем $h(\tau)$ (рис. 4.26).

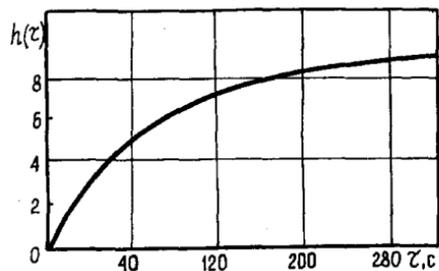


Рис. 4.26. Переходная функция объекта управления по управляющему воздействию.

Для построения статической характеристики объекта управления запишем коэффициент передачи звена в комплексной форме:

$$W_{OY}(j\omega) = \frac{10}{1 + j100\omega}. \quad (4.40)$$

Статическая характеристика, представляющая зависимость между значениями входного и выходного сигналов звена при нулевой частоте (рис. 4.27)

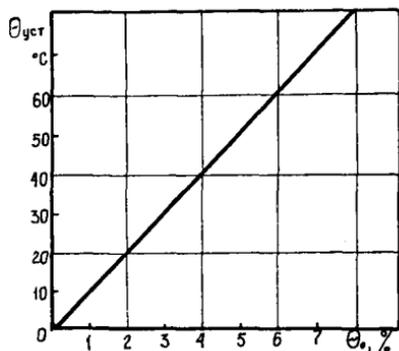


Рис. 4.27. Статическая характеристика объекта управления по управляющему воздействию.

$$W_{OY} = \frac{Q_{уст}}{Q_{уст}} = 10 \text{ } ^\circ\text{C}/\% \text{ описывается выражением } Q_{уст} = 10 Q_{уст}.$$

Амплитудно-фазовая характеристика объекта (рис. 4.28) описывается уравнением

$$W_{OY}^{Q_o}(j\omega) = \frac{10(1 - 100j\omega)}{(1 + j100\omega)(1 - j100\omega)} = \frac{10}{1 + 10000\omega^2} - j \frac{1000\omega}{1 + 10000\omega^2}. \quad (4.41)$$

$$A(\omega) = \frac{|10|}{\sqrt{|1 + 100j\omega|}} = \frac{10}{\sqrt{1 + 10000\omega^2}} \quad (4.42)$$

и фазо-частотная характеристики

$$\varphi(\omega) = \arg 10 - \arg(1 - j100\omega) = 0 - \arctg 100\omega = -\arctg 100\omega$$

показаны на рис. 4.29.

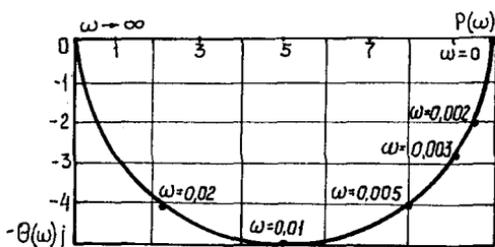


Рис. 4.28. Амплитудно-фазовая характеристика объекта управления по управляющему воздействию.

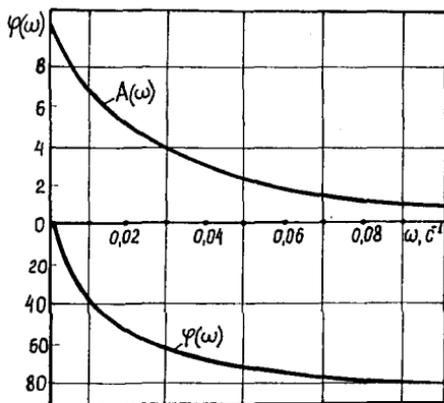


Рис. 4.29. Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики объекта управления по управляющему воздействию.

Анализ характеристик рис.4.26...4.29 показал, что процесс обработки управляющего воздействия носит апериодический характер, установившийся режим при постоянном входном воздействии для вычисленных значений параметров соответствует линейной характеристике. Амплитудно-фазовая характеристика соответствует апериодическому звену. АЧХ показывает, что сигнал очень низкой частоты воспроизводится элементом практически без искажений ($A=1$).

Высокочастотные сигналы искажаются тем больше, чем больше постоянная времени звена. Фазочастотная характеристика элемента показывает, что он вносит фазовый сдвиг, изменяющийся от 0 до 90° при изменении частоты от 0 до ∞. На данной частоте фазовый сдвиг тем больше, чем больше постоянная времени T . При частоте около $6 \cdot 10^{-3}$ Гц амплитуда и

фаза стабилизируются. Запас устойчивости по фазе около 35° , а по амплитуде около 0,8.

Переходная характеристика (рис. 4.26) оценивается величиной выходной координаты в установившемся режиме $h_{уст}$ и длительностью переходного процесса. Величина $h_{уст}$ определяется коэффициентом преобразования звена: $h_{уст}=kx_{уст}=10$, а длительность переходного процесса зависит от постоянной времени звена T : чем больше T , тем медленнее устанавливается значение $h_{уст}$ на выходе звена.

Практически переходный процесс можно считать закончившимся через промежуток времени $\tau_{рег} \approx 3T$, $\tau_{рег}$ - время регулирования. Численные значения параметров следующие: $T=100с$, $\tau_{рег}=300с$, коэффициент преобразования $k=0,033$.

Оценка системы (рис. 4.26) по ее временной переходной характеристике показывает, что при нулевом воздействии на входе γ и единичном на входе t , а также при обратных воздействиях переходные характеристики практически идентичны. При выбранных значениях параметров звеньев САР неустойчива, т.к. в ней возможны возникновения автоколебаний. Для обеспечения устойчивой работы системы изменим параметры ее звеньев в цепях обратных связей и получим для двух вариантов значений переходные характеристики (рис. 4.30 а, б).

Графики иллюстрируют затухающий колебательный процесс. Их удобно использовать для оценки качества управления САР, которое характеризуется рядом параметров. Время нарастания, или время первого достижения установившегося значения $\tau_{нр}=8 с$, время установления $\tau_y=20 с$, период затухающих колебаний $T_0=36 с$, частота колебаний $F=0,03 с^{-1}$. Установившаяся ошибка, определяющая статическую точность системы, равна $e_{уст}=1-h_{уст}=0,08$.

Время регулирования $\tau_{рег}=76 с$ служит основной характеристикой быстродействия системы. Оно определено из условия $|h(\tau) - h_{уст}| \leq \delta_{рег}$ при $\tau \geq \tau_{рег}$, где $\delta_{рег}$ - заранее заданное значение, которое обычно принимают равным $0,05h_{уст}$.

Относительное перерегулирование равно:

$$H_m = \frac{h_m + h_{уст}}{h_{уст}}, H_m = 23,4\%.$$

Число перерегулирований $N=1$ в интервале $0 < \tau \leq \tau_{рег}$.

Установившаяся ошибка e , время регулирования $\tau_{рег}$ и относительное перерегулирование определяют зону, ограничивающую ошибку системы в ходе процесса управления. Относительное перерегулирование и число перерегулирований определяют запас устойчивости системы. В большинстве

случаев запас устойчивости достаточен, если $H_m \leq 30\%$, а $N \leq 3$ [69]. Показатели рассмотренной САР с достаточным запасом отвечают этим требованиям. Рассмотренная модель САР отвечает требованиям устойчивости и качества регулирования, хотя на стадии проектирования она является приближенной. При технической реализации системы ее параметры должны быть уточнены.

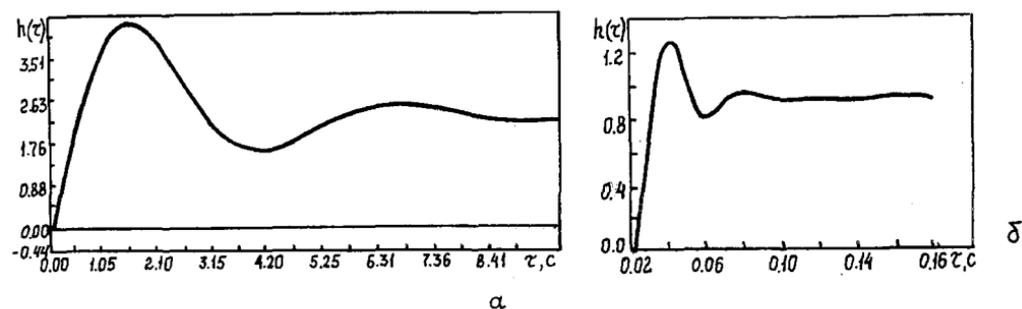


Рис. 4.30. Переходная характеристика САР установки.

Некоторые примеры электрических схем управления установками электрообработки кормов показаны на рис. П.6...П.8.

5. ОСНОВЫ РАСЧЕТА РАБОЧИХ КАМЕР

5.1. Компоновка рабочей камеры

Рабочая камера является основным элементом устройств электро-технологической обработки кормов. В большинстве случаев достоинства и недостатки этих установок могут быть поставлены в прямую связь с особенностями конструкции рабочей камеры, выбранной для заданного технологического процесса.

В общем случае рабочая камера состоит из нескольких однофазных электродных систем, изолированных между собой и от внешнего доступа. Однофазная электродная система содержит токоподводящие электроды, пространство между которыми заполнено обрабатываемым кормом, и изолирующие стенки, ограничивающие рабочее пространство (рис. 5.1). Применительно к кормовым материалам, по условию равномерности электрического поля и, следовательно, тепловой и химической обработки необходимо использовать плоские параллельные электроды. Их возможное расположение в пространстве и относительно направления уплотнения показано на рис. 5.1.

Наибольшая равномерность обработки соответствует вертикальному расположению электродов и верхней подаче и уплотнению кормового материала (рис. 5.1, а, б). В этом случае максимальное отклонение температуры от средней по сечению камеры не превышает 10%, в то время как при горизонтальном расположении электродов это отклонение доходит до 30% (рис. 5.1, в, г). В последнем случае неравномерность температуры растет с уменьшением плотности материала в зоне обработки. Это связано с неравномерным распределением влаги по объему корма под действием гравитационной силы.

Заметное влияние на подвод электрического тока к корму оказывает направление давления уплотнения, которое может быть нормальным или касательным относительно электродов. При нормальном направлении давления раствор отжимается из приэлектродной зоны, что увеличивает контактное сопротивление и ухудшает условия ввода энергии. Удельная электрическая проводимость системы электрод-кормовая масса в этом

случае в 1.5—2.0 раза ниже, чем при касательном направлении уплотнения.

Расположение электродов в пространстве рабочей камеры влияет на равномерность плотности тока по их поверхности. Вариант компоновки (рис. 5.1, г) создает равный ток по ширине верхнего и нижнего электродов и что не обеспечивает компоновка на рис. 5.1, в.

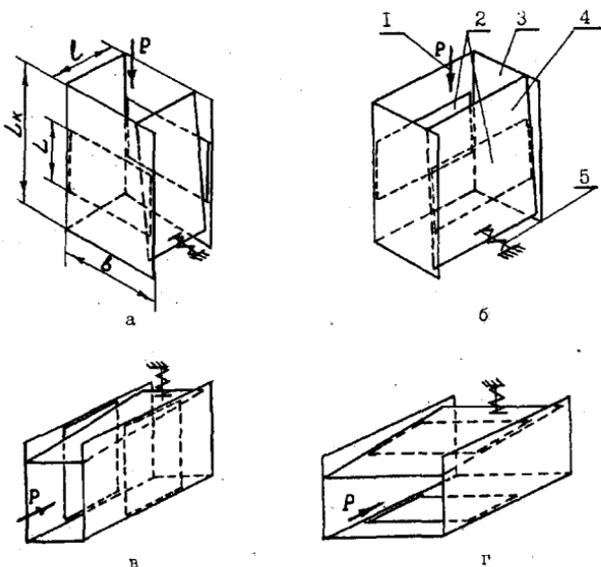


Рис 5.1. Варианты компоновки рабочих камер для обработки грубо-дисперсных кормов:

1 - направление уплотнения корма; 2 - токоподводящие электроды; 3 - изолирующий корпус; 4 - подвижная подуплотняющая стенка; 5 - механизм дополнительного уплотнения; l - расстояние между электродами; L - длина электрода; L_k - длина рабочей камеры; v - ширина электрода.

Вариант компоновки рабочей камеры зависит от назначения и производительности установки. Для обработки легкотекучих кормов (меласса, картофельный сок и др.) следует использовать вертикально расположенные электроды с нижней подачей материала (рис. 5.1, а, б). В этом варианте направление потока жидкости совпадает с направлением движения фракций (газы, коагуляты). При обработке грубодисперсных увлажненных материалов, таких, как солома, зерно и др., при небольшой производительности установки (250...300 кг/ч) можно использовать схему на рис. 5.1, а. При большой производительности предпочтительнее компоновка рис. 5.1, б, т.к. с увеличением производительности приходится увеличивать ширину электродов, что снижает эффективность искусственного подуплотнения корма в камере механизмом 5. В отдельных случаях, когда высота оборудования ограничена, приходится использовать варианты 5.1 в, г, которые увеличивают длину, но уменьшают высоту установки.

5.2. Конструкционные материалы

Надежность и срок безотказной работы устройств электрической обработки кормовых материалов зависит, в первую очередь, от устойчивости материала электродов и изолирующего корпуса рабочей камеры в условиях высокой температуры, активной химической среды, влажности и электрического поля.

Материал электродов должен иметь достаточную эрозионную стойкость, малое контактное сопротивление, не зависящее от продолжительности работы, приемлемую стоимость. Из исследованных материалов [70,71] этим требованиям отвечают графит ГЭ, титан ВТ1-00, сталь нержавеющей X18H10T (табл. 5.1, 5.2).

Сопротивление электродной системы из графита и титана практически не зависит от продолжительности работы. Температурные деформации отрицательно влияют на графит и приводят к трещинам по длине или ширине электродов. Это следует предусматривать при разработке крепления электродов к стенкам рабочей камеры.

Следует отметить, что поведение титана ВТ1-00 нельзя отождествлять с поведением сплавов на его основе, например, Т-16, величина контактного сопротивления и характер эрозии которого ставят этот сплав в один ряд с алюминием А-66 и не позволяют использовать для изготовления электродов.

Материал стенок рабочих камер должен быть изолятором, стойким к воздействию обрабатываемых кормовых сред. В практике изготовления установок испытаны различные марки текстолита, стеклотекстолита, винипласта и фторопласт-4.

Наилучшими изоляционными, термическими, десорбционными свойствами обладает фторопласт. Однако высокая стоимость сдерживает широкое применение этого материала.

Текстолит марок А и Б как изолятор в условиях химических сред кормосмесей неустойчив. Отмечены случаи его пробоя при обработке фуражного зерна и мелассы. Это, видимо, связано с гигроскопичностью текстолитов, способных поглощать влагу до 2% от своей массы и в результате этого снижать электрическое сопротивление в 100 раз. Кроме того, наличие различных кислот и химических элементов в кормовых материалах, впитываемых текстолитом в процессе работы, ухудшает его изоляционные свойства.

Стеклотекстолиты более устойчивы, чем текстолиты, меньше поглощают влагу в процессе работы и понижают сопротивление только в 5 раз. Случаи электрического пробоя стеклотекстолитов марки СТ не отмечены.

Винипласт обладает высокой электрической прочностью и химической стойкостью, удовлетворительной механической и невысокой термической стойкостью.

На основе данных исследований текстолиты можно использовать в деталях, расположенных вне электрического поля. Для изготовления элементов рабочих камер, работающих в электрическом поле, следует применять стеклотекстолит при температуре до 100 °С и винипласт до 60 °С.

5.1. Эрозионная стойкость материалов электродов

Материал, марка	Скорость эрозии, 10^{-3} кг / (м ² ·ч)			
	ЭТХО соломы	ЭГТО зерна	электротепловая обработка мелассы	электрокоагуляция белков картофельного сока
Сталь Ст. 3	—	—	6.3	0.99
Сталь Ст. 45	—	6.4	—	0.63
Сталь Х18Н10Т	4.2	5.0	4.0	0.63
Титан ВТ1-00	1.5	2.8	0.25	—
Графит ГЭ	11.3	6.9	0.08	0.19

5.2. Среднее контактное сопротивление в диапазоне рабочих температур и плотности токов

Материал электрода, марка	Удельное контактное сопротивление, Ом·м ²			
	ЭТХО соломы	ЭГТО зерна	электротепловая обработка мелассы	электрокоагуляция белков картофельного сока
Сталь Ст. 3	—	—	0.027	0.011
Сталь Ст. 45	—	0.012	—	—
Сталь Х18Н10Т	0.071	0.014	0.028	0.013
Титан ВТ1-00	0.063	0.013	0.027	0.012
Графит ГЭ	0.027	0.011	0.022	0.008

5.3. Механический расчет рабочих камер

Полный расчет рабочих камер включает механический, тепловой и электрический расчеты. Механический расчет выполняют для установок обработки грубодисперсных материалов, требующих предварительного уплотнения. Основная задача расчета состоит в определении усилия уплотнения корма и конструктивных размеров рабочей камеры, обеспечивающих выполнение технологического процесса.

Рассмотрим два случая конструктивного исполнения рабочей камеры.

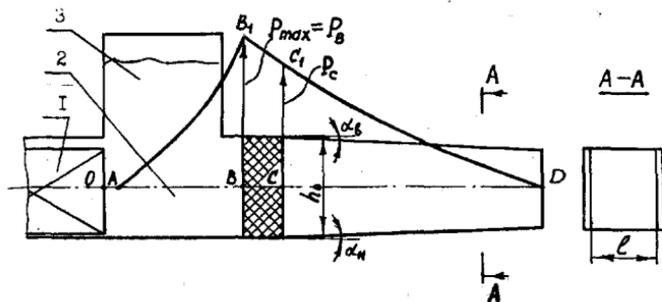


Рис. 5.2. Распределение давления в открытой камере с регулируемым сечением.

а) Камера открытая, прямая, с регулируемым поперечным сечением (рис. 5.2).

Примем началом уплотнения точку A , когда поршень 1, продвинувшись на какое-то расстояние OA , обратное коэффициенту заполнения K_3 камеры уплотнения 2, проталкивает поступивший через загрузочное отверстие 3 материал в камеру уплотнения и заполняет ее полностью. Давление уплотнителя растет по кривой AB_1 от нуля в точке A до максимального в точке B . В этой точке усилие уплотнения равно сопротивлению проталкивания материала в камеру обработки, и часть корма выталкивается через выходное отверстие. Материал проталкивается на величину BC , где точка C — крайняя мертвая точка уплотнителя. Уменьшение давления от $P_{max} = P_B$ до P_C на этом участке происходит по какой-то кривой B_1C_1 . На участке CD давление поршня P_C передается всей массе материала в камере. Начиная от точки B , давление в материале понижается из-за трения о стенки камеры. Распределения давления в рабочей камере находят из условия равновесия элементарного слоя материала толщиной dx , отстоящего от единичной уплотненной порции толщиной b на расстоянии x (рис. 5.3).

Пренебрегая величинами 2-го порядка малости, условие равновесия элементарного слоя в сечении x можно представить в виде:

$$P_x h_x l - (P_x + dP_x) h_x l - q_x l dx f_{ст} \cos^2 \alpha_b - q_x l dx f_{ст} \cos^2 \alpha_n - q_x l dx \sin \alpha_b \cos \alpha_n - q_x l dx \sin \alpha_b \cos \alpha_n - 2q_x f_3 h_x dx = 0 \quad (5.1)$$

где $f_{ст}$, f_3 — коэффициент трения материала о стенки рабочей камеры и об электроды; q_x — боковое давление материала в сечении x ; α_b , α_n — угол наклона верхней и нижней стенок рабочей камеры.

Боковое давление материала в сечении x :

$$q_x = \mu P_x + q_0 \quad (5.2)$$

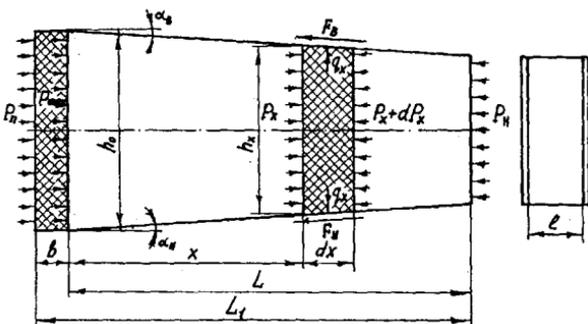


Рис. 5.3. К расчету давления в открытой прямой камере с регулируемым сечением.

где μ — коэффициент бокового давления; q_0 — остаточное боковое давление.

Подставив значения q_x из (5.2) в (5.1) и преобразовав, получим:

$$dP_x dx + q_x dx \left[f_{cT} (\cos^2 \alpha_B + \cos^2 \alpha_H) + \sin \alpha_B \cos \alpha_B + \sin \alpha_H \cos \alpha_H \right] + 2q_x f_3 h_x dx = 0. \quad (5.3)$$

Обозначим

$$f_{cT} (\cos^2 \alpha_B + \cos^2 \alpha_H) + \sin \alpha_B \cos \alpha_B + \sin \alpha_H \cos \alpha_H = z$$

и, используя (5.2), перепишем (5.3) в виде:

$$\frac{dP_x}{\mu P_x + q_0} + \frac{z}{h_x} dx + \frac{2f_3}{l} dx = 0. \quad (5.4)$$

Выразим h_x через начальную высоту рабочей камеры h_0 и текущую координату x :

$$h_x = h_0 - x \operatorname{tg} \alpha_B - x \operatorname{tg} \alpha_H = h_0 - x (\operatorname{tg} \alpha_B + \operatorname{tg} \alpha_H). \quad (5.5)$$

Подставим (5.5) в (5.4):

$$\frac{dP_x}{\mu P_x + q_0} + \frac{z}{h_0 - x (\operatorname{tg} \alpha_B + \operatorname{tg} \alpha_H)} dx + \frac{2f_3}{l} dx = 0 \quad (5.6)$$

или

$$\frac{dP_x}{\mu P_x + q_0} = - \frac{z}{h_0 - x (\operatorname{tg} \alpha_B + \operatorname{tg} \alpha_H)} dx - \frac{2f_3}{l} dx = 0. \quad (5.7)$$

После интегрирования (5.7) получим:

$$\frac{1}{\mu} \int \frac{d(\mu P_x + q_o)}{\mu P_x + q_o} = \frac{-z}{-(tg\alpha_B + tg\alpha_H)} \int \frac{d[h_o - x(tg\alpha_B + tg\alpha_H)]}{h_o - x(tg\alpha_B + tg\alpha_H)} - \frac{2f_3 x}{l} + c;$$

$$\frac{1}{\mu} \ln(\mu P_x + q_o) = \frac{z}{tg\alpha_B + tg\alpha_H} \ln[h_o - x(tg\alpha_B + tg\alpha_H)] - \frac{2f_3}{l} x + c. \quad (5.8)$$

Постоянную интегрирования найдем из начальных условий: при $x = 0$, $P_x = P_{max}$.

$$c = \frac{1}{\mu} \ln(\mu P_{max} + q_o) - \ln \left[\frac{z}{h_o^{tg\alpha_B + tg\alpha_H}} \right].$$

Подставим значение c в (5.8):

$$\frac{1}{\mu} \ln(\mu P_{max} + q_o) = \ln \left\{ [h_o - x(tg\alpha_B + tg\alpha_H)]^{\frac{z}{tg\alpha_B + tg\alpha_H}} \right\} - \frac{2f_3}{l} + \frac{1}{\mu} \ln(\mu P_{max} + q_o) - \ln \left[\frac{z}{h_o^{tg\alpha_B + tg\alpha_H}} \right];$$

$$\ln \left[\frac{\mu P_x + q_o}{\mu P_{max} + q_o} \right] = \ln \left\{ \left[\frac{h_o - x(tg\alpha_B + tg\alpha_H)}{tg\alpha_B + tg\alpha_H} \right]^{\frac{\mu z}{tg\alpha_B + tg\alpha_H}} \right\} - \frac{2f_3}{l} x;$$

$$\ln \left\{ \frac{(\mu P_x + q_o) h_o^{\frac{\mu z}{tg\alpha_B + tg\alpha_H}}}{(\mu P_x + q_o) [h_o - x(tg\alpha_B + tg\alpha_H)]} \right\} = -\frac{2f_3}{l} x;$$

$$\frac{\mu P_x + q_o}{\mu P_{max} + q_o} \left(\frac{h_o}{h_o - x(tg\alpha_B + tg\alpha_H)} \right)^{\frac{\mu z}{tg\alpha_B + tg\alpha_H}} = \exp \left(-\frac{2f_3}{l} x \right);$$

$$\mu P_x + q_o = (\mu P_{\max} + q_o) \left(\frac{h_o - x(\operatorname{tg}\alpha_B + \operatorname{tg}\alpha_H)}{h_o} \right)^{\frac{\mu z}{\operatorname{tg}\alpha_B + \operatorname{tg}\alpha_H}} \exp\left(-\frac{2f_{\text{э}}}{l} x\right);$$

$$P_x = \left(P_{\max} + \frac{q_o}{\mu} \right) \left[\frac{h_o - x(\operatorname{tg}\alpha_B + \operatorname{tg}\alpha_H)}{h_o} \right]^{\frac{\mu z}{\operatorname{tg}\alpha_B + \operatorname{tg}\alpha_H}} \exp\left(-\frac{2\mu f_{\text{э}}}{l} x\right) - \frac{q_o}{\mu}. \quad (5.9)$$

Упростим (5.9)

$$P_x = \left(P_{\max} + \frac{\mu}{q_o} \right) \left[\frac{h_o - x(\operatorname{tg}\alpha_B + \operatorname{tg}\alpha_H)}{h_o} \right]^B \exp\left(-\frac{2\mu f_{\text{э}}}{l} x\right) - \frac{q_o}{\mu}, \quad (5.10)$$

где

$$B = \frac{\mu z}{\operatorname{tg}\alpha_B + \operatorname{tg}\alpha_H}.$$

Уравнение (5.10) позволяет определить осевые напряжения в любом сечении регулируемой камеры. На выходе из камеры при $x=L$ $P_x=0$. Тогда максимальное сопротивление регулируемой камеры из (5.10)

$$P_{\max} = \frac{q_o}{\mu} \left[\frac{h_o - L(\operatorname{tg}\alpha_B + \operatorname{tg}\alpha_H)}{h_o} \right]^B \exp\left(-\frac{2\mu f_{\text{э}} L}{l} x\right) - \frac{q_o}{\mu}. \quad (5.11)$$

Максимальное сопротивление открытой регулируемой камеры представляет собой противодействие, которое в закрытой камере воспринимает упор. Давление упора [44]:

$$P_{\text{уп}} = \left(P_n + \frac{q_o}{\mu} \right) \exp\left(-f_{\text{ср}} \mu \frac{2(h_o + l)}{h_o l} b\right) - \frac{q_o}{\mu}, \quad (5.12)$$

где b — толщина единичной порции уплотненного корма; P_n — давление поршня.

$$P_n = \frac{q_o}{\mu} \left[\frac{h_o - L(\operatorname{tg}\alpha_B + \operatorname{tg}\alpha_H)}{h_o} \right]^B \exp\left(-\frac{2\mu(h_o f_{c\tau} b + l f_{c\tau} b - h_o f_2 L)}{h_o l}\right) + \frac{q_o}{\mu}. \quad (5.13)$$

Необходимая длина камеры L для создания давления P_n может быть определена из уравнения (5.13) численными или графическим методами. Представим (5.13) в виде, удобном для графического решения:

$$\ln\left(\frac{\mu P_n}{q_o} - 1\right) - \frac{2\mu f_{c\tau} b}{l} - \frac{f_{c\tau} b}{h_o} = \frac{\mu z}{\operatorname{tg}\alpha_B + \operatorname{tg}\alpha_H} \ln\left[1 - \left(\frac{\operatorname{tg}\alpha_B + \operatorname{tg}\alpha_H}{h_o}\right)L\right] - \frac{f_2}{h_o} L. \quad (5.14)$$

Обозначим:

$$A = \ln\left(\frac{\mu P_n}{q_o} - 1\right) - \frac{2\mu f_{c\tau} b}{l} - \frac{f_{c\tau} b}{h_o}; \quad F = \frac{\operatorname{tg}\alpha_B + \operatorname{tg}\alpha_H}{h_o};$$

$$D = \frac{f_2}{h_o};$$

Перепишем (5.14) с учетом обозначений:

$$A + DL = B \ln(1 - FL) \quad \text{или} \quad \frac{A}{B} + \frac{DL}{B} = \ln(1 - FL). \quad (5.15)$$

Построим зависимости:

$$y_1 = \frac{A + DL}{B} \quad \text{и} \quad y_2 = \ln(1 - FL) \quad \text{на рис.5.4.}$$

Пересечение графических зависимостей $y_1(L)$ и $y_2(L)$ дает искомую длину рабочей камеры L_p .

Расчет длины рабочей камеры с поворотным уплотняющим поршнем принципиально не отличается от изложенного выше.

б) Криволинейная рабочая камера с регулируемым сечением (рис. 5.6).

Внешняя стенка 1 подвижна на шарнире А и изменяет площадь поперечного сечения камеры. Уплотнение материала в открытой криволинейной камере отличается от открытой прямой тем, что одна из стенок камер подвижна, перемещается вместе с кормом, и угол ее наклона к оси камеры равен 0° . Прежде чем перейти к криволинейной камере, рассмотрим уплотнение в открытой прямой с подвижной нижней и наклонной верхними стенками камеры (рис. 5.5).

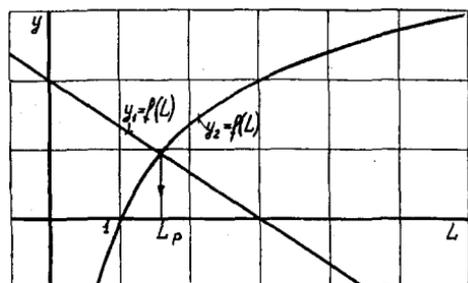


Рис. 5.4. К расчету длины рабочей камеры.

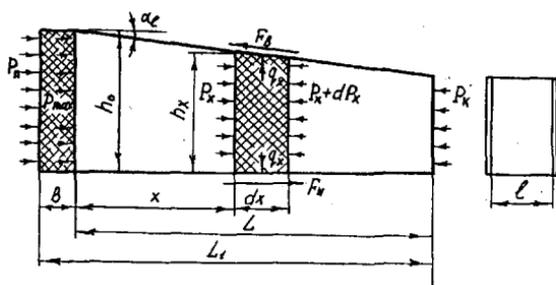


Рис. 5.5. К расчету давлений в открытой прямой камере с регулируемым сечением и подвижной нижней стенкой.

Условие равновесия элементарного слоя в сечении x :

$$P_x h_x l - (P_x + dP_x) h_x l - q_x l dx f_{cT} \cos^2 \alpha_B - q_x l dx \sin \alpha_B \cos \alpha_B + q_x l dx f_{cT} - 2q_x h_x dx f_3 = 0. \quad (5.16)$$

После преобразований

$$dP_x h_x l + q_x l dx [f_{cT} \cos^2 \alpha_B + \sin \alpha_B \cos^2 \alpha_B - f_{cT}] + 2q_x f_3 h_x dx = 0;$$

$$dP_x h_x l + q_x l dx [f_{cT} (\cos^2 \alpha - 1) + \sin \alpha_B \cos \alpha_B] + 2q_x f_3 h_x dx = 0;$$

$$dP_x h_x l + q_x l dx [\sin \alpha_B \cos \alpha_B - f_{cT} \sin^2 \alpha_B] + 2q_x f_3 h_x dx = 0. \quad (5.17)$$

$$\frac{dP_x}{\mu P_x + q_0} = -\frac{K}{h_0 - x \operatorname{tg} \alpha_B} dx - \frac{2f_3}{l} dx, \quad (5.21)$$

Проинтегрируем (5.21):

$$\frac{1}{\mu} \int \frac{d(\mu P_x + q_0)}{(\mu P_x + q_0)} = -\frac{K}{\operatorname{tg} \alpha_B} \int \frac{d[h_0 - x \operatorname{tg} \alpha_B]}{(h_0 - x \operatorname{tg} \alpha_B)} - \frac{2f_3}{l} x + c,$$

$$\frac{1}{\mu} \ln|\mu P_x + q_0| = \frac{K}{\operatorname{tg} \alpha_B} \ln|h_0 - x \operatorname{tg} \alpha_B| - \frac{2f_3}{l} x + c. \quad (5.22)$$

Постоянную интегрирования c в (5.22) найдем из начальных условий, при $x=0$, $P_x=P_{\max}$.

$$c = \frac{1}{\mu} \ln(\mu P_{\max} + q_0) - \ln \left[h_0^{\frac{K}{\operatorname{tg} \alpha_B}} \right]. \quad (5.23)$$

Уравнение (5.22) с учетом (5.23) принимает вид:

$$\frac{1}{\mu} \ln|\mu P_x + q_0| = \ln \left\{ [h_0 - x \operatorname{tg} \alpha_B]^{\frac{K}{\operatorname{tg} \alpha_B}} \right\} - \frac{2f_3}{l} x + \frac{1}{\mu} \ln(\mu P_{\max} + q_0) - \ln \left[h_0^{\frac{K}{\operatorname{tg} \alpha_B}} \right]. \quad (5.24)$$

После преобразований уравнение (5.24) можно записать:

$$P_x = \left(P_{\max} + \frac{q_0}{\mu} \right) \left[\frac{h_0 - x \operatorname{tg} \alpha_B}{h_0} \right]^{\frac{\mu K}{\operatorname{tg} \alpha_B}} \exp \left(-\frac{2\mu f_3}{l} x \right) - \frac{q_0}{\mu}. \quad (5.25)$$

При $x=L$, $P_x=0$. Следовательно, максимальное сопротивление регулируемой камеры из (5.25)

$$P_{\max} = \frac{q_0}{\mu} \left[\frac{h_0 - L \operatorname{tg} \alpha_B}{h_0} \right]^{\frac{\mu K}{\operatorname{tg} \alpha_B}} \exp \left(-\frac{2\mu f_3}{l} L \right) - \frac{q_0}{\mu}. \quad (5.26)$$

Максимальное сопротивление открытой регулируемой камеры можно сравнить с противодавлением упора в закрытой камере. Давление упора [44]

$$P_{\text{уп}} = \left(P_n + \frac{q_o}{\mu} \right) \exp \left(-f_{\text{CT}} \mu \frac{2(h_o + l)}{h_o l} b \right) - \frac{q_o}{\mu}, \quad (5.27)$$

где b - толщина единичной уплотняемой порции материала (рис. 5.5); P_n - давление поршня.

Приравняв правые части (5.26) и (5.27) получим выражение для давления поршня:

$$P_n = \frac{q_o}{\mu} \left[\frac{h_o - L \operatorname{tg} \alpha_B}{h_o} \right]^{\frac{\mu K}{\operatorname{tg} \alpha_B}} \exp \left[\frac{2\mu(h_o f_{\text{CT}} b + l f_{\text{CT}} b - h_o f_3 L)}{h_o l} \right] + \frac{q_o}{\mu}. \quad (5.28)$$

Перейдем к криволинейной камере (рис. 5.6). Активную часть камеры по конструктивным соображениям рассматриваем в диапазоне изменений угла ν от 0 до $\frac{\pi}{2} + \operatorname{arcsin} \beta$. Примем сечение O входным, конусность камеры α_B определим как угол между AO_1 и AO . Угол β можно определить как

$$\beta = \alpha_B + \operatorname{arctg} \frac{2 \sin^2 \frac{\alpha_B}{2}}{1 - \sin \alpha_B}.$$

Для малых углов α_B (обычно $\alpha_B \leq 0,262$, при ошибке не более 2%) можно записать

$$\beta = \alpha_B + \frac{\alpha_B^2}{2(1 - \alpha_B)}. \quad (5.29)$$

Толщина единичной уплотняемой порции b через угол α_n :

$$b = \frac{R + r}{2} \alpha_n. \quad (5.30)$$

Начальная высота рабочей камеры

$$h_o = R + r. \quad (5.31)$$

Используем теорему размерностей и π -теорему, введем безразмерные параметры, как отношение основных размеров к радиусу барабана r :

$$\frac{R}{r}, \frac{h_0}{r}, \frac{L}{r} \text{ и т.д. Обозначим } \frac{R}{r} = m_1.$$

Тогда

$$\frac{b}{r} = \frac{m_1 + 1}{2} \alpha_n, \quad \frac{l}{r} = \frac{l}{r}, \quad \frac{h_0}{r} = m_1 - 1,$$

$$\frac{L}{r} = \frac{R_{cp}(v + \beta)}{r} = \frac{R + r}{2r} (v + \beta) = \frac{m_1 + 1}{2} (v + \beta) = \frac{m_1 + 1}{2} (v + \beta) = \frac{m_1 + 1}{2} \left[v + \alpha_B + \frac{\alpha_B^2}{2(1 - \alpha_B)} \right]. \quad (5.32)$$

Подставим безразмерные параметры в (5.28):

$$P_{II} = \frac{q_0}{\mu} \left[\frac{m_1 - 1 - \frac{m_1 + 1}{2} (v + \alpha_B + \frac{\alpha_B^2}{2(1 - \alpha_B)}) \operatorname{tg} \frac{\alpha_B}{r}}{m_1 - 1} \right] \frac{\mu \left(\sin \frac{\alpha_B}{r} \cos \frac{\alpha_B}{r} - f_{cr} \sin^2 \frac{\alpha_B}{r} \right)}{\operatorname{tg} \frac{\alpha_B}{r}} *$$

$$* \exp \left\{ \frac{2\mu \left[(m_1 - 1) f_{cr} \frac{m_1 + 1}{2} \alpha_{II} + \frac{l}{r} f_{cr} \frac{m_1 + 1}{2} \alpha_{II} - (m_1 - 1) f_3 \frac{m_1 + 1}{2} \left(v + \alpha_B + \frac{\alpha_B^2}{2(1 - \alpha_B)} \right) \right]}{(m_1 - 1) \frac{l}{r}} \right\} + \frac{q_0}{\mu}. \quad (5.33)$$

Необходимый угол поворота подвижной стенки α_B для создания давления P_n определяют численным решением (5.33).

5.4. Расчет камер электротепловой обработки

В случае обработки легкотекучих кормов, не требующих уплотнения достаточно теплового и электрического расчета. Тепловой расчет включает определение мощности, кинетики нагрева, параметров тепловой изоляции, коэффициента полезного действия и других, выполняемых по общепринятым методикам, достаточно общим для термических установок.

Электрический расчет состоит в определении геометрических размеров токоподводящих электродов, мощности и др., при которых технологический процесс будет выполнен. Исходные данные к расчету включают: технологические параметры процесса (вид корма, производительность, начальная и конечная температура, скорость нагрева и др.); характеристики корма (физико-механические, электрические, теплофизические); характеристики источника питания (напряжение, частота, мощность) и др.

Расстояние между электродами l (рис. 5.1.) зависит от напряженности электрического поля E (табл. 1.18) и напряжения между электродами U :

$$l = U/E. \quad (5.35)$$

Ширина электрода b и, следовательно, рабочей камеры зависит от скорости движения кормового материала в зоне обработки. Излишне высокая или низкая скорость ухудшают условия контактирования материала с электродом. Наиболее надежный токопровод соответствует скорости $V=(1...3)10^{-3}$ м/с.

Ширина электрода

$$b = \frac{m_t}{\rho_c l V}, \quad (5.36)$$

где m_t — массовая подача корма, кг/с.

В некоторых случаях ширину электрода корректируют по конструктивным условиям.

Длину электрода L находят из уравнения баланса мощностей рабочей камеры:

$$\frac{U^2 b \gamma_t}{l} dx = \frac{m_t c dt}{\eta_t}, \quad (5.37)$$

$$\frac{U^2 b \eta_t}{m_t c l} dx = \frac{dt}{\gamma_t}, \quad (5.38)$$

где x — текущая длина электрода, м; t — текущая температура, °С; γ_t — удельная проводимость корма при температуре t , См/м; η_t — тепловой КПД рабочей камеры, о.е.

Температурная характеристика удельной проводимости кормов имеет вид линейный

$$\gamma_t = \gamma_{20} [1 + \alpha(t - 20)] \quad (5.39)$$

или экспоненциальный

$$\gamma_t = \gamma_{20} \exp[\alpha(t - 20)], \quad (5.40)$$

где γ_{20} — удельная проводимость корма при 20 °С, См/м; α — температурный коэффициент проводимости, 1/°С.

Решение (5.38) с учетом (5.39) и (5.40) при изменении t от t_1 до t_2 и x от 0 до L дает расчетную длину электродной системы:

$$L = \frac{m_t c l}{U^2 b \gamma_{20} \alpha \eta_t} \ln \frac{1 + \alpha(t_2 - 20)}{1 + \alpha(t_1 - 20)}, \quad (5.41)$$

$$L = \frac{m_t c l}{U^2 b \gamma_{20} \alpha \eta_t} \exp[\alpha(t_2 - t_1)]. \quad (5.42)$$

Формулы (5.36), (5.41), (5.42) справедливы для односекционных камер. Если рабочая камера состоит из n секций, где n — число, кратное числу фаз источника питания, то длину и ширину электродов, рассчитанных по (5.36), (5.41), (5.42), уменьшают в n раз.

Результаты расчетов необходимо проверить по мощности. Расчетная тепловая мощность $P_{\text{рт}}$ рабочих камер должна быть равна рассчитанной электрической мощности $P_{\text{рз}}$.

$$P_{\text{рт}} = \frac{m_t c (t_2 - t_1)}{\eta_t}, \quad (5.43)$$

$$P_{\text{рз}} = \frac{n U^2 b L \gamma_{\text{ср}}}{l}, \quad (5.44)$$

где $\gamma_{\text{ср}}$ — средняя удельная проводимость кормовой массы в диапазоне температур от t_1 до t_2 .

Для температурной характеристики удельной проводимости линейной

$$\gamma_{\text{ср}} = \ln \left(\frac{t_2 + 20}{t_1 + 20} \right) [\alpha \gamma_{20} (t_2 - t_1)]^{-1}, \quad (5.45)$$

экспоненциальной

$$\gamma_{\text{ср}} = \gamma_{20} \exp[\alpha(t_2 - t_1)] [\alpha(t_2 - t_1)]^{-1}. \quad (5.46)$$

При известных параметрах электродной системы из уравнения (5.41) или (5.42) можно найти время тепловой обработки. Например, из (5.41)

$$\tau = T_{\text{н}} \ln \left[\frac{1 + \alpha(t_2 - 20)}{1 + \alpha(t_1 - 20)} \right]. \quad (5.47)$$

Постоянная времени тепловой обработки, с,

$$T_{\text{н}} = \frac{m_t c l}{U^2 L b \gamma_{20} \alpha \eta_t}. \quad (5.48)$$

Величина $T_{\text{н}}$ характеризует интенсивность нарастания температуры материала и представляет отношение теплоемкости этого материала к мощности, потребляемой из сети.

Мощность, потребляемая из сети, для зависимости (5.39)

$$P_t = \frac{U^2 b L \gamma_{20} [1 + \alpha(t - 20)]}{l \eta_{\text{э}}} = P_{20} [1 + \alpha(t - 20)] \quad (5.49)$$

растет прямо пропорционально температуре и температурному коэффициенту проводимости.

При тепловой обработке кормов с большим температурным коэффициентом мощность может возрасти многократно. Например, для мелассы, характеризуемой экспоненциальной зависимостью проводимости от температуры (5.40), отношение $P_{t=60}/P_{t=20} > 8$. Многократное изменение мощности, иногда до 12 раз, ведет к большой неравномерности плотности тока по длине электродов. Одним из способов выравнивания мощности и плотности тока является многозонный нагрев, который чаще всего сводится к двухзонному [72].

Один из примеров выполнения двухзонного нагревателя показан на рис. 5.7, а. Нагреватель состоит из плоскопараллельных токоподводящих 1, нулевых 2 и промежуточных 3 электродов, установленных на боковых стенках диэлектрического корпуса. Промежуточные электроды секционированы и соединены между собой перемычками. Это позволяет разделить весь объем материала между электродами на участки с различной проводимостью и последовательно соединить секции зоны входа I, где более низкая проводимость, с секциями зоны выхода II, где проводимость более высокая. Так как

проводимость по длине электродов в зонах I и II изменяется встречно, суммарная проводимость двух последовательно соединенных участков примерно одинакова в любом сечении нагревателя. Благодаря этому плотность тока на длине электродов и мощность фаз сети достаточно одинаковы.

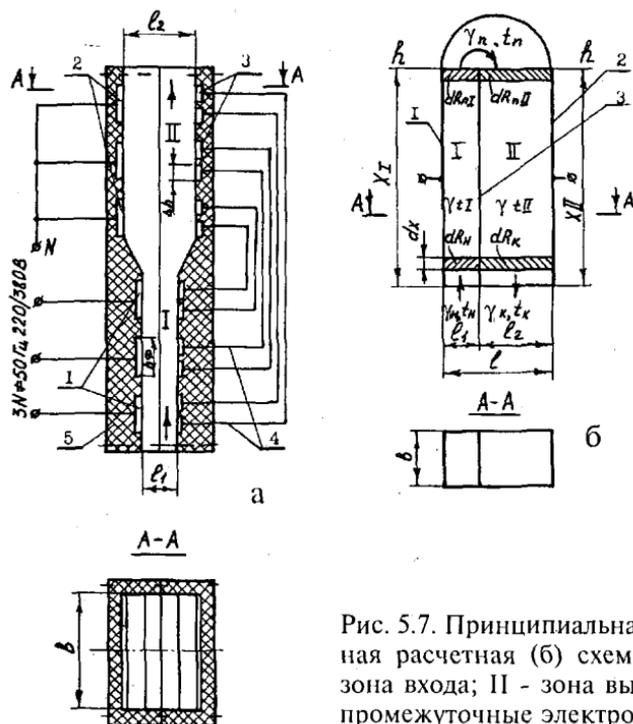


Рис. 5.7. Принципиальная конструктивная (а) и упрощенная расчетная (б) схемы двухзонного нагревателя: I - зона входа; II - зона выхода; 1,2,3 - фазные, нулевые и промежуточные электроды; 4 - переключки; 5 - корпус.

Задача расчета двухзонных нагревателей состоит в определении геометрических размеров электродов и их взаимного расположения, при которых достигается требуемая мощность и равномерность плотности тока. Основные рассчитанные размеры — расстояние между токоподводящими электродами l , отношение межэлектродных расстояний зон входа и выхода, длина электрода, высота и число промежуточных секций.

Неизменная по длине электродов плотность тока и, следовательно, равномерная загрузка фаз будет достигнута при условии (рис. 5.7, б)

$$dR_{\text{H}} + dR_{\text{K}} = dR_{\text{нI}} + dR_{\text{нII}}, \quad (5.50)$$

где $dR_H, dR_K, dR_{II}, dR_{III}$ — сопротивление объема материала высотой dx в начале и в конце электродов и на участке перехода из зоны I в зону II нагревателя.

Равенство (5.50) можно записать в таком виде:

$$\frac{l_1}{\gamma_H} + \frac{l_2}{\gamma_K} = \frac{(l_1 + l_2)}{\gamma_{II}}, \quad (5.51)$$

где $\gamma_H, \gamma_K, \gamma_{II}$ — удельная электрическая проводимость кормового материала на входе и выходе нагревателя и на участке перехода из зоны I в зону II.

При заданной начальной t_H и конечной t_K температуре, т.е. при заданной удельной проводимости γ_H и γ_K , выполнение условия (5.50) зависит, согласно (5.51), от соотношения межэлектродных расстояний

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{(\gamma_H - \gamma_{II})}{(\gamma_H - \gamma_K)}. \quad (5.52)$$

Отношение $\frac{l_1}{l_2}$ можно найти из уравнений изменения проводимости по длине электродов:

$$\frac{dg_I}{dx} = \frac{b}{l_1} \gamma_{I_1}(x); \quad \frac{dg_{II}}{dx} = \frac{b}{l_2} \gamma_{II_1}(x); \quad (5.53)$$

где dg_I, dg_{II} — проводимость объема материала высотой dx в зоне I и II на расстоянии x от начала электродов; $\gamma_{I_1}(x), \gamma_{II_1}(x)$ — изменение удельной проводимости материала по длине электродов (x) в зоне I и II; b — ширина электрода.

Рассмотрим случай нагрева ионных проводников. Для зоны входа можно записать:

$$\gamma_{I_1}(x) = \gamma_H [1 + \alpha(t_1(x) - t_H)], \quad (5.54)$$

где α — температурный коэффициент проводимости; $t_1(x)$ — изменение температуры по длине электродов зоны I.

Зависимость $t_1(x)$ найдем из уравнения баланса мощностей для зоны входа:

$$\frac{U_1^2(x) b \gamma_{I_1}(x)}{l_1} dx = \frac{m_i c}{\eta} dt, \quad (5.55)$$

где $U_1(x)$ — изменение напряжения между токопроводящими и промежуточными электродами по длине зоны I.

Выразим $U_1(x)$ через плотность тока j , допуская, что она неизменна по длине электродов:

$$U_1(x) = \frac{j l_1}{\gamma_{I_1}(x)}, \quad (5.56)$$

Подставив (5.54), (5.56) в (5.55), найдем температуру в зоне входа:

$$t_I(x) = \frac{1}{\alpha} \left[(A_1 l_1 x + 1)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] + t_H, \quad (5.57)$$

где $A_1 = \frac{2\alpha j^2 b \eta}{m_i c \gamma_H}$.

Тогда (5.54) с учетом (5.57) примет вид:

$$\gamma_{I_1}(x) = \gamma_H (A_1 l_1 x + 1)^{\frac{1}{2}}, \quad (5.58)$$

Аналогично для зоны выхода:

$$t_{II}(x) = \frac{1}{\alpha} \left[(A_2 l_2 (-x) + 1)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] + t_K, \quad (5.59)$$

где

$$A_2 = \frac{2\alpha j^2 b \eta}{m_i c \gamma_K}, \quad \gamma_{II}(x) = \gamma_K (A_2 l_2 (-x) + 1)^{\frac{1}{2}}. \quad (5.60)$$

Подставив (5.58) и (5.60) в (5.59), найдем изменение сопротивления по длине электродов:

$$dR_I(x) = \frac{1,5 A_1 l_1^2}{b \gamma_H (A_1 l_1 x + 1)^{\frac{3}{2}}}; \quad (5.61)$$

$$dR_{II}(x) = \frac{1,5 A_2 l_2^2}{b \gamma_K (A_2 l_2 (-x) + 1)^{\frac{3}{2}}}; \quad (5.62)$$

где $dR_I(x)$, $dR_{II}(x)$ — сопротивление в зоне I и II на расстоянии x от начала электродов.

Минус перед x учитывает, что в зоне выхода при увеличении длины электродов проводимость уменьшается.

Условию (5.50) соответствует

$$dR_I(x) + dR_{II}(x) = \text{const}. \quad (5.63)$$

Совместное решение (5.61) и (5.62) показывает, что равенство (5.29) выполняется при

$$\frac{l_1}{l_2} = \sqrt{\frac{\gamma_H}{\gamma_K}}. \quad (5.64)$$

Формула (5.64) определяет отношение l_1/l_2 , при котором проводимость материала между токопроводящими электродами и, следовательно, плотность тока по длине электродов нагревателя неизменны. Она справедлива и для материалов, у которых вид температурной характеристики проводимости отличается от (5.54). Расстояние между токопроводящими электродами

$$l = l_1 + l_2; \quad l = \frac{U \gamma_{cp}}{j},$$

где U , γ_{cp} — напряжение и средняя удельная проводимость материала между токопроводящими электродами.

$$\gamma_{cp} = \frac{\gamma_H + \gamma_K \left(\frac{l_1}{l_2} \right)}{1 + \frac{l_1}{l_2}}.$$

Из уравнения баланса мощностей длина электродов

$$L = \frac{[1 + \alpha(t_{cp} - t_H)]^2 - 1}{A_1 l_1}, \quad (5.65)$$

где

$$t_{\text{cp}} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\gamma_{\text{cp}}}{\gamma_{\text{H}}} - 1 \right) + t_{\text{H}}. \quad (5.66)$$

Длина фазного (нулевого) электрода

$$h_{\Phi} = \frac{h}{3}.$$

Количество секций промежуточных электродов, при котором неравномерность проводимости по высоте каждой из секций не превышает какой-то заданной величины K :

$$n = \frac{\alpha(t_{\text{K}} - t_{\text{H}})}{K}.$$

По конструктивным соображениям, неравномерность проводимости по высоте секции не должна превышать 10...30 %, что соответствует $K = 0,1...0,8$.

Высота промежуточной секции

$$\Delta h = \frac{L}{n}.$$

Расчетная мощность нагревателя

$$P_{\text{рз}} = 3 \frac{U^2}{R_{\Phi i}}$$

должна быть равна расчетной технологической мощности

$$P_{\text{рт}} = \frac{m_r c (t_{\text{K}} - t_{\text{H}})}{\eta}.$$

Сопротивление i -фазы после интегрирования (5.61) и (5.62)

$$R_{\phi i} = \frac{2,5A_1^2 l_1^3}{b\gamma_H} \left[\frac{1}{(A_1 l_1 h_{\phi} + 1)^{2,5}} - 1 \right] + \frac{2,5A_2^2 l_2^3}{b\gamma_K} \left[\frac{1}{(A_2 l_2 h_{\phi} + 1)^{2,5}} - 1 \right]. \quad (5.67)$$

После соответствующих упрощений

$$R_{\phi i} \approx \frac{l}{\gamma_{cp} b h_{\phi}}.$$

5.3. Изменение сопротивления по длине электродов двухзонного нагревателя мелассы

x/h	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\Delta R_i / \Delta R_{cp}(x)$	1,13	0,95	0,84	0,77	0,77	0,79	0,86	0,94	1,03	1,12
$R_{\phi i} / R_{cp}(x)$		1,00			0,84				1,07	

Пример распределения сопротивления по длине электродов и фазам показан в таблице для случая нагрева мелассы от 20 до 60°C. Температурная характеристика имеет вид:

$$\gamma_t = 0,025 \exp 0,053 (t-20).$$

При изменении удельной проводимости от 0,025 до 2,0 См/м, т.е. в 8 раз, сопротивление по длине электродов изменяется не более, чем на 50 %, различие в сопротивлении фаз сети составляет не более 20 %.

5.5. Расчет камер электрохимической обработки

Электрохимическая обработка направлена на химическое изменение кормового материала и через это на повышение питательности корма. В большинстве случаев обработка невозможна без повышения температуры. Кроме того, достаточно сложно разделить энергозатраты на термическое и химическое действие тока.

Задача расчета состоит в определении геометрических размеров рабочей камеры, при которых через корм протекает необходимое по технологическим требованиям количество электричества. Параметры камеры, опреде-

ленные электрическим расчетом, должны соответствовать таким же параметрам механического расчета.

Исходными данными являются: показатели технологического процесса — изменение питательности, температуры и др.; физико-механические, электрические и теплофизические характеристики корма; параметры электрического поля — частота, напряженность, схема соединения и др.; конструктивное исполнение рабочей камеры.

Примем допущение, что в процесса обработки изменяется только температура и питательность, другие физические параметры корма и окружающей среды неизменны. Электрическая энергия расходуется на изменение питательности, энтальпии корма и окружающей среды. Затраты на термическую и химическую обработку учтем общим расходом тока на эти два процесса.

Уравнение кинетики процесса (1.50) запишем в виде

$$K_T \frac{dp}{dD_T} = p_y - p, \quad (5.70)$$

$$K_T \frac{dp}{p_y - p} = dD_T,$$

$$K_T \frac{dp}{p_y - p} = idt, \quad (5.71)$$

где i — ток, приходящийся на единицу массы корма, А/кг,

$$i = \frac{I}{m} = \frac{U\gamma(p)bL}{ml}, \quad (5.72)$$

где I — ток, потребляемый установкой, А; m — масса обрабатываемого корма, кг; U — напряжение на электродах, В; b , L — ширина и длина электрода, м; l — расстояние между электродами, м.

Запишем в (5.72) напряжение через напряженность электрического поля и расстояние l и подставим в (5.71):

$$K_T \frac{dp}{p_y - p} = \frac{bLE\gamma(p)}{m} dt, \quad (5.73)$$

где E — напряженность электрического поля в рабочей камере, В/м; $\gamma(p)$ — зависимость удельной проводимости от питательности корма, См/м.

Разделим переменные в (5.73):

$$\frac{dp}{(p_y - p)\gamma(p)} = \frac{bLE}{mK_T} dt. \quad (5.74)$$

Зависимость удельной проводимости $\gamma(p)$ от питательности корма или выхода белков при их коагуляции устанавливают экспериментальным путем. Например, для сока картофеля

$$\gamma_{pk} = \gamma_{pkH} (1 + a_1 p_k - a_2 p_k^2), \quad (5.75)$$

где $\gamma_{pkH} = 0,562$ См/м — наиболее вероятное значение начальной удельной проводимости; $a_1 = 0,13$, $a_2 = 0,26$ — коэффициенты, их размерность 1/о.е. p_k — выход белка в относительных единицах.

Применительно к электрохимической обработке зерна ячменя

$$\gamma_{p3} = 3,85 + 12 p_3 - 8 p_3^2. \quad (5.76)$$

Подставим (5.76) в (5.74):

$$\frac{dp_3}{(p_3 - p_{y3})(8p_3 - 12p_3 - 3,85)} = \frac{bLE}{mK_{T3}} dt. \quad (5.78)$$

Примем установившуюся переваримость p_y величиной постоянной, соответствующей максимальной переваримости корма при базовых технологиях обработки: зерна $p_{y3} = 0,75$, соломы $p_{yc} = 0,38$, выхода белка $p_{yk} = 0,97$.

После интегрирования левая часть (5.78) имеет вид:

$$\frac{1}{8p_{y3}^2 - 12p_{y3} + 3,85} \left[\ln \left| \frac{p_H - p_y}{p_H - p_3} \right| - \frac{1}{2} \ln \left| \frac{p_k^2 - 1,5p_k^2 + 0,481}{p_H^2 - 1,5p_H^2 + 0,481} \right| - \frac{0,75 + p_y}{0,285} \left(\arctg \frac{p_k - 0,75}{0,285} - \arctg \frac{p_H - 0,75}{0,285} \right) \right]. \quad (5.79)$$

Обозначим:

$$A = \frac{1}{8p_{y3}^2 - 12p_{y3} + 3,85}, \quad B = \ln \left| \frac{p_k - p_H}{p_H - p_y} \right|, \quad C = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{p_k^2 - 1,5p_k^2 + 0,481}{p_H^2 - 1,5p_H^2 + 0,481} \right|,$$

$$D = \arctg \frac{p_k - 0,75}{0,285}, \quad E = \arctg \frac{p_H - 0,75}{0,285}.$$

С учетом обозначений (5.79) примет вид:

$$A[B-C-10,5(D-E)]. \quad (5.80)$$

Длина электрода

$$L = \frac{mK_{\tau 3}}{EA[B-C-10,5(D-E)]b\tau}. \quad (5.81)$$

Межэлектродное расстояние l найдем из (5.71), заменив в (5.72) массу m на плотность кормосмеси ρ_c и объем электродной камеры $V=lbL$. Тогда:

$$l = \frac{EA[B-C-10,5(D-E)]\tau}{\rho_c K_{\tau 3}}. \quad (5.82)$$

Ширину электрода b принимают по конструктивным соображениям, либо рассчитывают по допустимой скорости движения кормосмеси в рабочей камере (5.36), либо подбирают по величине механического сопротивления рабочей камеры при известных l, L, P (раздел 5.3).

В последнем случае ширину (высоту) электрода можно рассчитать по формуле [46]:

$$l = 2f_{\text{ст}} \mu_1 (L + m + m_b) \left[\ln \left(\frac{P + q_{\text{оср}} / \mu_1}{q_{\text{оср}} / \mu_1} \right) - 2f_{\text{ст}} \mu_1 (L + m + m_b) \right], \quad (5.83)$$

где $f_{\text{ст}}, f_{\text{э}}$ — коэффициент трения кормосмеси по поверхности стенки рабочей камеры и электродов; μ_1 — коэффициент бокового давления; $q_{\text{оср}}$ — среднее значение остаточного бокового давления, Па; P — осевое давление, Па; $m = (0,1 \dots 0,12)L$ — толщина уплотняемой порции кормосмеси, м; $m_b = (1,5 \dots 2,0)l$ — расстояние от края электрода до выхода из рабочей камеры.

Длина электрода L в этом случае не должна превышать длину рабочей камеры L_p , полученную механическим расчетом. Ширину электрода находят совместным решением (5.82) и (5.83).

5.6. Расчет электрокоагуляторов белков

Методика разработана для расчета основных конструктивных параметров электрокоагуляторов, работающих по схеме обработки сока на рис. 5.8.

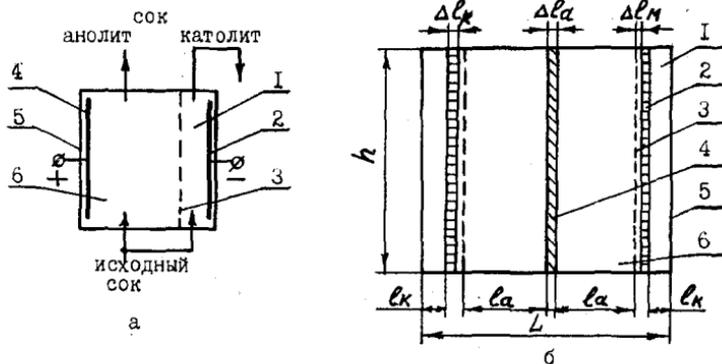


Рис. 5.8. Технологическая (а) и расчетная (б) схемы электрокоагулятора: 1 - катодное пространство; 2- перфорированные катоды; 3 - мембрана; 4 - анод; 5 - корпус; 6 - анодное пространство.

Основные расчетные параметры включают площадь, ширину и высоту, число электродов, межэлектродные расстояния в анодной и катодной зонах, число электродных камер, рабочие размеры электрокоагулятора, его мощность и рабочее напряжение. Численные значения параметров должны обеспечивать изменение рН сока согласно технологическим требованиям.

Уравнение баланса количества электричества электрокоагулятора

$$dQ_1 = dQ_2 + dQ_3, \quad (5.90)$$

где dQ_1 — количество электричества, подведенное к электрокоагулятору, Кл.; dQ_2 — количество электричества, затраченное на коагуляцию, Кл.; dQ_3 — потери электричества на нагревание установки и окружающей среды, Кл.

$$dQ_1 = It, \quad (5.91)$$

$$dQ_2 = D_{\gamma}(\text{pH}) m d\text{pH},$$

где I — ток электрокоагулятора, А; t — продолжительность процесса, с; D_{γ} — расход тока на коагуляцию, Кл/кг; m — масса сока, кг; $d\text{pH}$ — изменение водородного показателя.

Потери энергии в окружающую среду можно учесть коэффициентом потерь K , равным 1,05...1,10.

Ток электрокоагулятора

$$I = \gamma_{(\text{pH})} ES,$$

где E — напряженность электрического поля между анодом и катодом, В/м; $\gamma_{(pH)}$ — зависимость удельной электрической проводимости от pH сока, См/м; S — площадь электрода, м².

Применительно к соку картофеля зависимость удельной проводимости от водородного показателя имеет вид :

$$\gamma_{pH} = \gamma_{pH_H} (a_0 + a_1 pH - a_2 pH^2), \quad (5.93)$$

где $\gamma_{pH_H} = 0,56$ См/м — начальная удельная электрическая проводимость; $a_0 = 0,1$, $a_1 = 0,32$, $a_2 = 0,03$ — коэффициенты.

Зависимость расхода тока D_τ от pH для картофельного сока линейная:

$$D_\tau = b_0 - b_1 pH, \quad (5.94)$$

где $b_0 = 32,5 \cdot 10^3$ Кл/кг, $b_1 = 5 \cdot 10^3$ Кл/кг — коэффициенты.

Подставим (5.91)...(5.93) в (5.90):

$$ES\gamma_{pH_H} (a_0 + a_1 pH - a_2 pH^2) d\tau = Km(b_0 - b_1 pH) d pH. \quad (5.95)$$

Разделим переменные

$$\frac{ES\gamma_{pH_H}}{Km} d\tau = \frac{b_0 - b_1 pH}{a_0 + a_1 pH - a_2 pH^2} d pH. \quad (5.96)$$

Проинтегрировав (5.96) и подставив численные значения коэффициентов, найдем площадь электродов электрокоагулятора:

$$S = 8,7 \cdot 10^3 \frac{km_\tau}{\gamma_{pH_H} E} \left[\ln \frac{pH_k^2 - 11,4 pH_k - 3,5}{pH_H^2 - 11,4 pH_H - 3,5} + 0,15 \ln \frac{(pH_k - 11,1)(pH_H - 0,32)}{(pH_k - 0,32)(pH_H - 11,1)} \right],$$

где m_τ — подача сока в коагулятор, кг/с.

Согласно рекомендациям [11], гидравлическая нагрузка на электродную камеру не должна превышать величину, соответствующую массовой подаче $m_{\tau_1} = 0,2 \dots 0,3$ кг/с.

Количество электродных камер

$$N = m_\tau / m_{\tau_1}, \quad (5.98)$$

— анодов $n_a = N$ и катодов $n_k = Na/2$.

Количество камер анодных $Na = 2n_a$ и катодных $Nk = n_a$.

Площадь одного электрода $S_1 = S/n_a$.

Расстояние между катодом и анодом по условиям равномерности циркуляции сока и коагуляции белка

$$l = 0,04 \dots 0,05 \text{ м.}$$

Соотношение объемов анодной V_a и катодной V_k камер по условию максимального количества коагулируемого белка :

$$V_a / V_k = l_a / l_k = 3,5 \dots 4,5 .$$

Высота электрода

$$h = v \frac{S \rho}{m_{\tau} n_a} , \quad (5.99)$$

где $v = (4 \dots 6) 10^{-3}$ м/с — средняя скорость движения сока в межэлектродном пространстве.

Ширина электрода $b = S_1/h$.

Ширина анодной и катодной камер :

$$L_a = 2l_a + \Delta l_a, \quad L_k = l_k + 2\Delta l_k + 2\Delta l_m, \quad (5.100)$$

где $\Delta l_a, \Delta l_k, \Delta l_m$ — толщина электродов и мембран, м.

Ширина $L = L_k n_k + l_a n_a$ и высота $H = h$ рабочей камеры коагулятора.

Расчетное напряжение между анодом и катодом $U = El$,

где $E = 350 \dots 450$ В/м — напряженность электрического поля, рекомендуемая для коагуляторов белков сока картофеля.

Расчетная мощность электрокоагулятора

$$P_p = \frac{U^2 \gamma_{cp} S}{l} , \quad (5.101)$$

где γ_{cp} — средняя удельная проводимость картофельного сока в диапазоне изменения рН.

Расчетная мощность электрокоагулятора зависит от его производительности и составляет примерно 15 кВт при обработке одной тонны сока картофеля за час.

6. ЭНЕРГОЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЙ

6.1. Методика и критерии сравнительной эффективности

Основные принципы методического характера, положенные в основу расчета энергоэкономической эффективности применения различных технологий повышения питательной ценности соломы и фуражного зерна, состоят в следующем [78, 85].

Критерием сравнительной эффективности капиталовложений на повышение питательной ценности кормов приняты минимальные суммарные дисконтированные затраты. Этот показатель широко используют в зарубежной практике, он основан на использовании не нормативного коэффициента эффективности капиталовложений, как это делалось ранее и во многих случаях механически дублируется и сегодня в практике проведения подобных расчетов, а на применении банковской процентной ставки, соответствующей вкладам по долгосрочным депозитам. Другим принципиальным моментом применения обозначенного критерия является оценка эффективности сравниваемых технологий за расчетный срок, обычно принимаемого равным сроку службы основного технологического оборудования. Напомним, что при использовании критерия ежегодных приведенных затрат расчеты, в случаях, подобных рассматриваемому, обычно выполняют для одного года, поскольку практическое освоение сравниваемых технологий вполне возможно в течение года, и учет омертвления инвестиций отпадает.

В общем виде суммарные дисконтированные затраты рассчитывают из выражения

$$Z_i = \sum_{t=1}^T (K_t + I_t - L_t)(1 + E)^{-t}, \quad (6.1)$$

либо

$$Z_i = \sum_{t=1}^T K_t(1 + E)^{-t} + (I_i - I_a)\alpha_T - L(1 + E)^{-T} \quad (6.2)$$

где K_t — капиталовложения в t -м году по данной технологии обработки кормов; I_t — издержки производства в t -м году за вычетом амортизационных отчислений; I_i — суммарные издержки производства в разрезе года по данной технологии обработки кормов; I_a — амортизационные отчисления; E — банковская процентная ставка (норма дисконтирования), принимаемая в расчетах, равной 0,1. Эта величина хорошо согласуется с рекомендациями внешнеэкономбанка республики и является как бы ее нижним пределом; L — ликвидационная стоимость оборудования; T — расчетный срок, принимаемый в расчетах равным сроку службы оборудования кормоцеха; t — рассматриваемый год осуществления затрат; α_T — коэффициент приведения к началу расчетного периода.

Коэффициент приведения к началу расчетного периода рассчитан по формуле

$$\alpha_T = \frac{(1 + E)^T - 1}{E(1 + E)^T} \quad (6.3)$$

Капиталовложения на реализацию рассматриваемых технологий повышения питательной ценности кормов включают всю цепочку инвестиций, связанную с реализацией процедуры обработки кормов и подводом энергии, а именно:

- источники теплоты;
- тепловые сети;
- системы пароснабжения и горячего водоснабжения;
- электрические сети;
- технологическое оборудование;
- стоимость понижающего трансформатора в технологиях, основанных на преимущественном использовании электроэнергии;
- строительная часть здания кормоцеха, относящаяся к линии обработки соломы или зерна.

Эксплуатационные издержки по технологиям обработки кормов включают следующие элементы затрат денежных средств:

- топливо (пар, горячая вода);
- электроэнергия (силовые и технологические нужды);
- источники теплоты (амортизация, текущий ремонт и техническое обслуживание, капитальный ремонт, заработная плата операторов, прочие расходы). Для исчисления этих показателей предварительно в общих капиталовложениях выделены и сгруппированы составляющие, имеющие равные нормативы амортизационных отчислений (здание, энергетическое оборудование);

- технологическое оборудование (амортизация, текущий и капитальный ремонт, техническое обслуживание);
- заработная плата работников кормоцеха;
- тепловые сети;
- паропровод, сети горячего водоснабжения;
- здание кормоцеха, относящееся непосредственно к обработке корма (амортизация и текущий ремонт);
- стоимость биологических препаратов, дрожжей (в варианте ферментативно-дрожжевой обработки соломы);
- стоимость приготовления раствора из карбамида и поваренной соли (при электрогидротермической обработке);
- стоимость дополнительного зернофуража или соломы, необходимых для приведения вариантов повышения питательной ценности кормов к тождественному эффекту.

Энергетические затраты по технологиям обработки соломы включают расходы оперативной и овеществленной энергии. При этом последние учитывают расходы энергии на производство кальцинированной соды, дрожжей, потребляемые в каждом технологическом цикле. В целом же совокупные энергетические затраты включают:

- расход топлива в хозяйстве на получение пара, горячей воды;
- расход топлива на энергетических станциях Белорусской энергосистемы для выработки, передачи, распределения и потребления электроэнергии;
- расход топлива на производство кальцинированной соды и дрожжей, биологических препаратов, отличающихся высокой энергоемкостью производства;
- расход топлива транспортными средствами на заготовку и доставку корма до места его обработки.

Интегральный эффект за расчетный срок рассчитывают как разность дисконтированных затрат:

$$\mathcal{E}_n = Z_6 - Z_3, \quad (6.4)$$

где \mathcal{E}_n — интегральный эффект за расчетный период; Z_6, Z_3 — дисконтированные затраты соответственно по варианту, принятому за базисный, и варианту электрической обработки.

Инвестиционный доход рассчитывают по формуле

$$D_t = (I_6 - I_3) + (A_3 - A_6) + \Delta H, \quad (6.5)$$

где D_t — инвестиционный доход в t -м году; $I = I_6 - I_3$ — изменение издержек амортизационных отчислений; $A = A_3 - A_6$ — изменение амортизационных отчислений; ΔH — изменение налогов.

Изменение налогов рассчитано из выражения

$$\Delta N_{\text{ндс}} = C_{\text{ндс}} (\Delta \text{ЗП} + \Delta \text{О} + \Delta \text{А} + \Delta \text{И}), \quad (6.6)$$

где $\Delta N_{\text{ндс}}$ — изменение налога на добавленную стоимость; $C_{\text{ндс}}$ — ставка налога на добавленную стоимость, принимаемая в расчетах равной 10%; $\Delta \text{ЗП}$ — изменение заработной платы; $\Delta \text{О}$ — изменение отчислений на социальные нужды; $\Delta \text{А}$ — изменение амортизационных отчислений; $\Delta \text{И}$ — изменение издержек производства.

Расчет коэффициента возврата капиталовложений произведен по формуле:

$$P_{\text{в}} = \frac{D_t}{K_{\text{э}}} - E, \quad (6.7)$$

где $P_{\text{в}}$ — коэффициент возврата капиталовложений; $K_{\text{э}}$ — капиталовложения на проект реализации электрообработки корма.

Срок возврата капитала определен из выражения

$$T = \frac{\lg(1 + E/P_{\text{в}})}{\lg(1 + E)}. \quad (6.8)$$

6.2. Условие сопоставимости проектных решений

Сопоставимость проектов обработки кормов при проведении энерго-экономических расчетов выдержана в двух важнейших направлениях, обеспечивших получение аргументированных заключений.

Прежде всего, это касается тождества технологического эффекта. Необходимость соблюдения этого важного принципа сопоставимости проектных вариантов возникает в связи с тем, что в силу особенностей сравниваемых технологий конечная питательная ценность обрабатываемых кормов оказывается различной. Естественно, различная питательная ценность кормов логически приводит и к различной продуктивности животных, поедающих обработанные корма в составе рационов. Поэтому для устранения этого недостатка в технико-экономических расчетах приведение к сопоставимости рассматриваемых проектов произведено путем добавления необходимого объема соломы или фуражного зерна в технологии, обеспечивающие более низкую питательную ценность по сравнению с наилучшей в этом плане. Основой расчета дополнительного объема соломы или зерна служит их питательная ценность, выраженная в кормовых единицах. Конечно же, такой метод обеспечения тождества технологического эффекта является вынужденным и чисто условным, к тому же весьма спорным. Однако проведение практическо-

го опыта по откорму животных рационами, в состав которых включены солома либо фуражное зерно, обработанные различными технологиями, для выявления реальной продуктивности откармливаемого поголовья сегодня нереально из-за сложности. Учитывая это, тождество вариантов обеспечено вышеуказанным методом.

Другой важный момент — сопоставимость экономических показателей в современных условиях. Это требование выполнено путем использования экономических показателей для одного временного среза. Например, оптовые цены на топливо и тарифы на электроэнергию, стоимость дополнительно необходимой соломы и фуражного зерна, кальцинированной соды, дрожжей, карбамида и прочих материальных затрат приняты по текущим ценам по состоянию на начало февраля 1996 года. Капиталовложения на технологическое оборудование и источники энергии пересчитаны путем применения соответствующих индексов пересчета. Источниками получения информации явились данные топливных баз, Белорусская энергосистема, колхоз Ульянова Минского района и официально опубликованные и применяемые при переоценке основных фондов на предприятиях индексы роста цен на оборудование, дифференцированные по отраслям народного хозяйства.

6.3. Производственно-технологические показатели

Расчеты выполнены на примере молочно-товарной фермы на 800 голов. При этом предполагается, что ежедневно в состав рациона коров включают до 5 кг обработанной соломы.

При оценке эффективности технологий обработки фуражного зерна годовая производственная программа предусматривает обработку 1067.5 т зерна, что соответствует скармливанию 3 кг обработанного фуражного зерна в день.

Всего рассмотрено семь технологий повышения питательной ценности соломы, шесть из них в различной степени опробованы в опытном хозяйстве Тимирязевской академии (Россия), и шесть технологий обработки фуражного зерна.

Данные практических опытов позволяют остановиться на следующих показателях питательности обработанной соломы (табл. 6.1).

Питательная ценность фуражного зерна, обработанного электрогидротермическим способом, принята в соответствии с данными проведенных опытов и составила 1.16 корм. ед. Аналогичный показатель по пропаренному и дробленому фуражному зерну - 1.03 корм. ед.

6.4. Особенности исследуемых технологий

Рассматриваемые технологии имеют существенные различия по характеру воздействия на обрабатываемый материал и получаемому конечному результату [73...86].

Сущность ферментативно-дрожжевого способа обработки соломы состоит в частичном ферментативном гидролизе сложных полисахаридов целлюлозы, гемицеллюлозы, пектиновых веществ, простых легкорастворимых и легкоусвояемых форм с последующим выращиванием на сахарах гидролизата и соломы дрожжей. В результате содержание протеина в корме увеличивается в два-три раза. Деструкция полисахаридов соломы при данном способе осуществляется с помощью ферментов, обладающих гидролизной активностью в отношении полисахаридов. Энзиматические процессы протекают при небольших температурах, отсутствует необходимость в высоком давлении пара или вакууме. При этом существенно снижается потребность в энергоносителях, и, следовательно, способ можно по праву отнести к разряду энергосберегающих.

Гидробаротермический способ относится к чисто энергетическим технологиям, когда воздействие на солому осуществляется исключительно за счет высокого давления и температуры. При гидробаротермическом способе обработки соломы частичный гидролиз и расщепление лигнополисахаридного комплекса достигается энергетическим путем. Для этого используют пар с температурой 160 °С и давлением порядка 0.6 МПа. Длительность обработки соломы паром достигает 2.0...2.5 ч, его расход в расчете на 1 тонну - 0.3...1.2 т. Эта технология может быть справедливо отнесена к разряду энергоемких и капиталоемких в экономическом отношении.

К чисто энергетическим технологиям можно отнести радиационный способ обработки соломы. Она основана на применении различного радиационного оборудования. В частности, в условиях сельского хозяйства наиболее целесообразно с практической точки зрения использовать ускорители типа ИЛУ-6.

Термохимическая обработка соломы обеспечивает повышение ее перерабатываемости за счет частичного разрушения и ослабления связей между частицами гемицеллюлозного комплекса и в результате подщелачивания, которое благоприятно влияет на жизнедеятельность целлюлозоразлагающих бактерий рубца жвачных животных. Снижение энергоемкости процесса по сравнению с гидробаротермическим способом обработки соломы достигается применением химических реагентов. Пар при этом используют для ускорения химической реакции.

Доступность структурных углеводов соломы при электротермохимическом способе обработки повышается благодаря воздействию комплекса

факторов: химического, теплового и электрического. В итоге увеличивается скорость протекания химических реакций и углубляется процесс гидролиза полисахаридов по сравнению с термохимическим способом обработки. Последнее аргументируется наличием сахара в соломе, подвергнутой электро-термохимической обработке.

6.1. Питательность соломы при различных способах обработки

Наименование технологии	Питательная ценность 1 кг соломы при 15% влажности, корм. ед.	Содержание перевариваемого протеина, грамм
Гидробаротермическая обработка соломы (ГБТО)	0.50	15.0
Термохимическая обработка соломы:		
- в смесителях С-12 по типовому проекту 801-461	0.36	15.0
- в стационарной камере обработки соломы КОС-3 (ЦНИИМЭСХ)	0.36	15.0
- во вращающейся емкости (ЕТОС-15)	0.38	14.8
Ферментативно-дрожжевая обработка соломы (ФДОС)	1.80	48.0
Радиационная обработка соломы ускорителями электронов ИЛУ-6 (ЦНИИМЭСХ)	0.59	15.0
Электротермохимическая обработка соломы (БАТУ)	0.40	14.9

Таким образом, практически во всех технологиях повышение питательной ценности соломы достигают путем гидролиза структурных углеводов, разрыва связей между лигнином и клетчаткой, а при ферментативно-дрожжевом способе — дополнительно биологической конверсией растительных полисахаридов в протеин. Эти особенности и следует учитывать при оценке энергоэкономической эффективности технологий повышения питательной ценности соломы.

Существенные различия в характере воздействия и конечных результатах имеются и в рассматриваемых технологиях обработки фуражного зерна.

Если для дробления характерно простое механическое воздействие на обрабатываемый материал, то для экструзии к механическому воздействию добавляется еще и тепловое, возникающее в результате применяемого высокого давления и получаемого в итоге механического трения материала. Процесс микронизации фуражного зерна происходит путем воздействия на него мощного теплового потока инфракрасного облучения. В результате высокой температуры под действием инфракрасных лучей фуражное зерно взрывается (лопается), резко снижается его влажность, оно становится как бы воздушным. Рассматриваемая технология предъявляет жесткие требования к исходной влажности зерна. Оно должно иметь влажность в пределах 12-14% и быть жизнеспособным. Известно, что зерно, подвергнутое высокотемпературной сушке (например, в сушилках типа АВМ), не поддается эффекту взрыва. К важным конечным результатам следует отнести существенное (в 600-800 раз) снижение гнилостных бактерий и плесневых грибов.

Как и в случае с обработкой соломы, суть электрогидротермической обработки фуражного зерна состоит в комплексном воздействии различных факторов на обрабатываемое зерно, в результате чего резко растет доступность питательных веществ. Практический итог такой обработки состоит в увеличении продуктивности животных, что и требует соответствующего учета при проведении расчетов по выявлению экономической эффективности различных способов обработки фуражного зерна.

6.5. Результаты энергоэкономического сравнения

Для выявления экономической эффективности применения исследуемых технологий, оценки целесообразности применения различных энергоносителей при обработке соломы и фуражного зерна с целью повышения их питательной ценности нами рассмотрены два варианта энергоносителей, наиболее часто применяемых в сельскохозяйственном производстве для работы традиционных огневых котельных — печное бытовое топливо и каменный уголь. На момент выполнения настоящих расчетов стоимость печного бытового топлива составила — 1862.2 тыс.руб/т, а каменного угля — 1072.5 тыс.руб./т. Тариф на электроэнергию для сельскохозяйственного производства составил 403 руб/кВт·ч. Удельный расход топлива на выработку 1 кВт·ч принят равным 300 г.у.т., а с учетом потерь электроэнергии в сетях всех уровней напряжения — 320 г.у.т. Среднегодовой эксплуатационный КПД огневых котельных равен: при использовании печного бытового топлива — 70%, а в случае применения угля — 55%. Потери тепловой энергии в наружных тепловых сетях определены в размере 12.5%. Потери топлива при транспорте и хранении: 5% — при использовании жидкого топлива; 15% — при

применении твердого топлива. Стоимость тепловой энергии, отпущенной от огневой котельной, определена с учетом расхода электроэнергии на нужды котельной. Из практики известно, что в условиях сельской местности отпуск 4.19 ГДж тепловой энергии требует около 10 кВт · ч электроэнергии.

Стоимость дополнительно требуемого фуражного зерна принята равной 1532 руб. за 1 кг, а соломы — 50 руб. за 1 кг.

Среднемесячная заработная плата операторов котельных и работников кормоцеха принята равной 710 тыс. руб.

Все нормативные экономические показатели приняты в соответствии с действующими в настоящее время законодательными актами, инструкциями, документами и материалами.

Итоги выполненных расчетов приведены в таблицах 6.2...6.7. Из представленных материалов видно, что в настоящее время с экономической точки зрения наиболее выгодной является электротермохимическая технология обработки соломы. Такое стало возможным благодаря существенному снижению удельных расходов электроэнергии на обработку 1 тонны соломы. Следует заметить, что такой вывод получился в условиях, когда тариф на электроэнергию в сельском хозяйстве существенно вырос и превысил себестоимость производства электроэнергии в энергосистеме, т.е. продажа электроэнергии селу стала рентабельной. Как видно из расчетов, суммарные дисконтированные затраты по ЭТХО соломы на 10-16% ниже, чем наиболее экономичный вариант термохимической обработки с применением КОС-3.

Единственной конкурирующей технологией следует считать обработку соломы с применением КОС-3. Она требует меньших капиталовложений для своей реализации. Поэтому для выявления сравнительной эффективности ЭТХО соломы нами рассмотрен ряд других показателей эффективности, используемых в рыночной экономике. Они представлены в таблице 6.4.

Расчеты показывают, что аналогичные выводы могут быть получены и при применении в качестве критерия эффективности капиталовложений приведенных затрат, отражающих народнохозяйственную эффективность рассматриваемых технологий. Это наглядно видно из таблицы 6.5.

Примечание: радиационная технология рассчитана для обработки соответственно 18; 9.0; 0.8 тыс.т.

6.2. Энергоэкономическая эффективность технологий повышения питательной ценности соломы на примере МТФ-800

(вид энергоносителя огневой котельной — печное бытовое топливо)

Наименование показателей	Технология повышения питательной ценности соломы								
	ГБТО	ТП1801-461	КОС-3	ЕТОС-15	ЭТХО	ФДО С	Радиационная обработка		
1. Установленная мощность, кВт	54.30	97.00	93.40	71.00	221.80	45.40	221.20	221.20	221.20
2. Годовой расход ресурсов:									
- топлива, ГДж	3540	2950	1002	2343	—	514	—	—	—
- топливо на тепловые процессы, т.т.	213.51	177.93	60.45	141.33	—	18.97	—	—	—
т.т.	155.84	129.87	44.13	103.16	—	13.84	—	—	—
- топливо на заготовку соломы, т.т.	3.68	7.50	6.78	6.78	6.14	—	49.20	24.60	2.18
т.т.	2.52	5.15	4.65	4.65	4.20	—	33.70	16.90	1.50
- электроэнергия, тыс. кВт·ч	9.73	47.43	73.01	56.15	219.71	34.58	1517.40	758.7	67.40
т.т.	3.11	15.18	23.36	17.97	70.31	11.06	485.57	242.8	21.60
в том числе производство:									
а) кальцинированной соды, тыс. кВт·ч	—	10.88	10.31	10.31	9.79	—	—	—	—
т.т.	—	3.48	3.30	3.30	3.13	—	—	—	—
б) дрожжей и ферментов, тыс. кВт·ч	—	—	—	—	—	15.67	—	—	—
т.т.	—	—	—	—	—	5.01	—	—	—
- топлива на производство: кальцинированной соды, т.т. ферментов	—	—	—	—	—	—	—	—	—
т.т.	—	5.26	4.98	4.74	—	—	—	—	—
т.т.	—	—	—	—	3.56	—	—	—	—
3. Суммарный расход энергоносителей, т.т / год	220.30	205.86	95.58	171.06	81.19	30.03	534.76	267.38	23.75
4. Капиталовложения, млн. руб									
в том числе:									
- источники теплоты	926.15	205.45	123.13	140.48	—	236.30	—	—	—
- тепловые сети	126.49	40.63	30.47	41.49	—	72.54	—	—	—
- технологическое оборудование	813.70	227.12	145.29	161.03	187.43	281.67	2244.90	2244.90	2244.90
- строительную часть кормоцеха	1126.8	112.68	75.12	106.42	75.12	112.68	65.10	65.10	65.10
- паропровод	4.31	2.20	2.20	4.31	—	2.20	—	—	—
- горячее водоснабжение	—	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	—	—	—
- электрические сети	5.88	22.04	37.81	27.54	213.09	11.02	914.83	457.10	40.69
Итого:	3003.33	611.68	415.60	482.84	477.20	717.98	3224.9	2767.15	2350.74

Продолжение таблицы 6.2.

Наименование показателей	Технология повышения питательной ценности соломы									
	ГБТО	ТП801-461	КОС-3	ЕГОС-15	ЭТХО	ФДОС	Радиационная обработка			
Эксплуатационные издержки, млн. руб										
в том числе:										
- источники теплоты	46.60	21.84	18.02	16.88	—	50.48	—	—	—	
- тепловые сети	7.08	2.28	1.71	2.32	—	4.06	—	—	—	
- технологическое оборудование	183.58	69.24	40.53	51.05	46.80	83.75	418.92	385.70	347.76	
- строительная часть кормоцеха	22.54	2.25	1.50	2.13	1.50	2.25	1.30	1.30	1.30	
- паропровод	0.36	0.19	0.19	0.36	—	0.19	—	—	—	
- горячее водоснабжение	—	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	—	—	—	
- электроэнергия	3.92	14.73	25.27	18.47	34.60	7.62	611.51	305.76	27.16	
- топливо	290.22	241.85	82.17	192.10	—	25.78	—	—	—	
- дрожжи, кальцинированная сода	—	85.35	80.85	80.85	76.80	121.20	—	—	—	
- дополнительная солома	29.75	60.62	54.78	54.78	49.58	—	397.08	198.54	17.65	
Итого:	600.40	513.61	307.34	427.41	260.53	307.92	1523.60	938.66	398.06	
из них										
- амортизация	178.12	46.29	29.69	33.68	32.28	57.46	375.69	375.69	375.69	
- заработная плата	22.78	23.93	10.63	15.59	1.11	38.63	94.78	47.39	4.19	
- отчисления на социальные нужды	6.84	7.18	3.19	4.68	0.33	11.64	28.43	14.22	1.26	
Ликвидационная стоимость	169.53	34.53	23.46	27.26	26.94	40.53	182.04	156.18	132.69	
Суммарные дисконтированные затраты за расчетный срок, млн. руб.	4672.94	2612.43	1601.41	2170.40	1444.38	1768.27	8042.29	5062.84	2315.50	

6.3. Энергоэкономическая эффективность технологий повышения питательной ценности соломы на примере МТФ-800

(вид энергоносителя — огневой котельной — каменный уголь)

Наименование показателей	Технологии повышения питательной ценности соломы								
	ГБТО	ТП801-461	КОС-3	ЕГОС-15	ЭТХО	ФДОС	Радиационная обработка		
1. Установленная мощность, кВт	54.30	97.00	93.40	71.00	221.80	45.40	221.20	221.20	221.20
2. Годовой расход ресурсов:									
- теплота, ГДж	3540	2950	1002	2343	—	314	—	—	—
- топливо на тепловые процессы, т.т.	322.69	268.91	91.37	213.60	—	18.97	—	—	—
т.т.	351.13	292.61	99.42	232.42	—	13.84	—	—	—
- топливо на заготовку соломы, т.т.	3.68	7.50	6.78	6.78	6.14	—	49.20	24.60	2.18
т.т.	2.52	5.15	4.65	4.65	4.20	—	33.70	16.90	1.50
- электроэнергия, тыс. кВт·ч	9.73	47.43	73.01	56.15	219.71	34.58	1517.40	758.7	67.40
т.т.	3.11	15.18	23.36	17.97	70.31	11.06	485.57	242.8	21.60
в том числе производство:									
а) кальцинированной соды, тыс. кВт·ч	—	10.88	10.31	10.31	9.79	—	—	—	—
т.т.	—	3.48	3.30	3.30	3.13	—	—	—	—
б) дрожжей и ферментов, тыс. кВт·ч	—	—	—	—	—	15.67	—	—	—
т.т.	—	—	—	—	—	5.01	—	—	—
- топлива на производство: кальцинированной соды, т.т.	—	5.26	4.98	4.74	—	—	—	—	—
т.т. ферментов	—	—	—	—	3.56	—	—	—	—
3. Суммарный расход энергоносителей, т.т / год	329.48	296.86	126.59	243.33	81.19	30.03	534.76	267.38	23.75
4. Капиталовложения, млн. руб., в том числе:									
- источники теплоты	1066.91	231.61	138.37	159.45	—	391.64	—	—	—
- тепловые сети	126.49	40.63	30.47	41.49	—	72.54	—	—	—
- технологическое оборудование	813.70	227.12	145.29	161.03	187.43	281.67	2244.90	2244.90	2244.90
- строительную часть кормоцеха	1126.8	112.68	75.12	106.42	75.12	112.68	65.10	65.10	65.10
- паропровод	4.31	2.20	2.20	4.31	—	2.20	—	—	—
- горячее водоснабжение	—	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	—	—	—
- электрические сети	5.88	22.04	37.81	27.54	213.09	11.02	914.83	457.10	40.69
Итого:	3144.10	637.84	430.84	501.82	477.20	873.31	3224.9	2767.15	2350.74

Продолжение таблицы 6.3.

Наименование показателей	Технология повышения питательной ценности соломы									
	ГБТО	ТП801-461	КОС-3	ЕГОС-15	ЭТХО	ФДОС	Радиационная обработка			
5. Эксплуатационные издержки, млн. руб., в том числе:										
- источники теплоты	58.06	23.09	20.08	23.29	—	61.18	—	—	—	—
- тепловые сети	7.08	2.28	1.71	2.32	—	4.06	—	—	—	—
- технологическое оборудование	183.58	69.24	40.53	51.05	46.80	83.75	418.92	385.70	347.76	
- строительная часть кормоцеха	22.54	2.25	1.50	2.13	1.50	2.25	1.30	1.30	1.30	
- паропровод	0.36	0.19	0.19	0.36	—	0.19	—	—	—	
- горячее водоснабжение	—	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	—	—	—	
- электроэнергия	3.92	14.73	25.27	18.47	34.60	7.62	611.51	305.76	27.16	
- топливо	376.59	313.83	106.63	249.28	—	33.46	—	—	—	
- дрожжи, кальцинированная сода	—	85.35	80.85	80.85	76.80	121.20	—	—	—	
- дополнительная солома	29.75	60.62	54.78	54.78	49.58	—	397.08	198.54	17.65	
Итого:	698.23	586.84	333.66	430.99	260.53	326.29	1523.60	938.66	398.06	
из них:										
- амортизация	181.68	46.95	30.07	34.16	32.28	61.39	375.69	375.69	375.69	
- заработная плата	22.78	24.07	11.57	19.22	1.11	41.76	94.78	47.39	4.19	
- отчисления на социальн. нужды	6.84	7.22	3.47	5.77	0.33	12.53	28.43	14.22	1.26	
6. Ликвидационная стоимость	177.48	36.00	24.32	28.33	26.94	49.30	182.04	156.18	132.69	
Суммарные дисконтированные затраты за расчетный срок, млн. руб.	5216.32	2953.16	1729.60	2463.15	1444.38	1977.75	8042.29	5062.84	2315.50	

6.4. Сравнительная экономическая оценка ЭТХО и КОС-3

Наименование показателей	Вид применяемого энергоносителя	
	ПБТ	Уголь
1. Интегральный эффект за расчетный период, млн.руб.	157.03	285.22
2. Инвестиционный доход, млн.руб.	53.10	81.51
3. Коэффициент возврата капитала	0.0113	0.0708
4. Срок возврата капиталовложений, лет	24.02	9.24
5. Срок окупаемости капиталовложений, лет	8.98	5.85

6.5. Приведенные затраты по технологиям обработки соломы, тыс. руб./т

Наименование технологии	Вид применяемого энергоносителя	
	ПБТ	Уголь
1. Гидробаротермическая обработка (ГБТО)	960.797	1075.518
2. Термохимическая обработка соломы:		
- в сместители С-12 (тип. пр. 801-461)	587.00	663.38
- стационарная камера КОС-3	357.22	385.56
- вращающаяся емкость (ЕТОС-15)	485.35	551.21
3. Ферментативно-дрожжевая обработка	394.08	431.09
4. Радиационная обработка	680.15	680.15
5. Электротермохимическая обработка	315.80	317.80

Таким образом, при сложившихся соотношениях оптовых цен на печное бытовое топливо, каменный уголь, с одной стороны, и тарифах на электроэнергию, с другой — экономически целесообразным является применение хозяйствами электротермохимического способа обработки соломы.

Применение электротехнологии при обработке фуражного зерна эффективно лишь в одном из рассмотренных случаев, а именно при использовании ЭГТО. Об этом свидетельствуют результаты расчетов в таблице 6.6. Суммарные дисконтированные затраты за расчетный срок по ЭГТО оказываются меньше, чем при гидротермической обработке зерна в 2.47...2.61 раза, микронизации — в 2.31 раза, экструзии — в 2.74 раза. ЭГТО фуражного зерна экономически выгоднее даже широко распространенного в хозяйствах республики простого дробления. Здесь разница рассматриваемого показателя составляет 2 раза. При этом следует отметить, что в расчетах принята удельная норма расхода электроэнергии при ЭГТО, равная 112 кВт·ч/т. В то же время известно, эта величина может быть снижена до 100 кВт·ч/т, что, естественно, увеличит разрыв эффективности рассматриваемых технологий в пользу ЭГТО.

Предпочтительность ЭГТО фуражного зерна может быть подтверждена и путем анализа других экономических показателей, представленных в таблице 6.7. Отметим, что использование в расчетах эффективности инвестиций народнохозяйственного критерия не меняет окончательного вывода.

Наконец, важным выводом, вытекающим из проведенных расчетов, является выгода первоочередного использования в хозяйствах республики ЭГТО фуражного зерна по сравнению с ЭТХО соломы. Это можно объяснить значительно меньшей величиной срока окупаемости дополнительных капиталовложений первой (1.02 против 5.85-8.98 годов). В современных условиях этот фактор является чрезвычайно важным во всех отношениях.

6.6. Эффективность технологий повышения питательной ценности зерна

Наименование показателей	Технология повышения питательной ценности					
	Дробление	Гидротермическая		Микро-низация	Экст-рузия	ЭГТО
		жидкое	твердое			
1. Установленная мощность, кВт	36.00	38.25	38.25	180.00	120.05	72.55
2. Годовой расход теплоты, ГДж	—	289	289	—	—	—
3. Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т	20.70	12.00	12.00	135.00	209.00	112.00
4. Годовой расход топлива						
- тепловые процессы, т.т.	—	16.92	22.73	—	—	—
- транспорт, т.т.	1.03	1.03	1.03	0.77	0.77	—
электроэнергии, кВт·ч	0.71	0.71	0.71	0.53	0.53	—
Итого:	24.88	14.42	14.42	157.70	244.15	119.56
5. Суммарный расход энергоносителей, т.т./год	8.38	22.85	28.66	86.12	83.74	40.63
6. Капиталовложения, млн. руб.:						
- источники теплоты	—	49.92	47.82	—	—	—
- тепловые сети	—	6.71	6.71	—	—	—
- технологическое оборудование	61.02	136.02	136.02	174.84	240.23	187.99
Итого:	61.2	192.66	190.55	174.84	240.23	187.99
7. Эксплуатационные издержки, млн. руб., в том числе:						
- источники теплоты	—	8.28	15.18	—	—	—
- тепловые сети	—	0.38	0.38	—	—	—
- технологическое оборудование:	13.04	25.68	24.68	40.26	50.63	41.90
в т.ч.: заработная плата на обслужи- вание оборудования	2.86	1.94	1.94	11.06	10.51	10.51
- электроэнергия	10.03	5.81	5.81	63.56	98.39	48.18
- топливо	—	21.62	31.69	—	—	—
- карбамид	—	—	—	—	—	15.1
- дополнительное зерно	206.35	206.35	206.35	154.26	154.26	—
Итого:	229.42	267.09	284.07	258.07	303.28	105.21
- из них амортизация	10.19	24.34	24.28	29.19	40.12	31.39
8. Ликвидационная стоимость, млн. руб.	1.72	5.44	5.38	4.93	6.78	5.30
9. Суммарные дисконтированные затраты за расчетный срок, млн. руб.	1014.11	1244.47	1316.60	1166.71	1379.60	504.16

6.7. Сравнительная экономическая оценка ЭГТО и обработки зерна дроблением

Наименование показателей	ЭГТО
1. Интегральный эффект за расчетный период, млн. руб.	124.21
2. Инвестиционный доход, млн. руб.	145.42
3. Коэффициент возврата капитала	0.67
4. Срок возврата капиталовложений, лет	1.45
5. Срок окупаемости дополнительных капиталовложений, лет	1.02

П Р И Л О Ж Е Н И Я

П 1. Технические параметры двухступенчатых цилиндрических соосных мотор-редукторов типа МЦ2С

Типоразмер мотор-редуктора	Частота вращения выходного вала, мин ⁻¹	Момент на выходном валу, Н·м	Масса мотор- редуктора, кг	Электродвигатель		
				Тип	Мощность, кВт	Частота вращения, мин ⁻¹
МЦ2С-63	35,5	133,4	35	4А71В6Р3	0,55	920
	45	106,9	35	4А71В6Р3	0,55	920
	56	118,7	37	4А80А6Р3	0,75	920
	71	100,1	35	4А71В4Р3	0,75	1370
	90	114,8	37	4А80А4Р3	1,1	1400
	112	130,5	40	4А80В4Р3	1,5	1400
	140	98,1	40	4А80В4Р3	1,5	1400
	180	112,8	40	4А80В2Р3	2,2	2850
МЦ2С-80	28	243,3	55	4А90LА8Р3	0,75	700
	35,5	265,9	50	4А80В6Р3	1,1	920
	45	214,8	50	4А80В6Р3	1,1	920
	56	241,3	50	4А80В4Р3	1,5	1400
	71	276,6	55	4А90L4Р3	2,2	1420
	90	229,6	55	4А90L4Р3	2,2	1420
	112	245,3	63	4А100S4Р3	3,0	1420
	140	261,9	70	4А100L4Р3	4,0	1420
180	202,1	70	4А100L4Р3	4,0	1420	
МЦ2С-125	28		140	4А112МВ8Р3	3,0	700
	35,5		140	4А112МВ6Р3	4,0	950
	45		140	4А112МВ6Р3	4,0	950
	56		140	4А112М4Р3	5,5	1450
	71		160	4А132S4Р3	7,5	1450
	90		175	4А132М4Р3	11,0	1450
	112		175	4А132М4Р3	11,0	1450
	140		215	4А160S4Р3	15,0	1460
180		235	4А160М4Р3	18,5	1460	

П 2. Технические параметры червячных цилиндрических редукторов общего назначения РЦУ

Межосевое расстояние редуктора	Передаточное число редуктора	Частота вращения, $n_1 = 1500$	
		Мощность на валу червяка, кВт	Момент на валу червяка, Нм
63	10	1,60	91,2
	12,5	1,35	93,2
	16,0	1,15	96,1
	20,0	0,90	92,2
	25,0	0,75	93,2
	31,5	0,70	98,1
80	10	3,20	181,5
	12,5	2,60	184,4
	16,0	2,20	187,4
	20,0	1,75	185,4
	25,0	1,45	188,4
	31,5	1,25	188,4

П 3. Технические параметры цилиндрических одноступенчатых мотор-редукторов типа МЦ

Типо-размер мотор-редуктора	Частота вращения выходного вала, мин^{-1}	Момент на выходном валу, Н·м	Масса мотор-редуктора, кг	Электродвигатель		
				Тип	Мощность, кВт	Частота вращения, мин^{-1}
МЦ-63	224	64,5	54	4A100L8P3	1,5	700
	280	52,0	54	4A100L8P3	1,5	700
	355	55,4	54	4A100L6P3	2,2	950
	450	62,5	47	4A100S4P3	3,0	1420
МЦ-80	224	121,6	78	4A112MB8P3	3,0	700
	280	120,7	78	4A112MB6P3	4,0	950
	355	99,1	78	4A112MB6P3	4,0	950
	450	109,9	78	4A112M4P3	5,5	1450

II.4. Технические данные станций гидроприводов типа Г48-9

Наименование параметра	Типоразмеры станций		
	Г48-93	Г48-94	Г48-95
Емкость бака, 10^{-3}	100	160	250
Номинальная производительность насоса, $10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$:			
одинарного	0,083 — 0,833	0,133 — 1,167	0,133 — 1,667
двоянного	0,050/0,050 — — 0,417/0,583	0,083/0,083 — — 0,583/1,167	0,083/0,083 — — 1,667/0,583
Номинальная приводная мощность, кВт :			
$n=104,7 \text{ 1/с (1000 \text{ мин}^{-1})}$	0,8 — 4,0	1,5 — 7,5	1,5 — 13,0
$n=157 \text{ 1/с (1500 \text{ мин}^{-1})}$	1,1 — 5,5	2,2 — 10,0	2,2 — 17,0
Ориентировочная масса станции (без масла), кг	275 — 320	400 — 440	440 — 515

II.5. Технические данные станций гидроприводов типа РГ48-9

Наименование параметра	Типоразмеры станций	
	Г48-94	Г48-95
Емкость бака, 10^{-3}	160	250
Номинальная производительность насоса, $10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$:		
поршневого	0,583/0,833	1,167/1,667
пластинчатого	0,133/0,200	0,133/0,200
Номинальная приводная мощность, кВт :		
$n=104,7 \text{ 1/с (1000 \text{ мин}^{-1})}$	3,0 — 13,0	5,5 — 22,0
$n=157 \text{ 1/с (1500 \text{ мин}^{-1})}$	4,0 — 17,0	7,0 — 30,0
Ориентировочная масса станции (без масла), кг	500 — 540	680 — 735

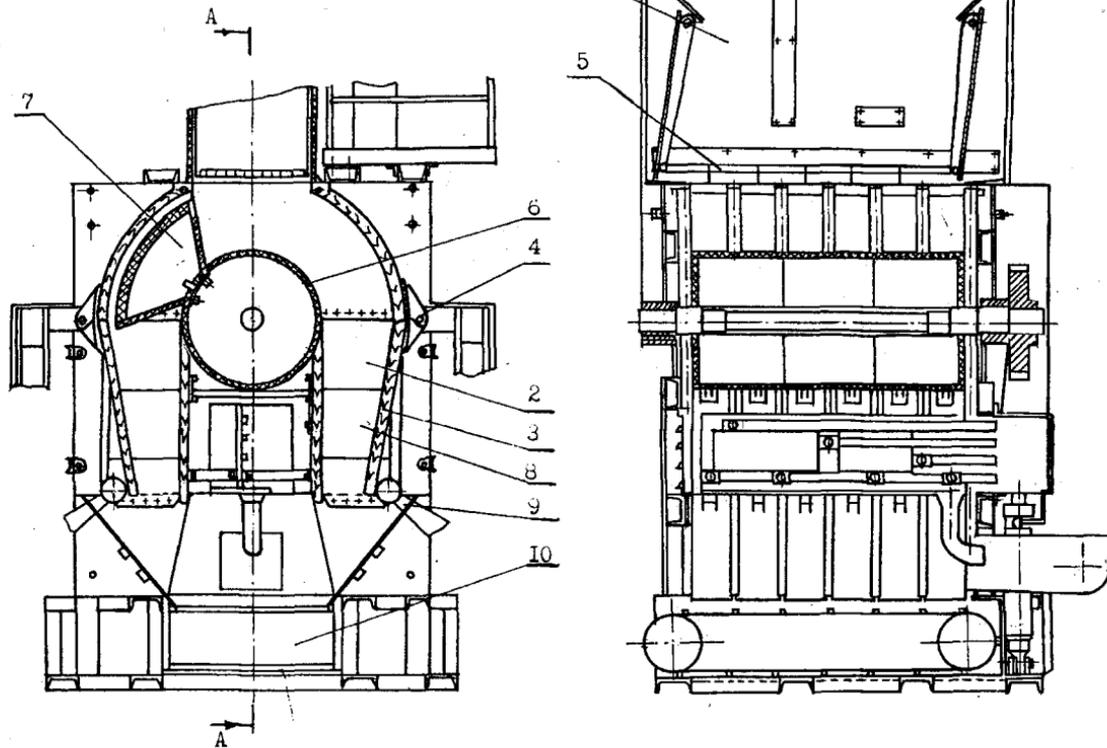


Рис. П.2. Конструктивная схема установки с решетчатым распределительным механизмом, вертикальными камерами и криволинейным ходом уплотнителя: 1 - бункер приемный; 2 - камера рабочая; 3 - стенка подвижная; 4 - шарнир; 5 - виброрешетка; 6 - барабан подвижный; 7 - уплотнитель; 8 - электроды; 9 - уплотнитель дополнительный; 10 - транспортер выгрузной.

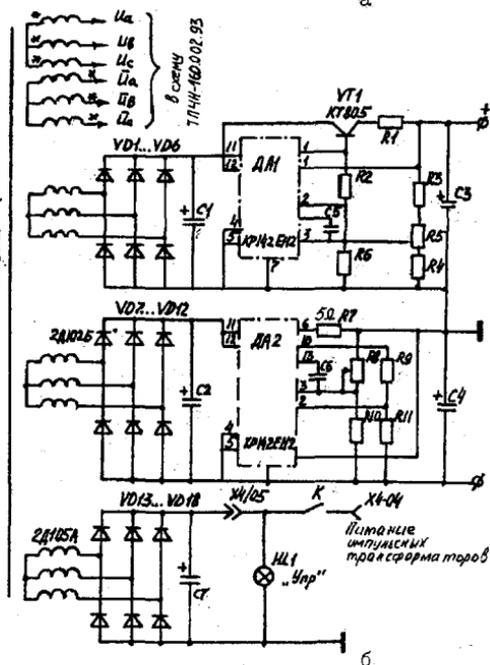
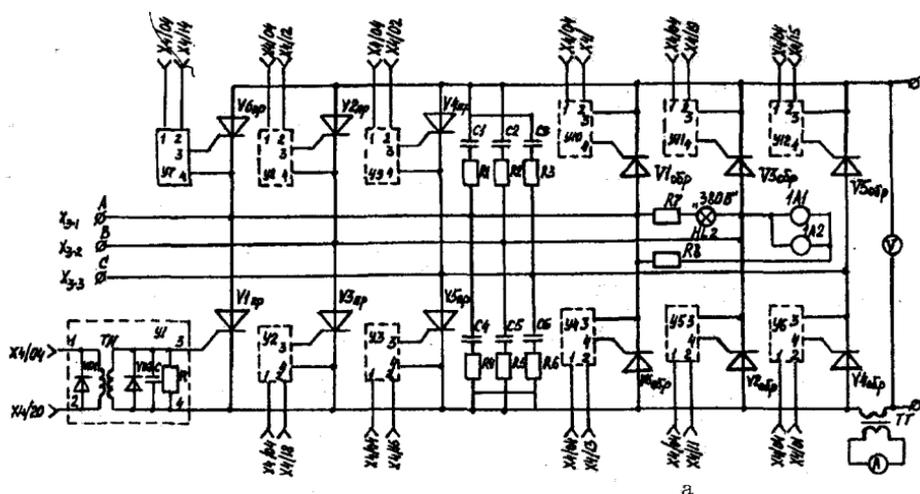


Рис. П.3. Тиристорный преобразователь числа фаз: а - силовая схема; б - блок питания.

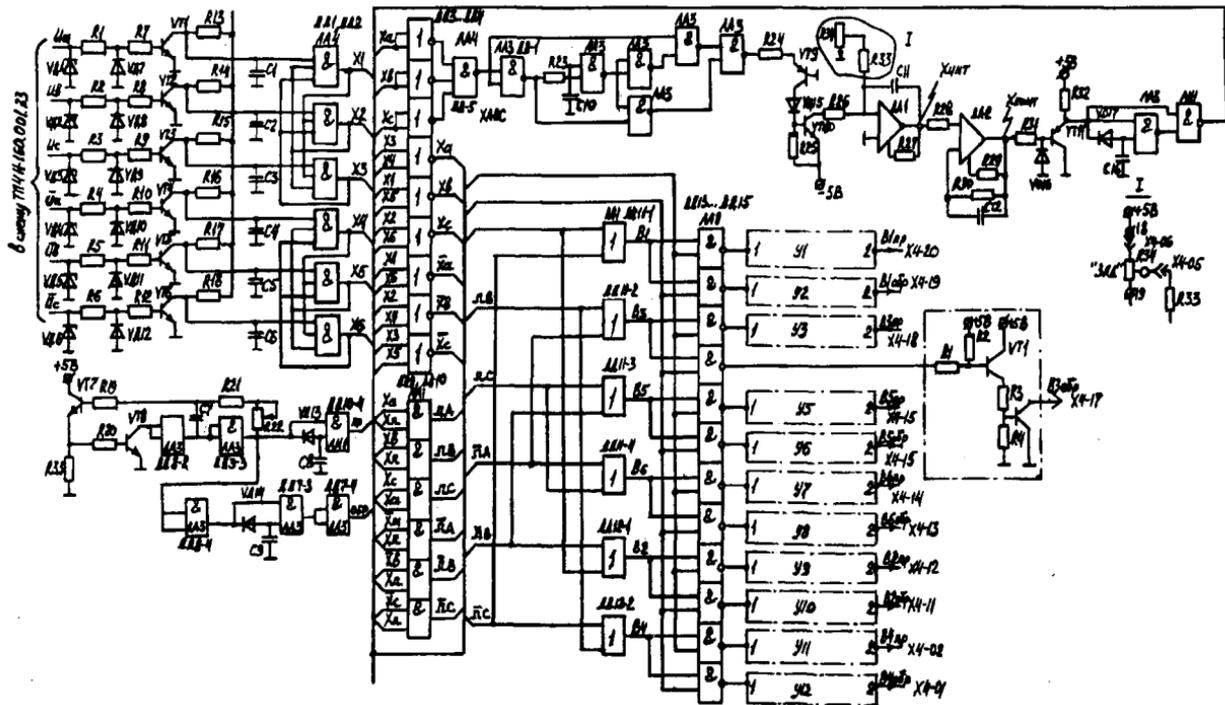


Рис. П.4. Схема управления тиристорного преобразователя числа фаз.

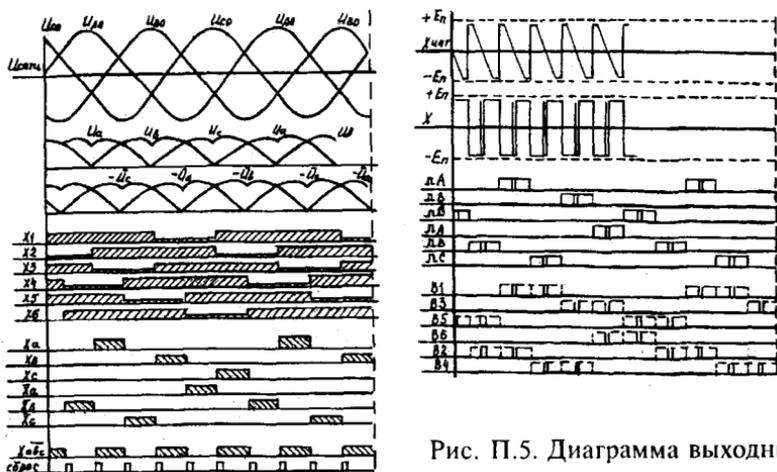


Рис. П.5. Диаграмма выходных сигналов схемы управления.

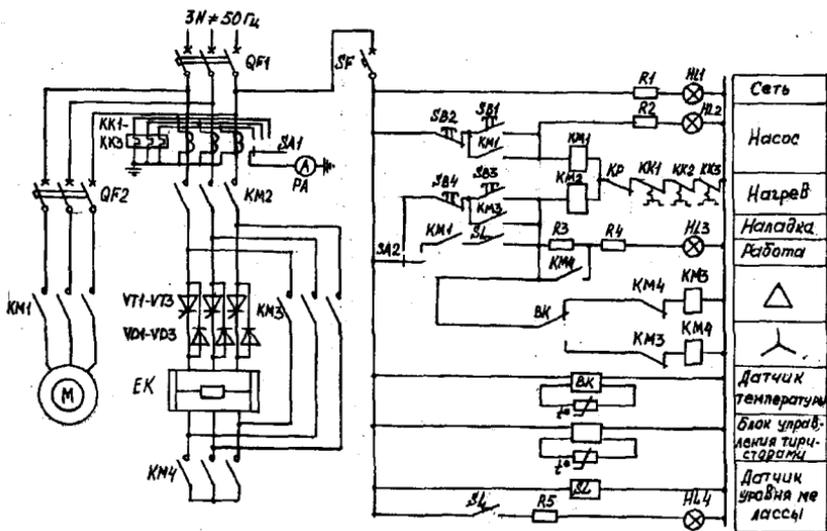


Рис. П.6. Принципиальная электрическая схема установки электротепловой обработки мелассы.

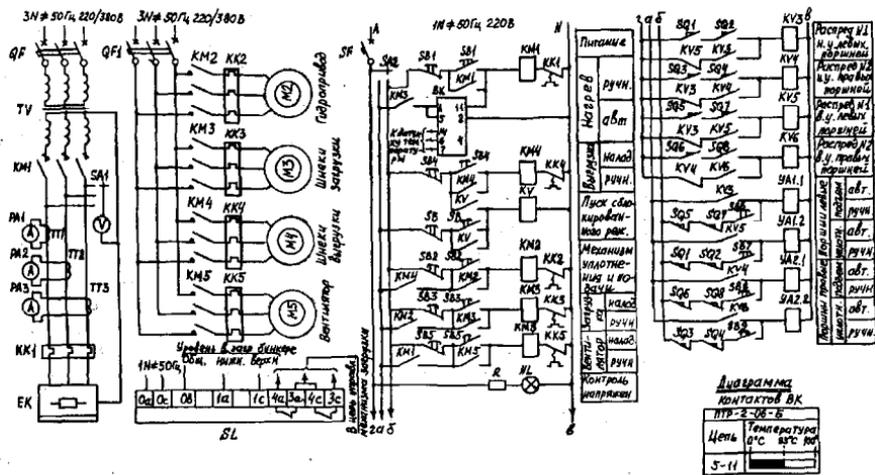


Рис. П.7. Принципиальная электрическая схема управления установкой электротермохимической обработки соломы.

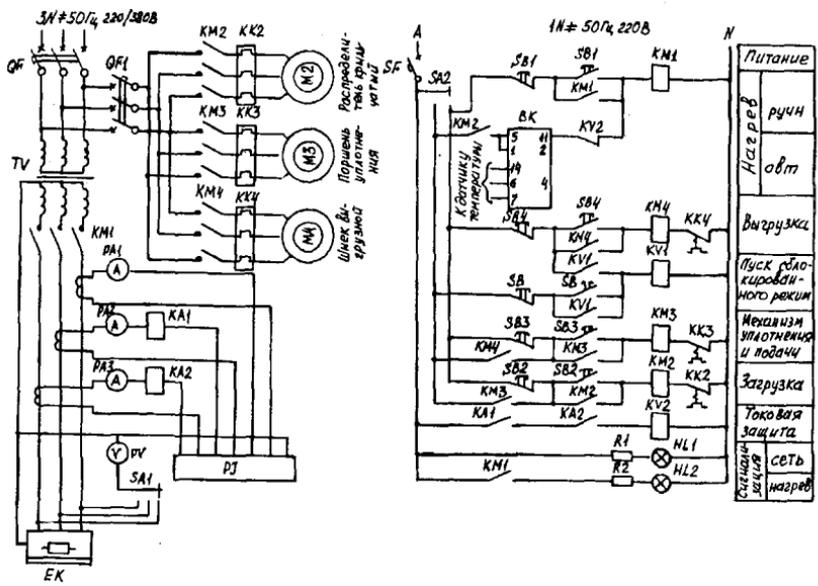


Рис. П.8. Принципиальная электрическая схема управления установкой электрогидротермической обработки зерна.

II.6. Технические данные станций гидроприводов типа ГС

Наименование параметра	Типоразмеры станций	
	ГС400	ГС630
Емкость бака, 10^{-3}	400	630
Номинальная производительность насоса, $10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$:	0,083 — 3,333	0,083 — 3,333
Номинальная приводная мощность, кВт :	1,5 — 17,0	10 — 30
Ориентировочная масса станции (без масла и насосной установки), кг	540	680

II.7. Программа расчета температурного поля

Uses TpCrt, TpString;

CONST

```

Ta      =12.0;
Tc      =10.0;
dx      = 0.001;
m       = 4;
nV      = 3;
mu      = 1.7e-5;
Inc_pl  = 100.0;
Inc_E   = 100.0;
AText   : Array[1..m] of String[13]=
          ('Солома', 'Зерно', 'Меласса', 'Сок картофеля');
Tend    : Array[1..m] of Real= ( 100.5, 79.9, 59.7, 40.0 );
Ga20    : Array[1..m] of Real= ( 0.25, 0.15, 0.025, 1.08 );
Isx_pl  : Array[1..m] of Real= ( 600, 400, 1400, 1028 );
npl     : Array[1..m] of Byte= ( 3, 3, 1, 1 );
C       : Array[1..m] of Real= ( 3250, 2150, 2510, 3140 );
Lambda  : Array[1..m] of Real= ( 0.29, 0.31, 0.32, 0.58 );
Isx_E   : Array[1..m] of Real= ( 700, 1400, 4000, 200 );
nE      : Array[1..m] of Byte= ( 3, 3, 1, 1 );
jPrint  : Array[1..m] of Byte= ( 25, 10, 10, 100 );
Visx    : Array[1..nV] of Real= ( 0.001,
                                0.002,
                                0.003);

```

VAR

```

x, T, Tps, pl, E, V      : Real;
i1, i2, i3, i4          : Byte;
j                        : Integer;
Gamma,

```

```

a_sm, A, Re, Delta, L,
P, z, DeltaL, k1, k2, k3, y : Real;
F : Text;
BEGIN
Assign(F, 'Nagr.txt');
Rewrite(F);
Writeln(F, Pad('', 30), ' П Л А С Т И Н Ы ');
TextAttr:=\$30;
ClrScr;
for i1:=1 to m do
begin {i1}
Writeln(F, Pad('', 30));
Writeln(F, Pad('', 30), AText[i1]);
Writeln(F,
`r-----T-----T-----T-----T-----T-----r');
Writeln(F,
`| Плот- |Напряж.|Скорость| Длина | Температура |');
Writeln(F,
`| ность |эл.поля|перемеш.|электрода+-----T-----|');
Writeln(F,
`| кг/м3| в/м | м/с | м | ядра |погран.слоя|');
Writeln(F,
`L-----|-----|-----|-----|-----r');
for i2:=1 to npl[i1] do
begin {i2}
pl :=Isx_pl[i1]+Inc_pl*(i2-1); { pl:=800;}
a_sm:=Lambda[i1]/(pl*C[i1]); {a}
z :=10.0/Lambda[i1];
for i3:=1 to nE[i1] do
begin {i3}
E:=Isx_E[i1]+Inc_E*(i3-1); { E:=1000;}
L:=220.0/E;
for i4:=1 to nV do
begin {i4}
V:=Visx[i4]; { V:=0.003;}
P:=2.0*a_sm/(L*V);
x:=0; T:=Ta;
Repeat
Gamma:=Ga20[i1]*(1+0.037*(T-20)); { Gamma:=0.633;}
A:=E*E*Gamma/(pl*C[i1]*a_sm);
if x=0 then x:=0.001
else if x<0.5*dx then x:=dx
else x:=x+dx;
Re:=pl*x*V/mu;
k1:=Sqrt(Re);
Delta :=3.7*x/k1;
DeltaL:=3.7*L/k1;
T:=Ta+P*((Ta - Tc + A*a_sm*x/V + A*Delta*Delta/3.0)*z/
( z*DeltaL+L
- A*DeltaL*0.5) * x+
A*a_sm*x/V;

```

```

Until (T>=Tend[i1]) or (x>10.0);
y:=0.5*Delta;
Tps:=-A*y*y*(-5.0/12.0)-z*Tc*y+
  ((T+A*Delta*Delta/3.0+z*Tc*Delta)/(z*Delta+L))*(z*y+L);
Writeln(F,pl:6:0, E:8:0, V:9:3, x:9:3, T:9:1, Tps:12:1);
end {i4}
end {i3}
end; {i2}
end; {i1}

Writeln(F,Pad('',30));
Writeln(F,Pad('',30));
Writeln(F,Pad('',30), 'Г Р А Ф И К И');
for il:=1 to m do
begin {i1}
j:=0;
for i2:=1 to 1 do
begin {i2}
pl :=Isx_pl[i1]+Inc_pl*(i2-1);
a_sm:=Lambda[i1]/(pl*C[i1]);
z :=10.0/Lambda[i1];
for i3:=1 to 1 do
begin {i3}
E:=Isx_E[i1]+Inc_E*(i3-1);
L:=220.0/E;
for i4:=nV to nV do
begin {i4}
V:=Visx[i4];
P:=2.0*a_sm/(L*V);
x:=0; T:=Ta;
Writeln(F,Pad('',30));
Writeln(F,Pad('',30),''', AText[i1],''');
Writeln(F, 'r=====T=====T=====');
Writeln(F, 'r Плотность |Напр.эл.поля| Скорость |');
Writeln(F, 'L=====|=====|=====');
Writeln(F, 'r, pl:11:0, E:13:0, V:13:3,');
Writeln(F, 'r=====T=====T=====');

Writeln(F, 'r Длина | Тядра | Тпогр.слоя | Разность |');
Writeln(F, 'L=====|=====|=====');
Repeat
Gamma:=Ga20[i1]*(1+0.037*(T-20));
A:=E*E*Gamma/(pl*C[i1]*a_sm);
if x=0 then x:=0.001
else if x<0.5*dx then x:=dx
else x:=x+dx;
Re:=-pl*x*V/mu;
kl:=Sqrt(Re);
Delta :=3.7*x/kl;

```

```

DeltaL:=3.7*L/k1;
T:=Ta+P*((Ta - Tc + A*a_sm*x/V + A*Delta*Delta/3.0)*z/
      (
        z*DeltaL+L
      )
      - A*DeltaL*0.5) * x+
      A*a_sm*x/V;
y:=0.5*Delta;
Tps:=A*y*y*(-5.0/12.0)-z*Tc*y+
      ( (T+A*Delta*Delta/3.0+z*Tc*Delta)/(z*Delta+L) )*(z*y+L);
if (j mod jPrint[i1] = 0) or (T>=Tend[i1]) then
Writeln(F, x:10:3,' ', ' ', T:10:1,' ', ' ',Tps:10:1,' ', ' ',T-Tps:10:1);
Inc(j);
Until (T>=Tend[i1]) or (x>10.0);
end {i4}
end {i3}
end; {i2}
end; {i1}
Close(F);

```

END.

Uses TpCrt,TpString;

CONST

```

U      =220.0;      n      =20;      r0     =0.13;      Ta     =12.0;
Tc     =10.0;      dx     = 0.001;  m      = 4;      nV     = 3;
Inc_pl = 100.0;    Inc_E  = 100.0;
AText  : Array[1..m] of String[13]=

```

('Солома', 'Зерно', 'Меласса', 'Сок

картофеля');

```

Tend   : Array[1..m] of Real= ( 99.9, 79.9, 59.7, 40.0 );
Ga20   : Array[1..m] of Real= ( 0.25, 0.15, 0.025, 1.08 );
Isx_pl : Array[1..m] of Real= ( 600, 400, 1400, 1028 );
npl    : Array[1..m] of Byte= ( 3, 3, 1, 1 );
C      : Array[1..m] of Real= ( 3250, 2150, 2510, 3140 );
Lambda: Array[1..m] of Real= ( 0.29, 0.31, 0.32, 0.58 );
Isx_E  : Array[1..m] of Real= ( 700, 1400, 4000, 200 );
nE     : Array[1..m] of Byte= ( 3, 3, 1, 1 );
jPrint : Array[1..m] of Byte= ( 50, 10, 50, 250 );
Visx   : Array[1..nV] of Real= ( 0.001, 0.002, 0.003 );

```

VAR

```

x, T, Tin, Tout, pl, E, V : Real;
i1, i2, i3, i4, i5        : Byte;
j                          : Word;
Gamma, k1, k2, k3, y, R, Norm : Real;
F                          : Text;
Rad, Rad2                  : Array[1..n] of Real;

```

BEGIN

```

Assign(F, 'Nagr-t.txt'); Rewrite(F);
Writeln(F, Pad('', 30), ' T P Y B W ');
TextAttr:=$30; ClrScr;
for i1:=1 to m do

```

```

begin {i1}
Writeln(F, Pad('', 30)); Writeln(F, Pad('', 30), AText[i1]);
Writeln(F,
\Г=====Т=====Т=====Т=====Т=====Т=====Т=====');
Writeln(F,
\ | Плот- |Напряж.|Скорость|Внешний| Длина |           Температура
');
Writeln(F,
\ | ность |эл.поля|перемеш.|радиус |           +---Т---Т---|');
Writeln(F,
\ | кг/М3| в/м | м/с | м | м | средняя|внутр.сл.|в-
нешн.сл|');
Writeln(F,
\L=====|=====|=====|=====|=====|=====|=====
');

for i2:=1 to npl[i1] do
begin {i2}
pl :=Isx_pl[i1]+Inc_pl*(i2-1);
for i3:=1 to nE[i1] do
begin {i3}
E:=Isx_E[i1]+Inc_E*(i3-1); R:=r0+U/E; k3:=(R-r0)/n;
Norm:=0;
for i5:=1 to n do
begin
Rad[i5] :=r0+k3*(i5-0.5);
Rad2[i5]:=Sqr(Rad[i5]+0.5*k3)-Sqr(Rad[i5]-0.5*k3);
Norm:=Norm+Rad2[i5];
end;
for i4:=1 to nV do
begin {i4}
V:=Visx[i4]; x:=0; T:=Ta;
k1:=U*U/(pl*C[i1]*V*Sqr(Ln(R/r0)));
Repeat
Gamma:=Ga20[i1]*(1+0.037*(T-20));
if x=0 then x:=0.0001
else if x<0.5*dx then x:=dx else x:=x+dx;
k2 :=Gamma*x*k1; Tin :=Ta+k2/Sqr(r0); Tout:=Ta+k2/
Sqr(R);
T:=0;
for i5:=1 to n do T:=T+Rad2[i5]*( k2/Sqr(Rad[i5]) );
T:=Ta+T/Norm;
Until (T>=Tend[i1]) or (x>10.0);
Writeln(F,pl:8:0,E:8:0,V:9:3,R:8:3,x:8:3,T:8:1,Tin:8:1,Tout:8:1);
end {i4}
end {i3}
end; {i2}
end; {i1}

Writeln(F, Pad('', 30));
Writeln(F, Pad('', 30));
Writeln(F, Pad('', 30), ''Г Р А Ф И К И''');
for il:=1 to m do

```

```

begin {i1}
  j:=0;
  for i2:=1 to 1 do
    begin {i2}
      pl :=Isx_pl[i1]+Inc_pl*(i2-1);
      for i3:=1 to 1 do
        begin {i3}
          E:=Isx_E[i1]+Inc_E*(i3-1);
          R:=r0+U/E;
          k3:=(R-r0)/n;
          Norm:=0;
          for i5:=1 to n do
            begin
              Rad[i5] :=r0+k3*(i5-0.5);
              Rad2[i5]:=Sqr(Rad[i5]+0.5*k3)-Sqr(Rad[i5]-0.5*k3);
              Norm:=Norm+Rad2[i5];
            end;
          for i4:=nV to nV do
            begin {i4}
              V:=Visx[i4];
              x:=0; T:=Ta;
              k1:=U*U/(pl*C[i1]*V*Sqr(Ln(R/r0)));
              Writeln(F,Pad('',30));
              Writeln(F,Pad('',30),'', AText[i1],'');
              Writeln(F,"r=====T=====T=====T=====");
              Writeln(F,"|Плотн-ть|Нап.поля|Скорость| Вн.рад.|");
              Writeln(F,"L=====|=====|=====|=====");
              Writeln(F,"",pl:9:0, E:9:0, V:9:3, R:9:3,"");
              Writeln(F,"r=====T=====T=====T=====");
              Writeln(F,"| Длина | Тср.взв.| Твнутр. | Тнаружн.| Твн-
Тнар|"");
              Writeln(F,"L=====|=====|=====|=====");
            end;
          Repeat
            Gamma:=Ga20[i1]*(1+0.037*(T-20));
            if x=0 then x:=0.0001
              else if x<0.5*dx then x:=2*dx
                else x:=x+dx;
            k2 :=Gamma*x*k1;
            Tin :=Ta+k2/Sqr(r0);
            Tout:=Ta+k2/Sqr(R);
            T:=0;
            for i5:=1 to n do
              begin
                T:=T+Rad2[i5]*( k2/Sqr(Rad[i5]) );
              end;
            T:=Ta+T/Norm;
            if (j=0) or ((j+1) mod jPrint[i1] = 0) or (T>=Tend[i1])
              then
                Writeln(F,x:7:3,' ', T:7:1,' ', Tin:7:1,' ',
Tout:7:1,' ', Tin-Tout:7:1);

```

```
      Inc(j);
      Until (T>=Tend[i1]) or (x>10.0);
    end {i4}
  end {i3}
end; {i2}
end; {i1}
```

```
Close(F);
```

```
END.
```

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонюк В.С. Пути повышения эффективности использования зернофуража в животноводстве. — В сб. Пути перехода республики Беларусь на самообеспечение зерном: Материалы научной сессии ААН РБ. — Мн.: ААН РБ, 1993.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. — М.: “Высшая школа”, 1967.
3. Карасенко В.А., Заяц Е.М., Камович А.П. Исследование электротехнологической обработки кормов. — МЭСХ, 1979, №8.
4. Лендьел П., Морван Ш. Химия и технология целлюлозного производства /Пер. с нем. Под. ред. А.Ф. Тищенко./ — М.: Лесная промышленность, 1978.
5. Кормщиков П.А. Кальцинирование соломы. — М.: Россельхозиздат, 1974.
6. Никитин В.М. Физика и химия высокомолекулярных соединений и химия древесины и целлюлозы. — Л.: Химия, 1975.
7. Уистлер Р.Л., Пашаль Э.Ф. Химия и технология крахмала. — М.: Пищевая промышленность, 1975.
8. Эстрела-Льопис В.Р., Духин С.С., Шилов В.Н. Об энергии взаимодействия двух сферических коллоидных частиц во внешнем электрическом поле. — Коллоидный журнал, 1974, т. XXXVI, № 6.
9. Шульгин Л.П. Электрохимические процессы на переменном токе. — Л.: Наука, 1974.
10. Кульский Л.Л., Гребенюк В.Д., Савчук О.С. Электрохимия в процессах очистки воды. — К.: Техника, 1987.
11. Рогов В.М., Филиппчук В.Л. Электрохимическая технология изменения свойств воды. — Львов : Выща школа, 1989.
12. Добош Д. Электрохимические константы. — М.: Мир, 1980.
13. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. — Л.: Химия, 1978.
14. Стендев В.В. Прикладная электрохимия. — Харьков, Наука, 1961.
15. Раковский А.В. К учению об адсорбции. — М.: 1913.
16. Назаров В.И. и Лукьянов А.Б. К вопросу об ионном обмене на крахмале. — Коллоидный журнал, 1955, 17, № 4.
17. Смирнова Т.А., Кострова Е.И. Микробиология зерна и продуктов его переработки. — М.: Агропромиздат, 1989.
18. Микроорганизмы — возбудители болезней растений. Справочник. Под. ред. чл.-кор. АН УССР В.И. Билай. — Киев, Навукова думка, 1988.
19. Лебедев Е.И. Комплексное использование сырья в пищевой промышленности. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982.
20. Мирошников А.И., Фомиченков В.М., Габуев И.С., Чеканов В.А. Разделение клеточных суспензий. — М.: Наука, 1977.

21. Кульский Л.А., Савлук О.С., Дайнеча Е.Ю. Влияние электрического поля на процесс обеззараживания воды. — К.: Знание, 1980.
22. Зимин-Бермес Н.Н., Грошова В.А., Пименова В.А., Кравченко В.И. Сопоставление физико-химических особенностей поверхности бактерий: — В сб. Предупредительная медицина. — Кемерово : Книгоиздат, 1973.
23. Гордиенко А.С., Глоба Л.И., Ротмистров И.Н. Электрокинетические свойства клеток бактерий в дисперсионной среде с разными значениями рН. — Докл. АН УССР, 1978, № 5.
24. Brown D.R., Salt F.W. I. appl. chem., 15, 40, 1965.
25. Заяц Я.М., Ющанка І.Б. Да пытання электракаагуляцыі бялкоў бульбянога соку. — Мн.: Весці акадэміі аграрных навук Беларусі, 1994, № 3.
26. Бойко И.И. Консервирование кормов. — М.: Россельхозиздат, 1980.
27. Карасенко В.А., Заяц Е.М., Мальчевская Е.Н. Влияние электротепловой обработки на кормовые свойства мелассы. — В сб. Научные основы развития животноводства в БССР. — Мн., Ураджай, 1977.
28. Grane I.S., Pohl H.A. Study of living and dead yeast cells using dielectrophoresis. — Y. Electrochemie soc., 1968, 115, № 6.
29. А.с. 704585 (СССР). Способ обработки грубых кормов / Авт. изобрет. Заяц Е.М. и др., указанные в описании. — Оpubл. в Б.И., 1979, № 47.
30. А.с. 858723 (СССР) Способ электрогидротермической обработки кормовых материалов / Авт. изобрет. Заяц Е.М. и др., указанные в описании. — Оpubл. в Б.И., 1981, № 32
31. А.с. 683034 (СССР) Электронагреватель текущих сред / Авт. изобрет. Карасенко В.А., Заяц Е.М. — Оpubл. в Б.И., 1979, № 32.
32. Патент 2055622 (Россия). Способ коагуляции белков /Авт. изобрет. Заяц Е.М. и др., указанные в описании. — Оpubл. в Б.И. 1996, № 8.
33. А.с. 540624 (СССР). Запарник пастообразных кормов/Авт. изобрет. Карасенко В.А., Цыбульский П.П., Заяц Е.М. — Оpubл. в Б.И., 1976, № 48.
34. А.с. 1782524 (СССР). Электробиотехнологическая установка для получения углеводно-белкового корма / Авт. изобрет. Заяц Е.М. и др., указанные в описании. — Оpubл. в Б.И., 1992, № 47.
35. Богородицкий И.П., Пасынков В.В., Тарев Б.М. Электротехнические материалы. — М.: Энергия, 1977.
36. Френкель Я. Кинетическая теория жидкостей. — М.: Наука, 1977.
37. Электрические свойства полимеров. Под ред. Б.И. Сажина. — Л.: Химия, 1977.
38. Духин С.С. Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсионных систем. — Киев : Наукова думка, 1975.
39. Маркин А.С., Чизмаджиев Ю.А. Индуцированный ионный транспорт. — М.: Наука, 1971.
40. Карасенко В.А., Заяц Е.М. Электрофизические свойства мелассы. — Пи-

шевая технология, 1977, № 6.

41. Карасенко В.А., Заяц Е.М. Сопротивление контактного перехода электрод-органическая среда. — Кишнев. Электронная обработка материалов, 1978, № 2.
42. Воронянский Н.П., Губко И.Н., Фурса И.И. О физико-механических свойствах соломы после тепловой обработки. — В кн.: Механизация и электрификация сельского хозяйства. — Киев, Урожай, 1969, вып. 13.
43. Ткач В.Д., Артюшин А.А., Куцин Л.М. и др. Определение физико-механических свойств стебельчатых кормов. — Научно-технический бюллетень по механизации и электрификации животноводства. / ЦНИПТИМЭЖ. Запорожье, 1978, вып. 9.
44. Особов В.И., Васильев Г.К., Голяновский А.В. Машины и оборудование для уплотнения сеносоломистых материалов. — М.: Машиностроение, 1974.
45. Роговой В.Д. Исследование физико-механических свойств озимой пшеницы. — В кн. Механизация и электрификация сельского хозяйства. — Киев: Урожай, 1969, вып. 13.
46. Николаенок М.М. Обоснование технологических параметров и технических средств для электротермохимической обработки соломы: Автореф. дис. канд. техн. наук. — М.: 1984.
47. Корко В.С. Разработка электрогидротермического способа обработки зерна: Автореф. дис. канд. техн. наук. — М.: 1984.
48. Карасенко В.А., Пашинский В.А. Определение физико-механических свойств ячменя при влаготепловой обработке. — МЭСХ, 1982, № 6.
49. Заяц Я.М., Ющанка І.Б. Фізичныя характарыстыкі бульбянога соку. — Мн.: Весці акадэміі аграрных навук Беларусі, 1994, № 3.
50. Заяц Е.М., Николаенок М.М., Буров А.А., Ющенко И.Б. Влияние уплотнения на некоторые параметры электрообработки кормов. — В сб.: Энергосберегающие сельскохозяйственные процессы и установки. — Горки, БСХА, 1991.
51. Теплофизические характеристики пищевых продуктов и материалов. Справочное пособие под ред. А.С. Гинзбурга. — М.: Пищепром, 1975.
52. Чудновский А.Д. Теплофизические характеристики дисперсионных материалов. — М.: Физматгиз, 1962.
53. А.с. 572947 (СССР). Электронагреватель текучих сред. / Авт. изобрет. Карасенко В.А., Заяц Е.М. — Оpubл. в Б.И., 1977, № 34.
54. А.с. 498762 (СССР). Электрический нагреватель токопроводящих сред / Авт. изобр. Заяц Е.М. и др., указанные в описании. — Оpubл. в Б.И., 1976, № 1.
55. Карасенко В.А., Заяц Е.М. Электрический подогреватель мелассы. — Техника в сельском хозяйстве, 1976, № 12.
56. Карасенко В.А., Заяц Е.М. Исследование электродного нагрева мелассы.

— МЭСХ, 1979, № 7.

57. Особов В.И. Машины для брикетирования растительных материалов. — М.: Машиностроение, 1971.
58. А.с.880404 (СССР). Устройство для электротермической обработки материалов. /Авт. изобрет. Заяц Е.М. и др., указанные в описании. — Оpubл. в Б.И. 1981, № 42.
59. А.с.986389 (СССР). Устройство для электротермической обработки материалов. /Авт. изобрет. Заяц Е.М. и др., указанные в описании. — Оpubл. в Б.И. 1983, № 1.
60. А.с.880403 (СССР). Устройство для электротермической обработки кормов. /Авт. изобрет. Заяц Е.М. и др., указанные в описании. — Оpubл. в Б.И. 1981, № 42.
61. А.с.1542529 (СССР). Устройство для электротермической обработки кормов. /Авт. изобрет. Заяц Е.М. и др., указанные в описании. — Оpubл. в Б.И. 1990, № 6.
62. А.с.869748 (СССР). Устройство для электротермической обработки кормов. /Авт. изобрет. Заяц Е.М. и др., указанные в описании. — Оpubл. в Б.И. 1981, № 37.
63. Нейман Л.Р., Димирчан К.С.: Теоретические основы электротехники. — М.: Энергия, 1980.
64. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей: Справочник / Я.Б. Данцис, Л.С. Кацевич, Г.И. Жилов и др. — Металлургия, 1974.
65. Свенчанский А.Д., Смелянский М.Я. Электрические промышленные печи. ч.2. Дуговые печи: Учебное пособие для вузов. — М.: Энергия, 1970.
66. А.с.961161 (СССР). Устройство для управления установкой электродного нагрева токопроводящей среды. /Авт. изобрет. Заяц Е.М. и др., указанные в описании. — Оpubл. в Б.И. 1982, № 35.
67. Бекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. — М.: Наука, 1975.
68. Ксеневиц И.П., Тарасик В.П. Теория и проектирование автоматических систем. — М.: Машиностроение, 1991.
69. Бородин И.Ф., Кирилин Н.И. Основы автоматики и автоматизации производственных процессов. — М.: Колос, 1977.
70. Карасенко В.А., Заяц Е.М., Ампилов Н.В. Исследование эрозии электродов при нагреве органической среды. — Серия "Электротермия", 1977, вып. 5 (177).
71. Заяц Е.М., Ющенко И.Б. Электроэрозия материалов в картофельном соке / Проблемы развития энергетики и электрофикации АПК : Сб. науч. тр. / БелНИИагрэнерго. — Мн.: 1994.
72. Карасенко В.А., Заяц Е.М., Пашинский В.А. К расчету двухзонных элект-

тродных нагревателей. — МЭСХ, 1986, № 3.

73. Айбазов О.А. Ферментативный способ обработки соломы. — М.: Россельхозиздат, 1984, с. 49.
74. Науменко Э.К., Эрнст Л.К., Ладинская С.И. и др. Получение и использование осахаренной соломы. — Мн.: БелНИИНТИ, 1981, с. 123.
75. Матюто Н.А., Шидловский В.Г., Кусмерский Ф.Ф. Термохимический способ обработки соломы во вращающихся емкостях. — Животноводство, 1979, № 10.
76. Ветров В.С., Высоцкая Н.А., Дмитриев А.М. и др. Радиационная обработка отходов для сельскохозяйственного использования. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
77. Карасенко В.А., Камович А.П. и др. Электротермохимическая обработка соломы. — Животноводство, 1978, № 3, с. 38.
78. Пак А.В., Валуйский П.П., Лысенко Л.П., Мануйлова О.Н. Ферментная обработка соломы. — Кормовые культуры, 1989, № 4.
79. Гургенидзе И.И., Морозова Т.В., Карасенко В.А., Заяц Е.М. Сравнительная оценка способов обработки соломы. — Кормовые культуры, 1989, № 4.
80. Соловьянов Н.П., Лешин А.П. Экструдирование зернофуража. — Степные просторы, 1981, № 10.
81. Гутиев М.Н., Даускаев В.С. Эффективность скармливания экструдированного зерна племенным свинкам. — Животноводство, 1983, № 3.
82. Скляр Л.А. Перевариваемость зерна, подвергнутого термической и гидротермической обработке. — Сельское хозяйство за рубежом, 1984, № 9.
83. Способы обработки кормового зерна. — Обзорная информация ВАСХНИЛ. 1981.
84. Денисова Р.Р., Елизаров В.П., Павлов С.А. и др. Обработка зерна инфракрасным излучением. — Доклады ВАСХНИЛ. 1981, № 11.
85. Калниньш Н.Я., Панков Я.А. Обработка фуражного зерна инфракрасным излучением. — Кормопроизводство, 1983, № 10.
86. Заяц Е.М., Гургенидзе И.И., Пашинский В.А., Кардашов П.В., Энергоэкономическая эффективность способов повышения питательной ценности зерна. — Кормовые культуры, 1991, № 6.
87. Герасимович Л.С., Заяц Е.М. Энергосберегающие технологии обработки кормов. — Тезисы докладов 2-ой международной научно-техн. конференции «Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии. — Гродно. БИТА, 1996.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Технологические основы обработки кормов электрическим током	5
1.1. Проблема и способы обработки кормов	5
1.2. Электрохимические процессы обработки	16
1.3. Температурное поле при электрообработке	43
1.4. Влияние электрического поля на микроорганизмы кормов	55
1.5. Санитарное качество кормов	61
1.6. Технологические параметры электрообработки	64
2. Физические свойства кормовых систем	67
2.1. Область определения	67
2.2. Электрофизические свойства	68
2.3. Физико-механические свойства	87
2.4. Теплофизические свойства	95
3. Некоторые технологические процессы	96
3.1. Электротермохимическая обработка соломы	96
3.2. Электрогидротермическая обработка зерна	101
3.3. Электротепловая обработка мелассы	107
3.4. Электрокоагуляция белков картофельного сока	110
3.5. Размещение оборудования	112
4. Оборудование для электрической обработки кормов	115
4.1. Классификация электротехнологических установок	115
4.2. Приемное устройство	115
4.3. Механизмы распределения	117
4.4. Механизмы уплотнения	119
4.5. Рабочие камеры	123
4.6. Источники питания	130
4.7. Электрические схемы управления	141
5. Основы расчета рабочих камер	151
5.1. Компановка рабочей камеры	151
5.2. Конструкционные материалы	153
5.3. Механический расчет рабочих камер	154
5.4. Расчет камер электротепловой обработки	164
5.5. Расчет камер электрохимической обработки	173
5.6. Расчет электрокоагуляторов белков	176
6. Энергоэкономическая эффективность технологий	180
6.1. Методика и критерии сравнительной эффективности	180
6.2. Условие сопоставимости проектных решений	183
6.3. Производственно-технологические показатели	184
6.4. Особенности исследуемых технологий	185
6.5. Результаты энергоэкономического сравнения	187
Приложения	195
Литература	211