МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ – ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» В Г. ЗЕРНОГРАДЕ

ЭНЕРГО-РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ВЛАГОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ КОРМОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОЗОНА

Монография

г. Зерноград, 2017 г.

УДК: 636.085:631.363

Печатается по решению ученого совета
Азово-Черноморского инженерного института – филиала
Федерального Государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Донской Государственный аграрный университет» в г. Зернограде

Рецензенты:

Учёный секретарь СКНИИМЭСХ
ФГБНУ «АНЦ «Донской»,
доктор технических наук В.Ф. Хлыстунов

Кандидат технических наук,
Директор ФГБУ «Северо-Кавказская МИС» Г.А. Жидков

Толстоухова Т.Н.

Энерго-ресурсосбережение при влаготермической обработке кормов на основе использования озона: монография / Т.Н. Толстоухова. – Зерноград: АЧИИ ФГБОУ ВО Донской ГАУ. – 2017. – 189 с.

В монографии рассматриваются научные основы и прикладные аспекты использования озона для интенсификации горения топлива в теплогенерирующих установках, используемых в животноводстве, что позволяет при тепловой обработке корма сократить её продолжительность, снизить тепловые потери, расход жидких видов топлива и повысить производительность технологической линии кормоцеха и экономичность процесса.

Приведены результаты экспериментальных исследований, позволяющие обосновать параметры наиболее экономичных режимов работы теплогенерирующей установки в условиях производства.

Монография предназначена для научных работников, конструкторов, преподавателей, аспирантов, магистров и бакалавров, обучающихся по направлению 35.03.06 и 35.06.04 «Агроинженерия» и специалистов сельского хозяйства.

УДК: 636.085:631.363

© Толстоухова Т.Н., 2017
© АЧИИ ФГБОУ ВПО Донской ГАУ, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение ……. 6
1. Тепловая обработка кормов …… 9
1.1. Корма и подготовка их к скармливанию ……. 9
1.1.1. Понятие корма ……. 9
1.1.2. Классификация и технологические свойства кормов …….. 12
1.1.3. Оценка кормов и улучшение их качества ……. 17
1.1.4. Подготовка кормов к скармливанию …… 23
1.2. Классификация и характеристика основных способов тепловой обработки кормов …….. 25
1.2.1. Классификация способов тепловой обработки кормов….. 26
1.2.2. Термические способы обработки кормов …… 27
1.2.3. Влаготермические способы обработки кормов …….. 31
1.2.4. Термомеханические способы обработки кормов …… 34
1.3. Технологии тепловой обработки кормов в хозяйствах ……. 41
1.3.1. Основные направления развития производства комбикормов в стране …… 41
1.3.2. Технологии тепловой обработки кормов и технические средства, используемые в хозяйствах …… 45
1.3.3. Пути снижения энергоемкости влаготермической обработки кормов в условиях хозяйств ……. 57
1.4. Характеристика тепловых потерь при влаготермической обработке корма …….. 60
1.4.1. Тепловые потери в теплогенерирующей установке …….. 60
1.4.2. Тепловые потери в теплопотребляющей установке …….. 64
1.4.3. Тепловые потери в теплопроводящей сети ……. 66
1.4.4. Анализ способов снижения тепловых потерь от неполного сгорания топлива в теплогенерирующей установке …… 67
2. Теоретическое обоснование совершенствования тепловой обра-

ботки кормов …… 73
2.1. Совершенствование процесса влаготермической обработки кормов в аппаратах периодического действия …….. 73
2.1.1. Анализ тепловых потерь при влаготермической обработке кормов …… 76
2.1.2. Оценка тепловых потерь от неполного сгорания топлива . 86
2.2. Влияние озонированного воздуха на повышение производительности технологической линии влаготермической обработки корма ……. 96
3. Результаты экспериментальных исследований влаготермической обработки кормов и их анализ …… 100
3.1. Поисковые экспериментальные исследования …….. 100
3.2. Исследование влияния озонированного воздуха на интенсификацию сгорания исследуемых топлив ……... 112
3.3. Исследование влияния высоковольтного неоднородного электрического поля на сгорание исследуемых топлив …….. 123
3.4. Многофакторная модель скорости горения жидкого топлива в топочном устройстве …… 136
3.5. Производственные экспериментальные исследования ……. 148
3.5.1. Условия и порядок проведения эксперимента …… 148
3.5.2. Определение оптимальной концентрации озона при сжигании печного топлива в котле-парообразователе КВ-300Л ……. 151
3.5.3. Исследование влияния озонированного воздуха на снижение расхода топлива при влаготермической обработке корма .. 153
3.5.4 Исследование влияния озонированного воздуха на повышение производительности технологической линии обработки корма ……. 158
3.5.5. Исследование влияния озонированного воздуха на снижение вредных выбросов в атмосферу ……. 167
3.5.5.1. Влияние озонированного воздуха на снижение со-

держания окиси углерода в дымовых газах ……. 167

3.5.5.2. Влияние озонированного воздуха на снижение содержания окислов азота в дымовых газах ……. 169

3.5.6. Методика расчета производительности топочного электроозонатора для котлов с паропроизводительностью до 400 кг пара в час ……. 170

Выводы ……. 175

Литература …… 177

© Т.Н. Толстоухова

ВВЕДЕНИЕ

Важной экономической проблемой в животноводстве страны продолжает оставаться низкая конкурентноспособность отечественной продукции, обусловленная высокими затратами ресурсов (корма, рабочее время, энергия) на получение продукции, низкими показателями продуктивности и воспроизводства стада, технического оснащения ферм и недостаточным применением современных ресурсосберегающих технологий.

Одним из основных путей повышения продуктивности сельскохозяйственных животных является полноценное их кормление, которое предусматривает использование кормов только в приготовленном виде. В этой связи многие технологии приготовления различных видов кормов предусматривают их тепловую обработку. Однако, одним из наиболее существенных недостатков таких технологий являются высокие затраты топлива и электроэнергии, которые составляют значительную долю общих затрат на подготовку корма, что существенно снижает их эффективность. В связи с этим энергоемкость и трудоемкость производства основных продуктов животноводства в нашей стране значительно выше, чем в передовых западных станах.

В период до 90-х годов при интенсивном технологическом и техническом оснащении ферм и комплексов мало внимания обращали на количественные показатели энергопотребления. В значительной мере это было связано с низкими ценами на энергоресурсы. Их доля в себестоимости сельскохозяйственной продукции составляла 3…7 %. В последующие годы и в настоящее время, когда рост цен на энергоресурсы значительно опережает рост цен на сельхозпродукцию, доля энергозатрат в себестоимости сельскохозяйственной продукции выросла в 3…4 раза.

Отрасль животноводства – одна из основных потребителей тепловой и электрической энергии в сельском хозяйстве. Она ежегодно потребляет до 20 % всех видов топлива от общего его потребления в сельскохозяйственном производстве [1].

По мере восстановления в стране поголовья сельскохозяйственных животных объемы потребления тепловой энергии для приготовления кормов, пастеризации молока, стерилизации молочной посуды и технологического оборудования, а также для создания необходимого микроклимата в помещениях и тепловой санитарной обработки неизбежно будут возрастать.

К концу 90–х годов в Российской Федерации промышленность приступила к производству для нужд животноводства более совершенных и экономичных котлов-парообразователей для получения горячей воды и пара температурой выше 120^{o}С и избыточным давлением до 0,07 МПа. Они работают на жидком топливе утяжеленного фракционного состава, газе, твердом топливе и обеспечивают высокие технико-экономические показатели и экономию светлых нефтепродуктов. Однако, недостаточное финансирование развития животноводства и его материально-технической базы, характерное для последних десятилетий, привело к продолжению использования значительного количества малоэффективных и неэкономичных котлов-парообразователей устаревших марок, существенно снижающих эффективность тепловых процессов в животноводстве [2].

В структуре прямых эксплуатационных издержек на обслуживание поголовья в свиноводстве при использовании техники, предусмотренной системой машин, доля затрат на топливо и электроэнергию составляет примерно от 35 до 40%. В этой связи, экономия топлива и электроэнергии при постоянном росте цен на энергоносители существенно может повысить экономическую эффективность тепловых процессов в животноводстве, и в первую очередь, эффективность влаготермической обработки кормов [2].

Решить проблему снижения затрат на топливо при влаготермической обработке кормов и его экономии можно несколькими путями – за счет: – повышения эффективности работы котлов-парообразователей; – снижения продолжительности тепловой обработки корма в технологической машине; – снижения тепловых потерь в самой технологической линии.

Наиболее перспективным направлением ее решения является применение озонированного воздуха, а также электрических полей высокой напряженности. В настоящее время ведутся научные работы по применению озонированного воздуха и электрических полей, главным образом, для повышения эффективности работы теплогенерирующих установок большой мощности, используемых в коммунальном хозяйстве.

Что же касается использования озонированного воздуха и электрических полей для повышения топливной эффективности работы котлов–парообразователей малой мощности, используемых на фермах, а также интенсификации процессов тепловой обработки корма в технологической машине и снижения тепловых потерь, то они практически не исследованы.

Известно, что применение озонированного воздуха интенсифицирует процесс горения углеводородных топлив, повышает температуру горения, увеличивает теплоту сгорания.

Следовательно, можно полагать, что использование озонированного воздуха в котлах-парообразователях при влаготермической обработке кормов позволит интенсифицировать процесс нагрева корма в технологической машине и снизить тепловые потери, при этом сдерживающим фактором является недостаточный объем исследований, проводимых в данной области, отсутствие рекомендаций по применению озонированного воздуха, а также специального озонаторного оборудования, что предполагает актуальность исследований в этом направлении.

1. ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА КОРМОВ

1.1. Корма и подготовки их к скармливанию

1.1.1. Понятие о корме

Кормами называют продукты растительного, животного, микробиологического и химического происхождения, содержащие питательные вещества в усвояемой форме и не оказывающие вредного воздействия на здоровье животных и качество получаемой от них продукции. Они должны содержать доступные питательные вещества, которые в процессе пищеварения могут быть использованы организмом животного для поддержания жизни построения тканей, органов и регуляции обмена веществ [1].

Продукты, включающие в себя вредные и ядовитые примеси, могут быть использованы в качестве корма только после их полноценного обезвреживания, гарантирующего сохранение здоровья животного, его потомства и качества продукции, употребляемой в пищу человеком.

Корма – это продукты естественного или искусственного происхождения, содержащие питательные вещества в усвояемой животными форме и не оказывающие вредного действия на здоровье животных и качество получаемой от них продукции.

По существу, кормом является любой продукт естественного или искусственного происхождения, который при соответствующем использовании может представлять питательную ценность для сельскохозяйственных животных [2, 3].

Требования, предъявляемые к основным кормам, установлены государственными (ГОСТ), отраслевыми стандартами (ОСТ) и техническими условиями (ТУ). Класс и сорт корма зависит от его вида, количества влаги, протеина, жира, каротина, клетчатки, органических кислот, механических, вредных и ядовитых примесей и ряда других показателей.

В кормлении животных в основном используются корма растительного происхождения, химический состав и питательность которых во многом зависит от почвенных и климатических условий, вида и сорта растений, системы агротехники, норм внесения удобрений, сроков и способов уборки, методов консервирования, условий хранения и технологии подготовки к скармливанию.

При недостатке или избытке в почве отдельных химических элементов (йод, кобальт, медь, фтор, селен и др.) наблюдаются соответствующие изменения в составе растений, в результате чего возникают специфические заболевания растений и животных.

Сумма положительных температур, количество осадков по сезонам года, продолжительность вегетационного периода оказывают влияние на урожайность возделываемых культур и концентрацию органических и минеральных веществ в растениях.

При выращивании кормовых растений в богарных условиях с пониженной температурой воздуха и повышенным количеством осадков наблюдается снижение содержания в них сухого вещества и протеина по сравнению с растениями, выращенными в той же местности, но в годы с теплой и сухой погодой.

Фаза вегетации существенно влияет на химический состав и питательность корма. В растениях в начальную фазу вегетации, по сравнению с более поздней, содержится больше воды, протеина, безазотистых экстрактивных веществ и меньше клетчатки. Сухое вещество такого корма лучше переваривается.

Способы уборки и заготовки трав дают неодинаковые результаты. В сене, заготовленном с помощью активного вентилирования, сохраняется больше питательных веществ, чем в сене из такой же травы, высушенной в поле. Гранулирование травяной муки и тюкование сена способствуют лучшей сохранности каротина.

В период хранения в корнеклубнеплодах (свекла, картофель, морковь и др.) протекают процессы дыхания, связанные с потерей сухого вещества, сахара и крахмала.

Концентрация влаги в кормах, подлежащих хранению, должна находиться в пределах, исключающих возможность поражения их грибами и плесенью, а также возникновения процессов самосогревания. Грубые корма должны иметь влажность 15-17 %, зерно, мельничные отходы – 12-14 %, жмыхи, шроты и травяная мука – 10-12 % [1].

Лучше сохраняются зерновые корма, богатые углеводами; быстрее портятся корма, содержащие много жира и белка. Жмыхи и комбикорма с добавками кормового жира при длительном хранении прогоркают.

При хранении кормов их порча может вызываться низшими организмами и животными-паразитами. Вредное действие таких кормов обусловливается образованием в них продуктов жизнедеятельности микроорганизмов, а также гнилостным разложением кормов.

Способ подготовки кормов к скармливанию может оказать определенное влияние на поедаемость, переваримость и доброкачественность кормов.

Поедаемость жвачными животными грубых кормов среднего качества повышается, если их дают в виде резки (5-8 см) и сдабривают растворами патоки, соли или отрубями [2, 3].

Обработка грубых кормов щелочами (известкование, обработка аммиаком) частично разрушает стенки клеточных оболочек, делает более доступным для пищеварительных ферментов и микроорганизмов их содержимое.

Дрожжевание зерновых кормов позволяет повысить в них содержание белков. Тостирование хлопковых жмыхов и шротов разрушает содержащееся в них ядовитое вещество госсипол. Варка в воде с последующим ее сливом обезвреживает горькие люпины, горчичные, клещевинные, рапсовые жмыхи и шроты, а также освобождает позеленевший картофель от вредного для животного вещества – соланина.

Термическая обработка зерновых злаков денатурирует в них белки, снижает переваримость и питательную ценность. Но при обработке теплом и высоким давлением (тостирование) зерен сои соевый шрот становится более питательным за счет разрушения в них ингибиторов трипсина; переваримость белков может быть повышена на 30-40 %. Переваримость питательных веществ зерновых кормов зависит от степени их измельчения.

Термическая обработка кормов (запаривание, варка) кроме положительного действия может вызывать и отрицательные последствия: денатурирование белков (снижение доступности лизина), потеря водорастворимых витаминов группы В и витамина С.

При смешивании у отдельных кормов проявляется так называемое дополняющее действие, которое позволяет сбалансировать смесь по белковым, минеральным веществам и витаминам до уровня потребности в них животного организма [1].

1.1.2. Классификация и технологические свойства кормов

Все корма для сельскохозяйственных животных и птиц подразделяются на следующие группы: сочные (зеленые корма – трава и зеленая масса, корне- и клубнеплоды, силос, сенаж и др.); грубые (сено, солома, мякина); концентрированные (зерно, отруби, шрот, жмых); животного происхождения (мясокостная и рыбная мука, молоко, обрат и др.); минеральные (соли, мел, ракушка и др.); отходы технического производства (жом, патока и др.); пищевые отходы, протеиновые добавки (мочевина, дрожжи и др.); а так же витамины и микроэлементы [1, 3, 4].

Некоторые авторы придерживаются несколько иной классификации кормов и все кормовые средства подразделяют на объемистые и концентрированные. Объемистые корма, в свою очередь, делят на грубые и сочные [5]. По происхождению различают корма растительные, животные, минеральные подкормки, кормовые добавки микробиологического и химического синтеза,

а также комбинированные. Для практических целей используют следующую классификацию кормов [3, 5].

Корма растительного происхождения: сочные, грубые, концентрированные.

К сочным кормам относят зеленые корма, силос, сенаж, корнеплоды, кормовую тыкву, кабачки, кормовые арбузы. Они характеризуются повышенным содержанием воды (более 40 %). Сочные корма содержат сравнительно небольшое количество белка, жира, клетчатки и большое количество витаминов. В состав сухого вещества сочных кормов входят главным образом крахмал и сахар.

Грубые корма – сено, солома, стержни початков кукурузы, мякина, веточный корм – характеризуются высоким содержанием сухого вещества (до 85 %), в них также присутствуют влага (до 20 %) и клетчатка (до 40 %).

Концентрированные корма – зерно злаков и бобовых, отходы переработки зерна и масличных культур (отруби, жмыхи, шроты, дерть и др.) – имеют высокую питательную ценность, содержат мало клетчатки (6-15 %) и воды (8-15 %). Переваримость кормов составляет 70-90 %. В зависимости от содержания переваримого протеина и углеводов концентрированные корма делят на две группы: протеиновые (семена сои, гороха, бобов и др.), содержащие до 20-25 % протеина, и углеводистые (зерно овса, ячменя, кукурузы, пшеницы, проса и др.), содержащие 60-70 % крахмала.

Концентрированные корма необходимы для балансирования рационов по энергии и питательным веществам.

Зерновые корма (овес, ячмень, кукуруза, рожь и др.) содержат в среднем: 8-12 % протеина, 2-8 % жира, 2-10 % клетчатки, 60-70 % крахмала, 1,5-4 % минеральных веществ. Протеин зерна злаковых культур на 85-90 % состоит из белков.

В зерне бобовых культур в 2-3 раза больше биологически полноценного переваримого протеина, чем в зерне злаковых, но намного меньше жира

(за исключением сои). Содержание переваримого протеина в среднем составляет 20-25 %, а в зерне сои и люпина – до 35 % [5].

Корма животного происхождения: молоко и продукты его переработки, отходы мясной и рыбной промышленности, дрожжи. Они характеризуются повышенным содержанием протеина (30-70 %) и высокой его биологической ценностью. Корма животного происхождения используют прежде всего в рационах свиней и птицы. Их скармливают в сухом и влажном виде: в жидком виде дают молоко, сыворотку; в сухом – мясную и рыбную муку, обезжиренное молоко и др. Эти корма отличаются от растительных отсутствием клетчатки и высоким уровнем полноценного протеина, большим содержанием в белках незаменимых аминокислот (лизина, метионина, триптофана) и наличием витамина B_{12}.

В кормлении животных и птицы корма животного происхождения используют в основном в качестве белковых добавок. Наибольшее практическое значение среди них имеют: молоко и продукты его переработки – обезжиренное молоко, остатки при производстве творога, сыра (сыворотка) и масла (пахта), которые скармливают в свежем виде; остатки от переработки рыбы (рыбная мука, рыбный фарш), а также непищевые сорта рыбы; отходы мясокомбинатов (кровь, мясокостная мука, кровяная мука, технический кормовой жир); отходы птицеперерабатывающей (перьевая мука) и кожевенной промышленности (гольевая мездра, хромовая крошка и стружка), отходы при производстве шелка (куколки тутового шелкопряда).

Рыбная мука – один из лучших белковых кормов, содержащий до 60 % протеина. Рыбную муку скармливают молодняку сельскохозяйственных животных, свиньям и птице, а также используют для приготовления комбикормов, в качестве добавок к рационам, балансирующим их по белку и минеральным веществам.

Для ***мясной*** и ***мясокостной муки*** сырьем служат туши и внутренние органы животных, непригодные для питания человека. В ней содержится 30…60 % протеина. Эту муку используют для приготовления комбикормов.

Минеральные подкормки. К ним относят поваренную соль, ракушку, костную муку, кормовой фосфат, известняки, сапропель (озерный ил), фосфорно-кальциевые подкормки, трикальцийфосфат, преципитат кормовой и др. Промышленность выпускает специальные брикеты, состоящие в основном из поваренной соли с добавкой необходимых микроэлементов. Они служат источником макро- и микроэлементов и используются для балансирования рационов.

Витаминные препараты. Для удовлетворения потребностей животных в витаминах в комбикорма добавляют концентраты витамина А и каротина. Кормовой препарат последнего получают путем микробиологического синтеза. В сухой порошкообразной массе кроме каротина и каротиноидов содержатся белки, жиры и витамины.

Кормовые дрожжи – ценный белково-витаминный корм, отличный компонент комбикорма. Кормовые дрожжи выпускают предприятия мясоперерабатывающей промышленности и спиртовые заводы из отходов в виде сухого продукта (8-10 % влаги). Получают их также из углеводородов нефти и природного газа. В кормовых дрожжах содержится 48-52 % протеина, много витаминов группы В. Протеин кормовых дрожжей близок к протеину рыбной муки. Особенно полезны дрожжи для свиней, птицы и телят. При облучении ультрафиолетовыми лучами дрожжи обогащаются витамином D_2.

Рыбий жир получают из печени трески и витаминизируют, добавляя концентраты витаминов А и D.

Комбикорма и кормовые добавки. Комбикорм представляет собой сложную однородную смесь кормовых средств (зерна, отрубей, кормов животного происхождения, минеральных кормов и др.) и микродобавок, вырабатываемую по научно обоснованным рецептам.

В зависимости от целей использования животных комбикормовые заводы выпускают полноценные комбикорма, комбикорма-концентраты, балансирующие кормовые добавки (белково-витаминные – БВД, белково-витаминно-минеральные – БВМД, белково-витаминно-минеральные концен-

траты – БВМК, минеральные добавки – МД), премиксы и заменители цельного молока.

Полноценные комбикорма содержат все необходимые питательные вещества, обеспечивающие физиологическую потребность животных. Скармливают их в чистом виде без добавления других видов кормов.

Комбикорма-концентраты служат дополнением к основному рациону, состоящему из грубых, сочных и других кормов. С их помощью компенсируют недостаток важнейших питательных веществ в основных кормах рациона. Промышленность выпускает комбикорма-концентраты для дойных и сухостойных коров, молодняка животных разного возраста и др.

Балансирующие кормовые добавки (БВД, БВМД, БВМК и др.) представляют собой однородные смеси измельченных до нужной степени высокобелковых средств и микродобавок. Их используют главным образом для приготовления комбикормов на основе зернофуража.

Премиксы – смеси измельченных до определенной величины различных веществ (минеральных кормов, аминокислот, витаминов, антибиотиков и др.) и наполнителя, используемые для обогащения комбикормов, БВД, БВМК, БВМД, МД и других балансирующих добавок.

Предприятия комбикормовой промышленности вырабатывают 1%-е премиксы для животных различных видов и групп. В качестве наполнителя используют пшеничные отруби, зерно пшеницы тонкого помола, соевый шрот и др. Их добавляют в комбикорма из расчета 10 кг/т. Вырабатывают также премиксы с повышенным содержанием биологически активных веществ, т.е. более концентрированные, рассчитанные на ввод их в комбикорма в количестве 2,3 или 5 кг/т.

Заменитель цельного молока (ЗЦМ) представляет собой смесь высококачественных продуктов – сухого и свежего обезжиренного молока, сухой молочной сыворотки, животных и кулинарных жиров, витаминных, минеральных и вкусовых добавок. В составе ЗЦМ 80 % сухого обезжиренного мо-

лока, 15 % растительной саломассы (гидрогенизированного растительного жира) и 5 % фосфатидного концентрата.

Заменитель цельного молока позволяет полностью или частично заменить цельное молоко при выращивании молодняка сельскохозяйственных животных. Заменители готовят в виде сухого порошка. Перед скармливанием его разбавляют водой: на 10 кг восстановленного ЗЦМ берут 1,25 кг сухого ЗЦМ и 8,5 л воды. Температура готовой смеси должна быть 38^{o}С [1, 5, 6, 7].

Для успешной реализации технологических процессов при обработке, приготовлении и раздаче кормов необходимо применение известных их технологических свойств, в частности физико-химического состояния, питательных достоинств и доброкачественности.

К технологическим (физико-химическим) свойствам кормов относятся: консистенция, влажность, плотность, стойкость при хранении и др. Все эти свойства необходимо учитывать при обработке кормов [2].

1.1.3. Оценка кормов и улучшение их качеств

Известно, что качественный корм для сельскохозяйственных животных является основой успешного развития всего животноводства.

Основными причинами, снижающими качество кормов являются, в первую очередь, несоблюдение агротехнических требований их возделывания и хранения, что приводит к поражению их микроскопическими грибами, которые могут способствовать снижению сопротивляемости организма животных к инфекционным и другим заболеваниям.

Так, интенсивное поражение кормов подавляющим большинством плесневых грибов происходит при затяжной уборке и хранении кормов, имеющих повышенную влажность. Уборка зерновых в дождливую погоду, сопровождающаяся прорастанием семян в валках, – наиболее частая причина поражения зерновых и грубых кормов токсинообразующими грибами. Хранение свежеубранного зерна в плохо приспособленных складских помещени-

ях при высокой влажности и температуре – другая важная причина его заплесневения и образования в нем микотоксинов.

Несоблюдение условий и сроков перевозки и хранения готовых комбикормов, особенно обогащенных различными микродобавками, является одним из важных факторов поражения их микотоксинами. Наиболее благоприятными условиями для роста грибов и образования микотоксинов являются: влажность зерна выше 15-20 %, окружающего воздуха – 85-95 % (относительная влажность), температура субстрата (зерна или другого корма) и окружающего воздуха в пределах от 4 до 30 ^{o}C. Отдельные грибы быстро растут и размножаются при температуре до +20 ^{o}C (фузарии, пенициллы, стахиоботрис, дендродохиум), другие – при более высокой температуре (от +30 до -50 ^{o}C). Такие условия могут создаваться в буртах при хранении зерна высокой влажности. Зерно, клеверное и люцерновое сено, гороховая солома, вико-овсяная смесь, подвергшиеся самосогреванию, во всех случаях поражены аспергиллами, среди которых значительный процент составляют токсинообразующие виды [4].

Грубые корма (сено, солома) поражаются токсинообразующими грибами при тех же условиях, что и зерно. Длительное нахождение скошенных кормов непосредственно на почве, особенно во время продолжительной влажной погоды, хранение соломы небольшими кучками под снегом благоприятствуют размножению, росту и токсинообразованию грибов рода фузариум.

Сочные корма (силос, сенаж, корнеплоды) поражаются токсигенными плесневыми грибами при нарушении технологии их закладки и несоблюдении режимов хранения.

К важным факторам возникновения микотоксикозов относят и неудовлетворительное содержание и кормление животных.

Первичную оценку кормов следует осуществлять путем визуального (органолептического) анализа. Так, при анализе грубых кормов и зерна об-

ращают внимание на наличие головни и спорыньи, паразитирующих на злаках в период их вегетации.

При поступлении и исследовании дефектного или подвергшегося самосогреванию зерна определяют степень его порчи. По органолептическим показателям различают четыре степени дефектности зерна:

первая – зерно имеет солодовый запах; цвет внешних покровов зерна без изменений; эндосперм с нормальным оттенком;

вторая – зерно с плеснево-затхлым запахом; внешний покров без блеска, потемневший; эндосперм и зародыш при поражении их микроорганизмами могут быть темными;

третья – зерно имеет плеснево-гнилостный запах; цвет внешних покровов зерна темный; эндосперм кремовый; зародыш поражен;

четвертая – зерно с гнилостным запахом; эндосперм коричневый.

Зернофураж первой и второй степени дефектности подвергают дальнейшему санитарно-микологическому исследованию с целью определения его пригодности к скармливанию животным.

Считаются недоброкачественными и непригодными к использованию:
– непрессованное сено или солома, пораженные грибами более чем на 10 % (горелое, заплесневелое, с затхлым запахом); прессованное, содержащее более 10 % кип с прослойками заплесневелой соломы (сена) с затхлым запахом;
– комбинированные корма, отруби, дрожжи и мучка, кормовые жмыхи, шроты, мука кормовая рыбная и кормовая животного происхождения, имеющие затхлый, плесневелый, гнилостный и другие запахи, не свойственные данным продуктам, а также комковатость и устанавливаемое визуально заплесневение;
– зерно фуражное третьей и четвертой степени дефектности.

Корма, содержащие микотоксины, обезвреживают одним из следующих способов [4]:

1. Обработку фуража проводят при высокой температуре на сушильных агрегатах типов АВМ, СЗБ и других (температура теплоносителя 300 ^{0}С, время обработки 10-12 мин).
2. Комбикорма обезвреживают:

   – гранулированием на всех видах прессов-грануляторов при давлении пара 400-500 кПа;

   – автоклавированием при 150 кПа в течение одного часа;

   – провариванием при температуре 100 ^{0}С в течение двух часов в 0,1 % растворе гидрокарбоната кальция.
3. Зеленый корм обезвреживают гранулированием.
4. Солому и сено детоксицируют обработкой:

   – аммиаком (120 л 25 %-ной аммиачной воды на одну тонну соответственно);

   – натрия гидроокисью (2-3 %-ный раствор каустической соды, погружение корма на 2-3 минуты, укладывание на наклонные плоскости и выдержка перед скармливанием 24 часа);

   – негашеной известью (3 кг негашеной извести на 100 кг корма разводят в 250-300 л воды, корм погружают на 10 минут перед скармливанием, выдерживают 24 ч).
5. Зернофураж, кроме тепловой обработки, можно обезжиривать:

   – натрия пиросульфитом (10 %-ный водный раствор из расчета 8 л на 100 кг корма с последующей выдержкой в течение 48 часов) и сушкой (температура носителя агрегата 180-200 ^{0}С);

   – натрия пероксидом (2-3 %-ный водный раствор из расчета 0,4 л на 1 кг корма в течение 24 часов).

Содержание микотоксинов в кормах после обработки обезвреживающими средствами не должно превышать принятые максимально допустимые уровни (МДУ) (таблица 1.1) [4].

Если после обработки в кормах концентрация микотоксинов превышает МДУ, то проводят повторную обработку или разбавление его благополучным кормом (не более 5 % от рациона).

Таблица 1.1 Максимально допустимые уровни содержания микотоксинов в кормах после обработки обезвреживающими средствами

Микотоксины	Корма, вид животных, половозрастные группы	МДУ
Афлатоксин B_1	Комбикорма для кур-несушек и бройлеров	25 мкг/кг
	Комбикорма для дойных коров и поросят старше двух месяцев	50 мкг/кг
	Корма для телят и овец старше четырех месяцев, откормочного поголовья и быков-производителей	100 мкг/кг
Дон	Фуражное зерно и продукты его переработки	2 мг/кг
	Комбикорма для всех видов животных	1 мг/кг
Зеараленон	Комбикорма для свиноматок, ремонтного молодняка до двухмесячного возраста, хряков-производителей	Не допускается
	Фуражное зерно, поступающее по импорту	1 мг/кг
	Корма для свиней на откорме массой до 50 кг	2 мг/кг
	Корма для свиней на откорме массой свыше 50 кг	3 мг/кг
Охратоксин А	Комбикорма для поросят от 15 до 120-дневного возраста, супоросных и подсосных свиноматок, племенных хряков и ремонтного молодняка	Не допускается
	Корма для откормочного поголовья	10 мкг/кг
Патулин	Корма для стельных коров, супоросных и подсосных свиноматок	Не допускается
	Корма для птицы и животных на откорме	0,5 мг/кг

Следует помнить, что все имеющиеся и поступающие в хозяйства корма должны находиться под постоянным контролем зооветеринарных специалистов, использоваться в рационах с учетом их микотоксикологического анализа и санитарного состояния, результатов лабораторных исследований. Партии кормов с высокими санитарными качествами хранят отдельно и в первую очередь реализуют при кормлении беременных животных, племенного поголовья и молодняка. Зерновые корма с пониженным санитарным качеством – некондиционное зерно первой и второй степени дефектности, свободное от микотоксинов, используют в рационах откормочных животных после предварительной термической обработки и проверки на токсичность. Вначале такие корма используют на небольшом поголовье малоценных животных.

Длительное применение таких кормов в хозяйстве должно быть запрещено из-за возможности снижения их санитарного качества в результате развития токсигенных грибов с выработкой микотоксинов.

В НИИ технологии, биохимии и питания сельскохозяйственных животных установлено, что использование неполноценных комбикормов приводит к увеличению затрат на производство продукции животноводства по сравнению с нормативными в 1,5-2,5 раза [4].

На современном этапе в условиях рыночной экономики производство и использование высококачественных кормов приобретает стратегическое направление. По подсчетам экономистов, 35-40 % грубых и сочных кормов реализуется в настоящее время как товар [6]. Кроме того, при внутрихозяйственной специализации корма передаются в животноводческие подразделения на основе расчетных цен с учетом их качества. Взаиморасчеты за поставленные корма должны осуществляться с учетом ассортимента, количества и качества. Для экономического стимулирования решения проблемы кормового протеина целесообразно цены за корма III класса принять как базовые, а за корма I и II классов увеличивать пропорционально содержанию в них сырого протеина (аналогично закупкам сахарной свеклы с учетом содержания сахара, масличных культур – масла). Внедрение такого ценообразования будет

способствовать повышению протеиновой питательности, что в свою очередь повлечет за собой рост продуктивности животных. Расчеты показывают, что только за счет повышения качества кормов можно увеличить на треть объемы производства продукции животноводства [8].

1.1.4. Подготовка кормов к скармливанию

Рациональное использование имеющихся кормов, максимальное усвоение их питательных веществ в организме животных обеспечиваются различными способами подготовки к скармливанию. В настоящее время наука и передовая практика располагают многими прогрессивными приемами улучшения качества заготовленных кормов, повышения их переваримости и усвояемости питательных веществ.

Основные способы подготовки кормов к скармливанию: физические, химические и биологические [6].

Физические способы – измельчение, дробление, плющение, смешивание, запаривание – применяются для повышения поедаемости кормов, улучшения их технологических свойств.

Химические способы (щелочная, кислотная обработки кормов) позволяют повысить доступность для организма трудноперевариимых питательных веществ, расщепляя их до более простых соединений.

Биологические способы – дрожжевание, силосование, заквашивание, ферментативная обработка и другие повышают поедаемость и переваримость кормов.

Перечисленные способы подготовки можно применять в различных сочетаниях в зависимости от вида кормов и групп животных, которым их скармливают, и практической целесообразности для каждого хозяйства.

Цели, преследуемые при подготовке кормов, могут быть различными [6].

1. Повысить поедаемость корма.

2. Улучшить вкус кормов – сделать их более приятными (например, поджаривание зерен, при котором в них появляются продукты декстринизации и карамелизации углеводов зерна становятся сладковатыми и охотнее поедаются животными, в частности поросятами-сосунами).

3. Повысить переваримость кормов (например, приготовление сенной муки, скармливаемой свиньям, приводит к значительному повышению переваримости такой муки по сравнению с переваримостью нормального сена).

4. Обезвредить корма. Некоторые кормовые средства содержат алколоиды, глюкозиды и другие соединения, могущие причинить вред животным. Обработка этих кормов перед скармливанием позволяет предупредить такой вред. Так, прогревание жмыха из семян хлопчатника позволяет освободиться от активной формы госсипола. Варка картофеля со сливанием варочной воды позволяет удалить выщелачиванием соланин, содержащийся в клубнях сырого картофеля. Пропаривание соломы и мякины, особенно зараженных грибками, варка пищевых отходов тоже являются аналогичными приемами обеззараживания. Перечисленные приемы преследуют цель обеззаразить корм.

5. Обогатить корма в некоторых отношениях, иногда и за счет частичной потери содержащихся в корме питательных веществ. К таким приемам следует отнести обработку мучнистых кормов крутым кипятком с последующей выдержкой смеси в горячем состоянии. Это так называемое осолаживание. При нем крахмал осахаривается и тесто становится сладким на вкус, обогащенным легкоперевариымыми сахарами, до мальтозы включительно. Проращивание зерен приводит к повышению их витаминности. Если проращивание ведут до белого ростка, зерно обогащается витаминами комплекса В и витамином С, если до зелени, то и каротином.

Разностороннее обогащение мучнистых кормов, улучшение вкуса и поедаемости достигается их дрожжеванием. Сочетание различных кормов, дополняющих друг друга, дает смесь, которая вкуснее, лучше переваривается и эффективнее используется, чем каждый из компонентов в отдельности. Сюда же следует отнести и обогащение кормов минеральными веществами за счет

минеральных добавок, витаминами или другими биологически активными веществами за счет соответствующих препаратов, обогащение легкоперевариимыми углеводами – меляссированием и другими приемами подготовки.

Для корнеплодов и картофеля необходимым приемом их подготовки должно присутствовать мытье и очистка. Если корнеплоды и картофель загрязнены, убирались в дождливую погоду и собраны с участков с тяжелыми глинистыми почвами, их нужно мыть обязательно. Частицы земли, попадающие в пищеварительный тракт, причиняют вред нормальному пищеварению и здоровью животных.

Корма нужно подготавливать, если это оправдывается экономически – ведет к увеличению продуктивности, предотвращает заболевания животных или помогает хозяйству бороться с бескормицей и, если расходы на подготовку меньше или, в крайнем случае, равны получаемой прибавке дохода.

1.2. Классификация и характеристика основных способов тепловой обработки кормов

На современном этапе развития животноводства в стране особое внимание уделяется углубленной переработке зерновых компонентов кормового сырья в целях повышения перевариваемости и усвояемости содержащихся в них питательных веществ.

Установлено, что в условиях промышленного производства продукции животноводства и птицеводства основой кормового рациона животных являются комбикорма, поэтому требования к их качеству постоянно повышается. Прежде всего, это относится к питательности комбикормов, улучшению их санитарного состояния и эффективному использованию сырьевых ресурсов.

Ключевым звеном в общей технологии производства комбикормов высокого качества является различные виды тепловой обработки комбикормов и их компонентов. Тепловая обработка повышает кормовые свойства комби-

кормов, обеспечивает их обеззараживание до необходимого уровня, что позволяет существенно расширить сырьевую базу при их производстве.

Повышению питательной ценности комбикормов уделяется особое внимание. Безазотистые экстрактивные вещества (БЭВ), основную долю которых составляет крахмал (60-72 %) – один из главных источников энергии для животных. Плохая переваримость крахмала приводит к значительному расходу физиологической энергии животного. Молекулы зерен крахмала прочно связаны между собой и проникновение в них микрофлоры желудка затруднено.

Изменение свойств углеводов зерна, прежде всего, крахмала, наблюдается при различных видах тепловой обработки. При влажности продукта выше 15 % и температуре более 65 ^{o}C происходит клейстеризация крахмала – гранулы эндосперма деградируют, разделительные перегородки разрушаются, образуется сплошная гомогенная масса с выраженными клеящими свойствами, находящаяся во вязко-текучем состоянии. Такой крахмал легче расщепляется на простые углеводы, т.е. проявляет более высокую податливость действию ферментов.

1.2.1. Классификация способов тепловой обработки кормов

Все интенсивные технологии выращивания животных и птицы в последние десятилетия предусматривают широкое использование специальных способов обработки кормовых компонентов, комбикормов и их смесей.

К специальным способам обработки кормов, изменяющим их структурно-механические и биохимические свойства, относится обработка зерна паром, теплом, ИК-излучением и давлением – это поджаривание, пропаривание с последующим поджариванием, пропаривание с плющением (флокирование), микронизация, экструдирование, экспандирование и др.

Применение этих способов обеспечивает повышение переваримости питательных веществ, текстурирование корма и улучшение его санитарно-

гигиенического состояния за счет стерилизации продукта и инактивации антипитательных веществ [9-13].

Эффективность использования зерновых компонентов комбикормов, обработанных тепловыми способами на 10-15 % выше дробленных [13, 14].

В зависимости от методов воздействия на обрабатываемый корм все способы тепловой обработки подразделяются на три основные группы: термические, влаготермические и термомеханические (рисунок 1.1) [4, 9].

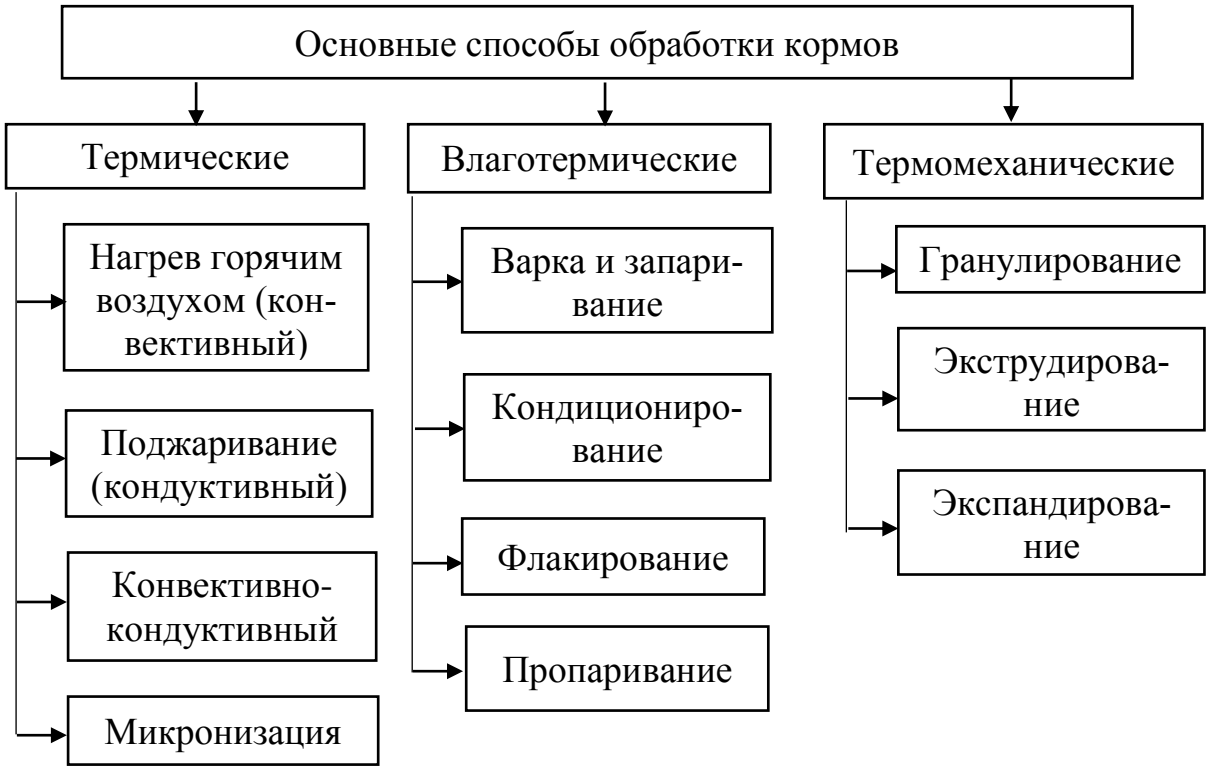


Рисунок 1.1 – Классификация основных способов тепловой обработки кормов

1.2.2. Термические способы обработки кормов

К термическим способам относятся нагрев корма горячим воздухом, поджаривание, микронизация и др., которые используются, главным образом, для обработки фуражного зерна и зерновых смесей.

Нагрев горячим воздухом. Обработка фуражного зерна горячим воздухом способствует наибольшему преобразованию углеводов и белков в доступную форму. Наилучшие результаты достигаются при обработке зерна в

кипящем слое горячим воздухом с температурой 300°С при влажности зерна 16 % и скорости продувки слоя 1-5 м/с. При обработке зерна в кипящем слое в течение 2 минут с температурой 180-200°С зёрна вспучиваются и растрескиваются, их насыпная масса уменьшается до 240-300 кг/м^3 (против 650-675 кг/м^3 – необработанного). Количество декстрина в эндосперме ячменя, подвергнутом предварительному пропариванию, достигает 20 %, вследствие чего переваримость крахмала возрастает в 2-2,5 раза, а переваримость протеина остается на начальном уровне – денатурация отсутствует.

Для интенсификации процесса нагрева возможно сочетание различных способов подвода тепла к продукту. Процесс нагрева зерна протекает более интенсивно при сочетании конвективного и кондуктивного способов [4,12,15].

В последние годы проведены исследования процесса обжаривания ячменя с использованием перегретого пара [16]. Перегретый пар является инертным теплоносителем, обладает высоким энергетическим КПД, удельной теплоемкостью и коэффициентом теплоотдачи, что позволяет исключить окисление жиров продукта за счет отсутствия кислорода.

Поджаривание. Используется при подготовки зерна поросятам-сосунам с целью приучения их к поеданию корма в раннем возрасте, стимуляции секреторной деятельности пищеварения, лучшего развития жевательных мышц. При поджаривании часть крахмала распадается до моносахаридов, что делает зерно сладковатым на вкус, но при этом вследствие денатурации белка несколько снижаются переваримость протеина и доступность аминокислот. Вместе с этим, высокая температура губительно действует на бактериальную обсемененность и различные виды грибов зерна, что позволяет в значительной степени избежать возможных заболеваний желудочно-кишечного тракта попросят.

Поджаривают обычно зерно, широко используемое в кормлении свиней: ячмень, пшеницу, кукурузу, горох. Предварительно увлажнив до стадии набухания, зерно тонким слоем насыпают на железные листы или металличе-

ские кюветы и, равномерно помешивая в течение 10-12 минут, поджаривают при температуре 100-180 ^{o}С до появления светло-коричневого или коричневого цвета. По достижении такой окраски зерно быстро охлаждают.

Для приготовления больших объемов поджаренного зерна применяют цилиндрические жаровни, режим работы которых, в зависимости от вида зерна (ячмень, кукуруза, соя и др.) устанавливается углом наклона жаровни при постоянной подаче газа на горелки.

Поджаренное зерно скармливают поросятам с 5-7 дневного возраста до отъема, начиная с малых доз (30-50 г) и постепенно доводя суточную норму до 120-150 г [15, 17].

Микронизация является одним из наиболее прогрессивных способов подготовки фуражного зерна к скармливанию. Способ заключается в обработке фуражного зерна интенсивным потоком инфракрасного излучения с целью повышения его кормовых свойств. Поток ИК-излучения способен проникать в обрабатываемый материал, вызывая его интенсивный нагрев. С ростом температуры изменение фазового состояния находящейся в зерне влаги проходит в три стадии: нагрев, парообразование, пароперегрев. Когда давление перегретого пара превысит прочность оболочек зерна, происходит своеобразный «взрыв», разламывающий зерно и выворачивающий эндосперм наружу. Под действием высоких температур и давления увеличивается объем зерна, понижается его прочность, изменяется физико-химическая структура за счет желатинизации и застудневания. Происходит нарушение связи крахмальных гранул с белковой матрицей, объясняемой взаимодействием значительных градиентов температуры и влажности. Определенная роль при взрыве крахмальной гранулы принадлежит конформацоинным изменениям полисахаридных цепей амилозы. Их быстрое развертывание приводит к резкому увеличению объема крахмальных зерен. Этим объясняются процесс деструктизации полимера и увеличение степени декстринизации крахмала.

Значительный эффект достигается при микронизации бобовых культур. Так, в результате микронизации сои происходит инактивация ингибитора

трипсина и других антипитательных веществ, а ее энергетическая ценность возрастает с 1600 до 3460 ккал/кг [8, 12].

Микронизация зерна не только повышает питательную ценность, но и способствует улучшению его санитарного состояния, так как приводит к разрушению термостабильных токсинов микробного происхождения, которые по силе действия превосходят многие канцерогены.

Применение кормов с микронизированными зерновыми компонентами в кормлении сельскохозяйственных животных на различных стадиях выращивания способствует повышению их продуктивности на 5-34,1 % и снижению расхода корма на 4-21,1 %. Так, при кормлении коров установлено увеличение среднесуточного удоя молока на 5,6-11,3 % при меньшем (на 4,3-8,2 %) расходе концентрированных кормов [11].

После микронизации зерно наиболее целесообразно подвергать плющению, так как это повышает содержание декстринов в готовом продукте на 0,8-1,2 %.

Возможность подвергать микронизации зерно с повышенной исходной влажностью создает хорошие предпосылки для создания на базе микронизатора и плющилки линии для тепловой обработки влажного зерна. Это наиболее эффективно при неблагоприятных погодных условиях и в условиях острого дефицита жидкого топлива, используемого при сушке до кондиционной влажности фуражного зерна.

Поскольку микронизация представляет собой процесс интенсивного ИК-нагрева зерна до 120 ^{o}С мощностью свыше 10 кВт/м^{2}, то основным его недостатком является большой расход энергии, достигающий 250 кВт·ч/т, что увеличивает на 25-50 % себестоимость корма [10, 13, 15, 17-19].

1.2.3. Влаготермические способы обработки кормов

В производстве кормов и особенно комбикормов широко применяются различные способы влаготермической обработки, задача которых состоит в направленном изменении технологических и питательных свойств кормовых продуктов.

Доказано, что именно влага является решающим фактором и активатором всех превращений в продукте при влаготермической обработке. Тепло и давление увеличивают скорость реакций и уменьшают длительность проникновения влаги внутрь частиц продукта. При этом пар действует сильнее воды, воздействуя одновременно на два градиента – температуру и влагосодержание. Продолжительность влаготермической обработки определяется массообменными и теплофизическими характеристиками исходного сырья, глубиной преобразований структурных и технологических свойств готового продукта и интенсивностью влаготепловых потоков [20].

К влаготермическим способам относятся варка, запаривание, кондиционирование, пропаривание и др.

Варка и запаривание применяются при использовании в кормлении свиней зернобобовых: гороха, сои, люпина, чечевицы. Эти корма предварительно измельчают, а затем в течение одного часа варят или пропаривают 30-40 минут в кормозапарнике. Такая обработка кормов позволяет инактивировать находящиеся в них антипитательные вещества, снижающие эффективность их использования. После обработки зернобобовые используют в качестве белковых добавок в количестве 25-30 % от общей питательности рациона [17].

Не рекомендуется варить и запаривать зерно хорошего качества. Недоброкачественное, длительно хранившееся и пораженное патогенной микрофлорой зерно подлежит обязательной обработке.

Варке и запариванию могут подвергаться корнеклубнеплоды перед их скармливанием, а также пищевые отходы. Недостатками варки и запаривания кормов являются повышенные удельные энергозатраты и особенно жидкого топлива, высокая материалоемкость оборудования, невозможность длительного хранения обработанного корма [1, 6, 17].

Пропаривание **–** это обработка паром корма при атмосферном давлении и температуре до 100^{o}С. Обработка зерна паром при атмосферном давлении приводит к быстрому нагреву и увлажнению, качественные показатели

его изменяются незначительно: при продолжительности обработки до 10 минут степень клейстеризации крахмала составляет 12-13 %, а количество декстринов увеличивается на 1,0-1,1 %. Под действием плющения в пропаренном зерне степень клейстеризци крахмала дополнительно повышается на 25-30 %, при уменьшении зазора между валками значение этого показателя увеличивается. Переваримость крахмала повышается с увеличением степени клейстеризации его и наибольшего значения достигает при 100 %-ой клейстеризации. Пропаривание при атмосферном давлении пара в пределах 10 минут не оказывает влияния на переваримость протеина, только при продолжительном пропаривании и избыточном давлении наблюдается некоторое снижение переваримого протеина [15].

Для улучшения качественных показателей зерна после пропаривания его можно подвергать плющению или гранулированию. Обработанное таким способом зерно превращается в хлопья толщиной 0,8-1,0 мм, эффективность использования которых увеличивается на 10-15 % по сравнению со скармливанием сухого размолотого зерна.

Кондиционирование **–** современный прием влаготермической обработки, в зависимости от цели он отличаются значениями и сочетанием факторов внешнего воздействия на материал.

Во всех известных технологиях нагрев (предварительный или основной) продукта осуществляют паром, непосредственно соприкасающимся с продуктом. Пар дает возможность сообщить частицам продукта быстро (в течение 20-30 с) заданную относительно высокую температуру (60-80^{o}C). Это быстродействующее тепло приводит к значительному ослаблению межмолекулярных связей частиц продукта, что способствует декстринизации крахмала и улучшает его технологические свойства.

Самым простым способом влаготепловой обработки является скоростное кондиционирование. Оно достигается в результате равномерного прогрева комбикорма в кондиционере-смесителе сухим перегретым паром с давлением 3,5-4,5·10^{5} Па в количестве 50-60 кг пара на 1 т продукта. При этом

температура рассыпного комбикорма повышается до 75-85 ^{0}С. Продолжительность обработки 10-30 с. Скоростное кондиционирование является основным и наиболее распространенным приемом предварительной подготовки к таким важным операциям, как гранулирование, экспандирование, флакирование, экструдирование и т.п. Практически нет ни одного звена в теплотехнологии современных комбикормовых предприятий, которое не было бы связано с такой обработкой продукта [16, 17, 20].

Аппараты длительного кондиционирования, в отличие от скоростного кондиционера, позволяют вести обработку продукта в течение не 20-30 с, а 2-4 мин и более (до 40 мин.). Существует несколько способов такого кондиционирования.

Первый способ длительного кондиционирования осуществляется в аппаратах периодического или непрерывного действия, продолжительность теплового воздействия в которых на продукт может регулироваться от 2 до 10 мин. При этом происходит не только нагрев материала, но и его пропаривание, которое положительно сказывается на дальнейшей переработке после кондиционирования на гранулировании или плющении. Длительная обработка частиц обеспечивает более высокое содержание разложенного крахмала, сахара и протеина и адсорбирование жира, мелассы, витаминов, энзимов и др.

Второй способ длительного кондиционирования предполагает, что продукт, обогащенный жидкостью при скоростном (кратковременном) кондиционировании, загружают в емкость для созревания, где его перемешивают и выдерживают в течение 20-40 минут. Таким образом, достигается нужное гидротермическое воздействие, которое состоит в адсорбции мелассы или другой жидкости, в переводе в удобную для усвоения форму крахмала и протеинов и в снижении содержания бактерий.

Для повышения эффективности влаготепловой обработки кормовых продуктов в последнее время классические технологии влаготермической обработки стали дополнять приемами воздействия повышенным давлением.

Причем давление в процессе обработки можно регулировать и повышать до $20 \cdot 10^5$ Па и выше. Обработка продукта под давлением при высокой температуре (до 130-250^{o}С) в течение короткого времени (1-5 с), по данным зарубежных фирм Амандус Каль (ФРГ) и Минеба (Голландия), повышает питательные свойства крахмала на 10 %, дает возможность добавлять большое количество жидких компонентов, уменьшает антипитательный фактор трипсина, обеспечивает гигиену корма, избавляет от колибактерий, сальмонеллы и плесневых грибков [20].

Флокирование **–** технология обработки зерна сходня с обычным плющением, но при флокировании время обработки зерна теплом (паром) увеличивается до 12-14 минут, а температура должна быть в пределах 94^{o}С. Продолжительность пропаривания зависит от вида и влажности исходного сырья [6].

При одновременном воздействии тепла и влаги в течение более длительного времени в зерне протекают такие же процессы как и при плющении. В результате такой обработки зерна получается мягкий, легкоусвояемый, хлопьевидный продукт, отличающийся хорошими вкусовыми качествами.

Флокированный корм используется для кормления КРС, свиней, овец. Особенно он полезен молодым животным.

1.2.4. Термомеханические способы обработки кормов

Они применяются, главным образом, для тепловой обработки фуражного зерна, которое является основным структурным компонентом (80 %) комбикормов. Поэтому повышение питательности фуражного зерна положительно сказывается и на повышении качества комбикормов.

К термомеханическим способам обработки кормов относятся: гранулирование, экструдирование и экспандирование.

Гранулирование. В отечественной практике производства комбикормов наибольшее распространение получил процесс гранулирования, который частично обеспечивает превращение питательных веществ в более доступные

для организма животного формы, снижает бактериальную обсемененность корма, значительно сокращает его потери при транспортировании, хранении, раздаче животным и др. Так, степень декстринизации крахмала гранулообразных комбикормов превышает 40 %, что позволяет снизить удельные затраты кормов в 1,3…1,5 раза, а гранулирование комбикормов при избыточном давлении пара 0,42 МПа обеспечивает уничтожение плесневых грибков на 98…99 % от их первоначального содержания [4,9,10].

Гранулирование комбикормов является процессом термопластической формовки мучнистых смесей в гранулы (преимущественно круглой формы ∅ 2,4…20 мм и длиной 1…1,5 диаметра), в процессе которой происходит частичная варка составных частей комбикорма, которая затем ускоряет процесс пищеварения у животных. При гранулировании происходит также гидротермическая обработка, в результате чего крахмал злаковых культур превращается в сахар. Осахаривание повышает кормовую ценность гранулированного корма.

После гранулирования комбикорма увеличивается его плотность, гранулы имеют повышенную плотность по сравнению с рассыпным комбикормом, что способствует более эффективному использованию складских помещений и транспортных средств. Гранулы обладают хорошей сыпучестью, их удобно хранить в обычных зерновых силосах с конусами под углом 45^{o}, из которых они свободно выходят. Гранулы хорошо транспортируются механическим и пневматическим транспортом без нарушения гомогенности комбикорма, удобны для погрузки и выгрузки при доставке бестарным способом на животноводческие фермы.

Наиболее эффективно использование гранулированных кормов в кормлении жвачных животных и птицы. В свиноводстве гранулированные корма тоже находят широкое применение.

Различные конструкции грануляторов по принципу действия можно разделить на два основных типа: первый основан на принципе брикетирования (сжатия мучнистых комбикормов), второй – выдавливания мучнистых

комбикормов через отверстия матрицы. Наибольшее распространение на практике получил второй способ [20, 21].

Экструдирование. Одним из эффективных способов воздействия на биохимические показатели зерновых компонентов является обработка в экструдерах, в которых продукт подвергается действию высокого давления и температуры.

Измельченное зерновое сырье влажностью 12-16 % поступает в экструдер, где под действием высокого давления (2,8-3,8 МПа) и трения зерновая масса разогревается до 120-150 ^{o}С. Затем вследствие быстрого перемещения ее из зоны высокого давления в зону атмосферного происходит так называемый «взрыв», в результате которого гомогенная масса вспучивается и образует продукт микропористой структуры.

Вследствие желатинизации крахмала, деструкции целлюлозно-лигниновых образований значительно улучшается его кормовая ценность. Количество крахмала при этом уменьшается на 12 %, а декстринов (продуктов первичного гидролиза крахмала) увеличивается более, чем в 5 раз, количество сахара возрастает на 14 %. При этом значительно улучшается санитарное состояние зерна. Под действием высокой температуры и давления почти полностью погибают патогенная микрофлора и плесневые грибы.

Одним из основных показателей качества готового продукта (экструдата) является степень «взорванности» (отношение массы размолотого зерна к массе размолотого экструдата).

Экструдированный корм наиболее целесообразно использовать для кормления поросят младших возрастов, поскольку их пищеварительная система не способна расщеплять сложные питательные вещества рациона. При использовании экструдированного зерна в составе рационов для молодняка свиней увеличивается переваримость сухого вещества на 2,1 %, органического – на 1,9, сырго протеина – на 4,5, сырого жира – на 3,8 %. Экструдированным горохом в комбикормах для поросят-сосунов можно заменять до 50 % по массе кормов животного происхождения (сухой обрат, рыбная, мясокост-

ная мука), а для поросят старше двухмесячного возраста этим кормом можно полностью заменить корма животного происхождения.

Наиболее эффективно использовать экструдированный комбикорм в первые два месяца жизни поросят, особенно при раннем их отъеме. С двух-, трехмесячного возраста они поедают такой корм в меньшем количестве, но при этом энергия роста не снижается. Экструдированный комбикорм целесообразно скармливать поросятам в сухом виде без дробления гранул при постоянном обеспечении их водой [4, 9, 15, 21, 22].

Экструдирование позволяет расширить сырьевую базу производства комбикормов за счет использования производственных отходов. Процесс производства отходов предусматривает их измельчение, термообработку, во время которых происходит клейстеризация крахмала, уничтожаются микроорганизмы, разрушаются токсичные вещества. Это позволяет вырабатывать недорогой высокопитательный корм и одновременно решать проблемы охраны окружающей среды.

Обсемененность микрофлорой рассыпных комбикормов и кормовых добавок значительно выше, чем подвергшихся тепловой обработке. Объясняется это действием на микрофлору высоких температур при влаготепловой обработке. Таким образом, бесспорными методами улучшения санитарного состояния сырья и комбикормов является сушка, экстудирование, экспандирование и гранулирование. Бактериальная и грибковая обсемененность инактивируется на 85-99 %.

При экструдировании происходит полное инактивирование кишечной палочки, протея, сальмонеллы, стафилококков, снижение общей бактериальной обсемененности на 98,8-99,8 % и грибной на 88,7-89,6 %, снижается степень токсичности [23, 24].

Технология экструдирования компании «Инста-Про» (США) предусматривает как сухую экструзию, где процесс происходит при помощи тепла, которое вырабатывается при прохождении экструдируемого продукта через

несколько шнековых ограничителей в стволе экструдера, так и с использование пара.

Для этого экструдер оснащен кондиционером для предварительной обработки сырья паром. Использование пара удваивает производительность и уменьшает износ рабочих частей экструдера.

Процесс сухой экструзии занимает менее 30 с. За это время сырье проходит несколько стадий обработки:

– тепловую (температура 120-175^{o}C), которая улучшает переваримость питательных веществ и улучшает вкусовые качества продукта, обеззараживает его;

– механическую – разрушение структуры зерен и разрыв молекулярной цепочки крахмала, что повышает энергетическую ценность продукта;

– измельчение и смешивание ингредиентов до получения максимальной однородности;

–снижение содержание влаги корма на 50 % от исходной.

Экструзионная обработка повышает переваримость белков, делает более доступными аминокислоты вследствие разрушения в молекулах белка вторичных связей. Благодаря относительно низким температурам и кратковременности тепловой обработки сами аминокислоты при этом не разрушаются [9].

Экспандирование является одним из эффективных способов тепловой обработки комбикормов под давлением. Процесс экспандирования аналогичен процессу экструдирования. Отличие его в том, что выпрессовывание кормовой массы осуществляется через кольцевой зазор, который регулируется при помощи гидравлической системы, а не в отверстия матриц. При экспандировании комбикорм подвергается кратковременному (4…5 с.) тепловому воздействию паром с последующим сжатием в экспандере до давления 3 МПа. На выходе из экспандера комбикорм попадает в область низкого давления, в этот момент происходит вспучивание продукта, разрываются связи на клеточном уровне, модифицируется крахмал, повышается доступность уг-

леводов действию пищеварительных ферментов. Кроме того, технологический процесс экспандирования позволяет: обеспечить 100%-ное уничтожение болезнетворных микроорганизмов и вредных веществ, что снижает заболеваемость животных, повысить вкусовые качества, питательную ценность комбикормов и их усвояемость, увеличить возможность добавления в комбикорма большого количества жидких компонентов, что в свою очередь повышает питательность и обменную энергию комбикормов, сократить расход кормов и повысить продуктивность животных и птицы. Такие корма необходимы животным, особенно в раннем возрасте.

Обработка корма в экспандере, по сравнению с другими методами, проводится при более высокой влажности. Некоторые зарубежные фирмы рекомендуют экспандировать корм влажностью до 26 %. Оптимальная рабочая температура при приготовлении комбикормов для птицы и свиней 105…110^{o}С, максимальное давление – 0,8 МПа.

В зависимости от рецептуры, рабочей температуры и давления готовый продукт получают в виде гранул, толстых хлопьев или комков. Размер частиц готового продукта можно менять с помощью специального устройства. За счет изменения режимов обработки и регулировки зазора можно получать готовый продукт различной плотности. Удельная энергоемкость процесса экспандирования при производстве комбикормов для птицы и свиней составляет 5…10 кВт-ч/т; для КРС – 15 кВт-ч/т. Экспандирование обеспечивает практически полное обеззараживание кормового сырья.

По сравнению с экструдированием процесс экспандирования менее энергоемкий, удельные затраты энергии при экструдировании составляют 100…150 кВт-ч/т. В отличие от экструдера обработка корма в экспандере при повышенной его влажности протекает в щадящих условиях, что позволяет сохранять на требуемом уровне содержание аминокислот и их биологическую активность.

Эффективность процесса экспандирования, в первую очередь, определяется конструкцией рабочих органов. Так, от конструкции шнека зависит

величина и границы действия сил резания, интенсивность перемешивания и прессования. Одним из главных параметров, оказывающих влияние на энергетические и качественные показатели процесса экспандирования, является отношение длины шнека к его диаметру (L/D), чем выше показатель, тем продолжительнее время обработки корма, что приводит к более глубоким физико-химическим изменениям, происходящим в продукте.

В настоящее время на практике применяются технологии производства комбикормов, согласно которым экспандер может использоваться как в сочетании с пресс-гранулятором, так и без него.

Взаимодействие экспандера с гранулятором позволяет увеличить производительность поточной линии на 30 %, так как в этом случае пресс осуществляет только формование гранул. При этом появляется возможность увеличить количество вводимых жидких добавок на 5 % [4, 12, 17, 19, 25].

Немецкая компания «Амандус Каль ГмбХ и КоКГ» [26] применяет технологию экспандирования более 30 лет и считает, что основными ее преимуществами являются:

– повышение доли полезного протеина в комбикорме, что способствует лучшему снабжению организма коров глюкозой;

– повышение молочной продуктивности коров;

– отсутствие потребности в использовании носителя белка, подвергнутого химической обработке;

– экономия дорогих специальных белковых кормов.

При экспандировании увеличивается доля переваримого протеина всех содержащих белок компонентов, в том числе зерна.

В таблице 1.2 представлена эффективность отдельных способов тепловой обработки зерна и комбикормов, полученная в результате исследований, проведенных в Воронежском государственном университете [11].

Из таблицы 1.2 видно, что из всех рассматриваемых способов тепловой обработки наиболее эффективными по показателям себестоимости 1 т гото-

вого корма являются термоэкструдирование (125…135 руб./т), гранулирование с пропариванием (155 руб./т) и экспандирование (150…160 руб./т).

По снижению затрат корма наиболее эффективными являются обжаривание горячим воздухом с пропариванием (15…20 %), поджаривание с пропариванием (8…10 %) и экструдирование (9,7 %).

1.3. Технологии тепловой обработки кормов в хозяйствах

1.3.1. Основные направления развития производства комбикормов в стране

Для повышения эффективности производства животноводческой продукции, прежде всего, за счет увеличения продуктивности животных, необходимо использовать корма высокого качества и особенно комбикорма. В рационах кормления животных они составляют 25-30 % для КРС, 85-90 % для свиней, 95-100 % для птиц, а в структуре себестоимости продукции затраты на комбикорма достигают 65-75 %. Их низкое качество приводит к удорожанию продукции и убыточности производства [6, 9, 29, 30].

В последние десятилетия производство комбикормов в Российской Федерации развивается по двум направлениям.

Первое – наращивание мощностей государственных комбикормовых предприятий, выпускающих большие партии комбикормов, белково-витаминно-минеральных добавок и премиксов.

Второе – выработка комбикормов в условиях хозяйств с использованием собственного зернофуража, отходов перерабатывающих производств

Таблица 1.2 Эффективность основных способов тепловой обработки зерна и комбикормов (по В.А. Афанасьеву)

№ п/п	Вид тепловой обработки	Вид животных или птицы	Обрабатываемый компонент	Режимы обработки			Результаты обработки			Увеличение привесов, на %	Снижение затрат корма, %	Обсемененность грибками, бактериями, снижение, %	Себестоимость 1 т готового корма, руб./т
				Температура, ^{0}C	Давление, МПа	Влажность исх. материала, %	Переваримость крахмала, раз	Степень декстринизации, %	Переваримость протеина, %				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Поджаривание	Поросята 1-2 мес.	Ячмень шелушенный	100-250	Атмосферное	–	Незначительно	2-3	Незначит. снижается	1	0	–	230
2	Поджаривание + пропаривание	Поросята 1-2 мес.	Ячмень шелушенный	–	Атмосферное	–	12-13	1-1,1	Не меняется	7,5-11,3	8-10	–	220
3	Обжаривание горячим воздухом + пропаривание	Поросята 1-2 мес.	Ячмень шелушенный	180-200	Атмосферное	18-20	2-2,5	20	Не меняется	12-15	15-20	–	182
4	Пропаривание с плющением	Поросята до 2-4 мес.	Ячмень шелушенный,	100	Атмосферное	13-14	25-30	5-6	Не меняется	9,5-13,3	6,8-8,6	–	190
		Телята до 95 дней	ячмень	100	Атмосферное	13-14	25-30	10-12	Не меняется	8-10	4-5	–	190
5	Экструдирование	Поросята-отъемыши	Ячмень	60-100	2-6	17-18	2-2,5	15-20	Не меняется	18,6	9,7	88-95	260
		Цыплята-бройлеры	Соя полужирная	140-145	2-6	Снижается до 8-10 в	2-2,5	15-20	Не меняется	6,8-7	4,5-5,5	88-95	272
			Соя обезжиренная	140-145	2-6	готовом продукте	–	–	–	4-6	3-4	–	285
6	Экспандирование	Птица	Комбикорм	95-105	30	16-18	2	–	10-20	5-6	4-5	85-99	150-160
		Поросята	Комбикорм	95-105	30	11-13	8,4-14,6	–	–	3-9	2-6	85-99	150-160

Продолжение таблицы 1.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
7	Термоэкструдирование	Телята, КРС	Зерно ржи, пшеницы, ячменя, тритикале	180-300	Атмосферное	Любая (12-20)	–	45-55	–	5,5-12	5-9	83-96	125-135
8	Гранулирование с пропариванием	КРС, птица	Зерно ржи, пшеницы, ячменя, тритикале	70-80	Атмосферное	17-18	–	40	Не меняется	–	1,3-1,5	98-99	155

(маслоцехов, мельниц и т.д.) и добавок, выпускаемых государственными комбикормовыми предприятиями [9, 28].

Предпосылки увеличения доли внутрихозяйственного производства комбикормов, наряду с промышленным их производством в России связаны с объективными экономическими преимуществами такого производства на данном этапе развития рыночных отношений и возможностью быстрой реализации на практике в масштабах всей страны без существенных государственных инвестиций [4, 27, 28].

Такое производство относится не только непосредственно к источнику сырья, но и к потребителю продукции, что уменьшает в 5-10 раз расходы на транспортировку и хранение продуктов. Обеспечивается тесная взаимосвязь между производством сырья, его переработкой в корма и их потреблением. При этом существенно снижается стоимость комбикормов за счет использования собственного, как правило, более дешевого сырья, наиболее полно и оперативно учитываются индивидуальные потребности в кормлении различных видов и половозрастных групп животных и птиц; обеспечивается собственный контроль качества комбикорма, причем еще на стадии его приготовления [4, 6, 10].

Системой машин, разработанной на период до 2020 г., предусмотрены технологии производства высококачественных и полнорационных комбикормов, в составе которых зерно будет занимать 65-70 %, белково-витаминно-минеральные добавки (жмыхи, шроты, дрожжи, рыбная и мясокостная мука, премиксы) – 30-35 %. При сохраняющейся тенденции роста цен на комбикорма, производимые предприятиями комбикормовой промышленности, актуальным становится производство комбикормов непосредственно в хозяйствах [27, 28].

Перед отраслью животноводства ставится задача довести производство молока в 2020 году до 41 млн. т, за это время увеличить поголовье КРС на 10-15 млн. голов; произвести мяса свиней – до 5,8 млн. т (в живом весе) или

41 % в структуре мясных ресурсов; довести производство яиц до 44 млрд. шт.; производство мяса птицы всех видов до 4,5 млн. т (в убойном весе) [29].

Для решения поставленных задач требуется производить ежегодно 85-90 млн. т высококачественных комбикормов. В данной ситуации снижение затрат на корм – одна из ключевых проблем для отрасли. Решение ее невозможно без рационального использования фуражного зерна и других сырьевых ресурсов, внедрения на комбикормовых заводах и кормоцехах хозяйств современных технологий и оборудования.

Важным условием рентабельной работы комбикормовых цехов является использование промышленных белково-витаминных и минеральных добавок (БВМД). Кроме того, необходимо:

– возобновить производство белково-витаминной травяной муки, вводимой в рацион до 5 %;

– обеспечить комбикормовые заводы и кормоцеха оборудованием отечественного производства. В настоящее время более 80 % техники закупается за рубежом, ее использование и ремонт обходятся весьма дорого;

– обеспечить перевод отрасли на современные технологии с использованием котлов высокого давления (до 1,0-3,0 МПа и 200-250^{o}С), что позволит ускорить процесс термообработки кормов и снизить удельные расходы теплоты;

– усилить роль науки: увеличить многократно финансирование на экспериментальные исследования, разработку, изготовление и испытание опытных образцов, обеспечить эффективную координацию НИР и НИОКР и др. [29].

В сложившихся реальных условиях, когда основная часть продукции производится по устаревшей технологии и на изношенных основных фондах, с использованием низко производительного ручного труда, в ближайшие годы преобладающая доля производства должна осуществляться на основе его модернизации [29].

1.3.2. Технологии тепловой обработки кормов и технические средства, используемые в хозяйствах

Главное условие выживания сельских отечественных товаропроизводителей в рыночных условиях – выпуск такой продукции, которая может успешно конкурировать с продукцией западных производителей. Для этого необходимы самые современные технологии, которые бы обеспечивали увеличение выхода продукции и, самое главное, снижение затрат труда, топлива, энергии и других материально-технических ресурсов и, таким образом, получение прибыли [31].

Опыт развитых стран показывает, что создание высокорентабельного сельского хозяйства (с низкой себестоимостью продукции) возможно только на основе комплекса взаимосвязанных мер, направленных на усиление селекционной работы, улучшение технологий и средств их реализации, совершенствование организации производства и др. Главное среди этих мероприятий – повышение продуктивности, которая в наибольшей степени влияет на экономичность производства. Следующая по значимости мера – совершенствование технологий и технических средств, направленное на снижение стоимости кормления животных и затрат живого труда [27, 32].

Снизить стоимость кормления животных можно путем снижения затрат на производство и подготовку кормов к скармливанию, а также за счет повышения их качества.

Приготовление кормов непосредственно в хозяйствах позволяет значительно снизить их стоимость за счет уменьшения затрат на транспортные расходы и использования собственных кормовых ресурсов.

Известно, что высокое качество кормов и в первую очередь комбикормов возможно лишь при применении современных и перспективных технических средств и технологий производства, основу которых составляют такие технологические операции подготовки исходного сырья, измельчения, шелушения пленчатых культур, весового дозирования, эффективного смешива-

ния исходных компонентов, а также тепловой обработки, направленных на повышение питательной ценности корма и на его обеззараживание.

Для повышения питательной ценности корма и в первую очередь фуражного зерна и его обеззараживания широко используют специальные способы обработки зерновых культур и комбикормов, изменяющие структурно-механические и биохимические свойства продукта.

Все вышеуказанные способы тепловой обработки кормов широко используются в государственных комбикормовых заводах и крупных сельскохозяйственных предприятиях. Что касается средних и малых хозяйств и, тем более, крестьянских (фермерских), то надо заметить, что в связи с их ограниченными финансовыми возможностями они не в состоянии приобретать дорогостоящие технические средства для приготовления кормов и вынуждены продолжать использовать устаревшее, малопроизводительное и энергозатратное технологическое оборудование.

К настоящему времени отечественное машиностроение для животноводства выпускает в основном морально устаревшую технику [33]. Свыше 90 % поступающей на рынок техники для животноводства производится западными фирмами. Рынок импортной техники ежегодно растет. Все это создает большие проблемы по организации сервисного обслуживания, вызывает рост затрат на проведение технического обслуживания и ремонт.

В настоящее время для обработки зерновых кормов в средних, малых и фермерских хозяйствах наиболее широкое применение нашли такие способы тепловой обработки как поджаривание, гранулирование, экструдирование, флокирование, запаривание, пропаривание и варка.

Поджаривание применяется, главным образом, для тепловой обработки зерна ячменя, входящего в состав полнорационного концентрированного корма для поросят-сосунов. Поросята до 2-3-х недельного возраста слабо переваривают крахмал и сахар. Поджаривание зерна ячменя на нагретой металлической поверхности (до 100-250^{o}C) вызывает желатинизацию и декстрини-

зацию крахмала, а также другие физико-химические изменения, способствующие повышению питательности, усвояемости и его вкусовых качеств [34].

Способ прост и недорогой. Оборудование для реализации данного способа серийно в стране не производится. Однако данный вопрос успешно может быть решен на уровне специалистов хозяйств и ферм без существенных капитальных вложений на основе использования научных разработок.

В условиях хозяйств поджаривание зерна можно организовать при помощи агрегатов для приготовления травяной муки АВМ. Установлено, что при поддержании температуры на выходе в пределах 125-130^{o}С достигается хорошее качество поджаривания зерна [6].

Гранулирование. При производстве комбикормов широкое распространение получил процесс гранулирования. Для осуществления процесса гранулирования кормов применяются прессы-грануляторы отечественного производства производительностью от 0,2 до 22 т/ч [4].

В отечественной практике наибольшее распространение получила технология сухого гранулирования, осуществляемая на грануляторах типа ОПК, ДГБ, ДГВ.

Экструдирование является наиболее эффективным способом тепловой обработки зерновых компонентов и самих комбикормов.

Конструкции экструдеров по характеру воздействия на обрабатываемый продукт разделяются на три группы:

– установки для кратковременного высокотемпературного воздействия на продукт;

– экструдеры на основе применения высокого давления;

– установки для обработки высоковлажного зерна – («сухие» экструдеры), в которых процесс осуществляется только за счет трения, без применения пара и воды.

Эти экструдеры имеют невысокую производительность и стоимость, ограниченную область применения – используются в крестьянских (фермер-

ских) хозяйствах для обработки фуражного зерна или сои, просты в эксплуатации. Их преимущества:

– могут использоваться практически в любых условиях, необходимо лишь наличие энергии для привода;

– не требуется сушка готового экструдата, достаточно только охладить его до обычной температуры [11].

На российском рынке представлена достаточно широкая гамма экструдеров отечественного производства (ПЭ-250У, ПЭ-500У, ПЭ-1250У, КМЗ-2У и др.) производительностью от 0,06 до 1,5 т/ч [4].

Флокирование. Зерно подвергается влаготепловой обработке в течение 12-14 минут при температуре около 94 ^{o}С с последующим плющением.

Для реализации этого процесса используют запарник-смеситель (С-3, С-7) и плющилку зерна (ПЗ-3, ПЗ-8, ПЗ-500).

Пропаривание, запаривание, варка. Эти способы тепловой обработки кормов очень широко используются в хозяйствах для обработки корнеклубнеплодов, пищевых отходов, подпорченного фуражного зерна и др.

Технология обработки и приготовления кормов зависит от конкретных условий хозяйства, экономической целесообразности применения тех или иных способов обработки кормов, зоотехнических требований, предъявляемых к ним.

Важное место в кормовом балансе всех видов животных отводится корнеклубнеплодам и бахчевым культурам. Они отличаются хорошими вкусовыми качествами, охотно поедаются животными, обладают прекрасными диетическими свойствами, особую кормовую ценность представляют для крупного рогатого скота и свиней.

Из-за высокого содержания воды (70…92 % и более) эти культуры плохо хранятся, а из-за низкого содержания протеина, жира, клетчатки, кальция и фосфора должны скармливаться как дополнительный корм к основному рациону.

Наиболее часто в кормлении животных используют кормовую свеклу, морковь, тыкву, кабачки, арбуз кормовой, свеклу сахарную, полусахарную и особенно картофель.

Питательная ценность сухого вещества картофеля почти аналогична питательной ценности злакового зерна. Оба эти корма содержат в своем составе до 70 % крахмала – легкоусвояемого углевода высокой энергетической ценности. В 1 кг сырого картофеля содержится 0,3 кормовых единицы и 15 г переваримого протеина [1, 35].

Клубни картофеля употребляют на корм животным в сыром, вареном или запаренном, силосованном и сушеном видах. Наиболее эффективно картофель скармливать в запаренном виде в смеси с другими кормами при вводе его до 85 % рациона по питательности. При скармливании запаренного картофеля привесы животных увеличиваются на 16…17 %, в сравнение со скармливанием сырого. Готовят картофель непосредственно перед скармливанием или силосованием. Технология использования картофеля включает в себя мойку, запаривание или варку, загрузку его в смеситель и смешивание с другими компонентами рациона.

Запаривают картофель в специальных стационарных или передвижных агрегатах КН-3, ЗПК-4, С-7, С-12, СКО-Ф-6 и др. При работе запарника в циклическом режиме и давлении пара 0,04…0,06 МПа время запаривания составляет 40…45 минут; в непрерывном режиме производительность регулируется так, чтобы на выходе картофель свободно разминался. Такая технология имеет высокую энергоемкость, так как при запаривании целых клубней наблюдается перерасход теплоты, связанный со временем нагревания середины клубня до температуры размягчения 92…96^{0}С. При запаривании картофеля на 1т расходуется в среднем 200 кг пара, который конденсируется и сливается при температуре 80…90^{0}С, что вызывает повышенный расход теплоты, а в конечном итоге котельного топлива.

Менее энергоемкой является технология варки картофеля, при которой он смешивается с другими компонентами в смесителе. Эта технология может

осуществляться по следующей схеме: картофель моется в мойке-измельчителе ИКС-5 или ИКМ-5 и подается в смеситель-запарник С-3 или С-7, в котором он варится. Затем в смеситель загружают другие компоненты и смешивают их с вареным измельченным картофелем. Конденсат пара при этом не теряется, а используется для приготовлении смеси. При такой технологии достигается экономия топлива до 30 % (5 кг/т), но теряется часть питательных веществ [36-42].

За рубежом, в частности в Германии, для тепловой обработки картофеля применяется метод короткого запаривания, осуществляемый в запарниках непрерывного действия. Этот метод предусматривает снижение температуры запаривания с 95 ^{0}С до 70 ^{0}С, сокращение времени пребывания картофеля в запарнике до 30…35 минут и последующее измельчение частично готового картофеля в измельчающих устройствах. Такой метод позволяет снизить удельный расход топлива примерно на 30 %, одновременно повысить производительность машины и труда [43-45].

Тепловой обработке подвергаются корнеплоды, пораженные плесенью, если процент пораженности, не превышает 50%. Такие корнеклубнеплоды перед тепловой обработкой очищают от плесени и моют. Запаривают их в смесителях-запарниках периодического или непрерывного действия при давлении пара 0,04…0,06 МПа в течение 40…50 минут при температуре пара 100…120^{0}С. Такие корнеплоды, как сахарная и кормовая свекла, должны запариваться вместе с концентрированными кормами и скармливаться немедленно, так как при остывании смеси в свекле происходят химические реакции и вырабатываются кислоты, которые могут привести к отравлению животных [44, 45].

Зерновые злаковые имеют чрезвычайно большое значение в кормлении сельскохозяйственных животных всех видов. Зерна злаков содержат от 8 до 12 и более процентов протеина, который почти полностью представлен белками. Из зерновых злаковых в кормлении животных используется кукуруза, ячмень, пшеница, овес, рожь, сорго, просо. Основными приемами подготовки

зерновых кормов являются: измельчение, поджаривание и дрожжевание. В технологических линиях кормоцехов производят обработку очищенного зерна перегретым паром в пропаривателях. Обработку производят в течение 15…20 минут под давлением пара 0,02…0,03 МПа до влажности 20…25%. Пропаренное зерно подается в вальцевые плющилки и затем оно поступает в смеситель кормов для дальнейшего смешивания с другими компонентами [41].

Зернобобовые корма (горох, соя, люпин, чечевица), применяемые для кормления свиней, предварительно измельчают зернодробилками, затем в течение одного часа варят или пропаривают 30…40 минут в кормозапарнике [42].

Большая роль в кормлении сельскохозяйственных животных отводится концентрированным кормам (зерно злаков и зерна бобовых, отходы от переработки масличных культур).

Концентрированные корма скармливают раздельно в виде комбикормовых смесей или вместе с другими кормами в составе влажных кормовых мешанок. Концентрированные корма грубого помола запариваются в воде, нагретой до 90^{o}С, или подогревают паром вместе с водой до той же температуры в запарнике-смесителе при концентрации 1:1, 1:2 и выдерживают при этой температуре 30…60 минут. После этого к ним добавляют другие концентраты или измельченные корнеплоды, смесь тщательно перемешивают и скармливают животным. Температура кормовой смеси перед скармливанием должна быть не более 25…30^{o}С, влажность – 65 % [37, 39, 41, 47].

На основе комбикормов, макро- и микродобавок, обрата, воды и жиров приготавливают жидкий заменитель молока для выпойки молодняка крупного рогатого скота. Технология приготовления заменителя молока заключается в следующем: смеситель-запарник заполняют водой и вводят комбикорма при постоянном перемешивании массы мешалками. Далее подают пар под давлением 0,04…0,07 МПа, нагревают смесь до 80^{o}С и запаривают комбикорма в течение часа при постоянной температуре. В конце запаривания тем-

пературу смеси увеличивают до 95°С, выдерживают смесь при этой температуре в течение 5…7 минут и затем прекращают подачу пара. Далее смесь охлаждают проточной водой до температуры 55…60°С и после этого подают в смеситель жиры и добавки. Охлаждают проточной водой до 35…38°С и готовую смесь используют для выпойки телят. Продолжительность цикла приготовления заменителя молока составляет 3,5 часа [48].

Концентрированные корма используют для приготовления жидких кормовых дрожжей в технологических линиях кормоцехов. Для приготовления одной тонны дрожжей в осолаживатель загружают 50…60 кг концентратов и 1,6…1,7 $м^3$ воды. Смесь нагревают паром до температуры 80°С и выдерживают 1…2 часа. Приготовленный таким образом корм перекачивают в смеситель С-12 для сдабривания грубых кормов и корнеплодов.

Для откорма животных довольно широко используют пищевые отходы предприятий общественного питания и населения. Они могут обеспечить значительную долю питательности рационов в пригородных хозяйствах.

Пищевые отходы после предварительной термической обработки и удаления посторонних примесей используются, в основном, для откорма свиней. В практике животноводства к пищевым отходам (50%) добавляют 43% комбикормов и 7% витаминно-травяной муки. Пищевые отходы можно смешивать с другими компонентами, высушивать, гранулировать.

Технология приготовления кормов с использованием пищевых отходов заключается в следующем: пищевые отходы измельчают и варят в специальных котлах-запарниках под давлением 0,03…0,04 МПа в течение 30…40 минут в связи с необходимостью их полной стерилизации. Небольшие количества пищевых отходов можно обрабатывать паром при давлении 0,07 МПа в варочных котлах-смесителях ВКС-3М, в которые после окончания варки пищевых отходов добавляют концентраты и корнеплоды для приготовления полнорационных смесей для свиней. Оптимальный режим для стерилизации пищевых отходов: температура 105…110°С, время 50…60 минут. Нагрев свыше 110°С ухудшает питательную ценность пищевых отходов.

Возможно запаривание пищевых отходов. Для этого измельченное сырье после подогрева водой и очистки от примесей нагревается паром до температуры 107…110°С и затем выдерживается в закрытом запарнике в течение 1,5 часов, после чего выгружается в накопитель с последующей выдержкой запаренной массы при температуре 95…98°С в течение 30 минут, что обеспечивает получение корма, благополучного в санитарном отношении [49-51, 53].

Определенный интерес представляет способ обработки пищевых отходов в проточном трубчатом запарнике кормов непрерывного действия. Сущность технологии заключается в том, что во время транспортирования продукта в трубопровод под давлением подается пар с температурой до 150°С. Сырье на этой линии подвергается термической обработке в непрерывном потоке при сравнительно низком давлении и без перегрева обрабатываемой массы. Время обработки при этом не превышает 36 минут [49].

С использованием пищевых отходов готовят супы для выпойки животным. Пищевые отходы загружают в смеситель С-12, одновременно туда же подают измельченную солому, соль, мел, костную муку, зерноотходы. Затем в смеситель подается пар давлением 0,35 кПа и варят суп 3…4 часа. Готовый суп выливается в тракторные тележки и развозится животным.

Известны исследования [54] по стерилизации пищевых отходов СВЧ-полем, которые показали, что при силе тока 1,1 А происходит полная стерилизация за 4 минуты.

Особое значение при разработке рационов для животных придается кормам животного происхождения, так как они обладают высокой питательной ценностью и усвояемостью всех веществ, содержат биологически полноценный протеин, комплекс витаминов, макро- и микроэлементы. К кормам животного происхождения относят молочные продукты, отходы мясной, рыбной и кожевенной промышленностей. Эти продукты легко подвергаются воздействию микрофлоры и быстро портятся; поэтому их необходимо хранить в холодильных камерах. Перед скармливанием компоненты подверга-

ются термической обработке. Варку производят в запарниках или варочных котлах при температуре 100°С. После варки корма выдерживают в течение 1,5…2,0 часов при температуре варки. Расход пара на обработку одной тонны корма составляет 200 кг [38].

На предприятиях пищевой, легкой и других отраслей промышленности при переработке сельскохозяйственных продуктов получается большое количество отходов, используемых в кормлении животных. К ним относятся и все сухие отходы технических производств (жмыхи, шрот, сухой жом, мясокостная, рыбная мука и др.) При нарушении технических условий хранения отходы могут забродить или загнить, сильно прогоркнуть, покрыться плесенью или в них заведется большое количество живых вредителей. Поэтому надежное средство исключить отравления животных при скармливании таких кормов – это обработка их методом пропаривания в течение 1…1,5 часов под давлением 150…200 кПа до полного исчезновения специфического запаха. Обработанные корма скармливаются животным согласно нормам кормового рациона [38].

Для проведения тепловой обработки кормов и в первую очередь влаготермической необходимо иметь на животноводческих фермах хозяйств технические средства для получения горячей воды и пара. Такими средствами являются паровые и водогрейные котлы низкого давления, работающие на различных видах топлива (жидком, газообразном, твердом и др.).

Несмотря на то, что в последние годы рынок теплогенерирующих установок (котлов-парообразователей) для сельского хозяйства заметно стал расширяться, во многих малых и фермерских хозяйствах все еще продолжается использование устаревших моделей котлов-парообразователей с низким КПД и большим расходом топлива и, особенно жидкого. К ним относятся старые модели котлов-парообразователей КВ-300У, КТ-500, КТ-1000, Д-721Г, Д-900 и др.

В последние годы на Российском рынке, кроме котлов-парообразователей импортного производства, стали появляться котлы-

парообразователи новых серий российского производства. Это серия котлов КП (КП-160, КП-250, КП-320, КП-500, КП-650) с тепловой мощностью от 116 до 465 кВт, паропроизводительностью от 160 до 650 кг пара в час и КПД 91 %. Котлы работают на природном газе и дизельном топливе. Расход дизельного топлива изменяется от 10,8 до 43,3 кг/ч в зависимости от паропроизводительности [55].

Котлы серии ПАР (ПАР-0,15-0,07Ж; ПАР-0,5-0,07Ж; ПАР-0,7-0,07Ж) работают на жидком дизельном топливе с расходом от 10,5 до 58,5 кг/ч. Производительность по пару составляет от 150 до 700 кг пара в час. Эти же типы котлов могут работать на природном газе [56].

Серия котлов типа КСП (КСП-300, КСП-500, КСП-750, КСП-1000) предназначена для обеспечения паром животноводческих ферм и сельскохозяйственных комплексов, а, также горячего водоснабжения и отопления помещений с применением бойлеров. Производит их ОАО «Яранский механический завод» Кировской области. Топливом могут быть дрова, уголь, природный газ и др. КПД их составляет 73-77 % на дровах и угле, температура пара 110-130^{o}С [57].

Котлы-парообразователи этих марок более совершенны и экономичны. Они могут работать на самых различных видах топлива, в том числе и на самых дешёвых (солома, дрова, уголь, газ), а, также на жидких видах топлива утяжеленного фракционного состава (печное бытовое, мазут и др.).

В системе машин и технологий на период до 2020 г. разработанной с учетом заданий по развитию животноводства, предусмотренных Государственной программой развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013-2020 годы, утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации 14 июля 2012 г. №717 предусмотрено расширение применения теплогенерирующего оборудования, работающего на природном газе и сокращение котельных установок и теплогенераторов, использующих дефицитные сорта жидкого топлива [28].

Из всех основных способов тепловой обработки кормов (рисунок 1.1) менее энергозатратными являются термические и термомеханические. Это связано с тем, что они основаны на использовании тепловой энергии, добываемой главным образом, за счет применения электроэнергии и сил трения, возникающих в рабочих органах грануляторов, экструдеров и экспандеров. Что касается влаготермических способов, то они основаны на использовании в основном тепла и пара, вырабатываемых котлами-парообразователями, топливо для которых значительно дороже, чем электроэнергия. В этой связи вопросы снижения энергоемкости тепловой обработки кормов и, в первую очередь влаготермической, являются достаточно актуальными.

1.3.3. Пути снижения энергоемкости влаготермической обработки кормов в условиях хозяйств

Несмотря на проводимые в последнее время в России многочисленные исследования, направленные на снижение энергозатрат в технологических сельскохозяйственных процессах, энергоемкость отечественной сельскохозяйственной продукции все еще остается достаточно высокой – в растениеводстве она в 2 раза, а в животноводстве в 3-4 раза выше, чем в передовых зарубежных странах [58].

Основной экономической проблемой в животноводстве продолжает оставаться низкая конкурентоспособность отечественной продукции, обусловленная высокими затратами ресурсов на получение продукции (корма) – рабочего времени, энергии, низкими показателями продуктивности и воспроизводства стада, технического оснащения ферм и недостаточным применением современных ресурсосберегающих технологий.

В настоящее время энергоемкость производства продукции свиноводства составляет около 164 кг у.т./ц или 15-18 % в себестоимости [33].

В животноводстве одним из энергоемких процессов остается приготовление кормов для сельскохозяйственных животных и, в первую очередь, их тепловая обработка.

Ежегодно на тепловые процессы в животноводстве страны используется 1,3 млн. т жидкого или 1,7 млрд. т твердого топлива, 0,6 млн. $м^3$ природного газа и 1,8 млрд. кВт·ч электроэнергии [28].

Основными причинами высокой энергоемкости тепловой обработки кормов по мнению многих ученых [27-31, 40, 58] и практиков являются:

1. Слабая оснащенность многих хозяйств и особенно малых современным высокоэкономичным теплоэнергетическим оборудованием с полной автоматизацией управления.
2. Использование хозяйствами все еще устаревших энергоемких технологий тепловой обработки кормов.
3. Низкокачественное техническое обслуживание теплоэнергетического и технологического оборудования.
4. Низкое качество кормов, требующих дополнительно тепловой обработки.
5. Слабое финансово-экономическое состояние хозяйств, ограничивающее их возможности.

Вышеуказанные причины дают основание полагать, что основным и наиболее правильным направлением в решении вопроса снижения энергоемкости тепловой обработки кормов и в первую очередь влаготермической является переход хозяйств на использование современных энергосберегающих технологий тепловой обработки кормов с использованием усовершенствованного теплоэнергосберегающего оборудования, а, также отдельных машин для выполнения различных операций (измельчения, дозирования, смешивания, гранулирования, экструдирования, экспандирования и др.).

Реализация указанного направления потребует от хозяйств времени и немалых капиталовложений, связанных с реконструкцией старых или строительством новых кормоцехов, приобретением современного теплоэнергетического оборудования, а, также отдельных машин для выполнения различных технологических операций.

Вопрос повышения конкурентоспособности российской животноводческой продукции за счет снижения энергозатрат надо решать уже сегодня, а на полную реализацию вышеуказанного направления может потребоваться 3-5 лет, а возможно и больше. В этой связи данный вопрос целесообразно решать в два этапа.

На первом этапе (1-2 года), как мы полагаем, необходимо решить следующие вопросы:

1. Разработать комплекс быстро реализуемых мероприятий, не требующих больших финансовых затрат, направленных на снижение энергоемкости тепловой обработки кормов в хозяйстве за счет рационального использования энергоресурсов (топлива, электроэнергии).
2. Подготовить базу для следующего этапа работ связанного с внедрением в производство новых энергосберегающих технологий тепловой обработки кормов в хозяйстве (провести поиск по выбору современных энергосберегающих технологий и технологического оборудования для тепловой обработки кормов, разработать проектно-сметную документацию на реконструкцию кормоцехов и др.).

На втором этапе (3-5 лет) провести строительно-монтажные и пусконаладочные работы по кормоцеху и ввести его в эксплуатацию.

Известно, что на тепловую обработку кормов и особенно на влаготермическую, затрачивается значительное количество жидкого топлива, стоимость которого ежегодно возрастает. Это существенно удорожает затраты на тепловую обработку кормов.

В этой связи, на первом этапе решения проблемы целесообразно начинать с реализации путей, направленных на рациональное использование топлива при влаготермической обработке кормов. При этом возможны пути технического и организационного характера.

К путям технического характера можно отнести следующие:

1. Снижение потерь топлива от неполного его сгорания.

2. Вторичное использование тепла отходящих газов теплогенерирующих установок.

3. Снижение тепловых потерь в технологических линиях тепловой обработки кормов.

4. Переоборудование котлов-парообразователей устаревших моделей на использование более дешевых сортов топлива.

5. Расширение объемов использования электроэнергии на тепловые цели.

К путям организационного характера можно отнести:

1. Организация в хозяйствах качественного технического обслуживания технологического и теплоэнергетического оборудования кормоцехов.

2. Организация в хозяйствах качественного учета топлива.

3. Повышение качества кормов, способствующее исключению необходимости дополнительной их тепловой обработки.

Таким образом, реализация вышеуказанных путей, уже на первом этапе решения проблемы будет способствовать уменьшению расхода жидкого топлива и на этой основе снижению энергоемкости процесса влаготермической обработке корма, а, следовательно, повышению конкурентоспособности животноводческой продукции и принесет хозяйствам дополнительную прибыль, необходимую для дальнейшего его развития.

1.4. Характеристика тепловых потерь при влаготермической обработке корма

1.4.1. Тепловые потери в теплогенерирующей установке

Современное животноводство и, в первую очередь, кормопроизводство и кормоприготовление основаны на широком использовании тепловой энергии, выработка которой требует значительного расхода топливно-энергетических ресурсов. Основным видом топливопотребляющего оборудования являются паровые и водогрейные котлы низкого давления, работающие на жидком, газообразном и твердом топливе.

Известно, что влаготермическая обработка кормов осуществляется системой машин (технологической линией), в состав которой входят теплогенерирующая (ТГУ) и теплопотребляющая (ТПУ) установки, а также теплопроводящие сети и устройства (ТС), включая приборы автоматики, каждые из которых имеют свои тепловые потери.

Для разработки конкретных мер по снижению тепловых потерь необходимо установить наиболее характерные и наиболее значимые из них, как для всей системы машин (ТГУ-ТС-ТПУ), так и для отдельных ее элементов (машин).

Что касается теплогенерирующих установок, то к концу 90–х годов в Российской Федерации промышленность приступила к производству более совершенных и экономичных котлов-парообразователей для получения горячей воды и пара температурой выше 120^0С и избыточном давлении до 0,07 МПа с целью теплоснабжения технологических процессов в агропромышленном производстве (тепловой обработке кормов, пастеризации молока, горячего водоснабжения, отопления и др.). Они работают на жидком топливе утяжеленного фракционного состава, газе, твердом топливе и обеспечивают высокие технико-экономические показатели и экономию светлых нефтепродуктов [59-63].

Однако, в силу ряда как объективных, так и субъективных факторов, в АПК России продолжается еще использование значительного количества малоэффективных и неэкономичных котлов-парообразователей устаревших моделей, снижающих эффективность тепловой обработки кормов.

Основными тепловыми потерями в теплогенерирующих установках являются потери теплоты на нагрев стенок самих установок, потери в окружающую среду через стенки, потери с уходящими газами и потери от неполного сгорания топлива [64-70].

Наибольшее количество теплоты уносится в дымовую трубу с уходящими газами. Для котлов малой и средней мощности эти потери составляют 8…26% от теплоты, полученной в топке. Они обусловлены вторым законом

термодинамики. Известно, что эти потери теплоты зависят, главным образом, от температуры уходящих газов и коэффициента избытка воздуха α.

Котлы-парообразователи, используемые в сельскохозяйственном производстве, рассчитаны на работу с небольшим избытком воздуха (α=1,1…1,2) в номинальном режиме. Однако в производственных условиях коэффициент α может существенно отличаться от вышеуказанных значений.

Установлено, что при недостаточном количестве воздуха (α<1), существенно увеличиваются потери топлива, обусловленные химическим недожогом, которые могут достигать 60…70 %. В случаях избытка воздуха топливо сгорает полностью, но из-за больших объемов воздуха, поступающего в топку, снижается температура дымовых газов и уменьшается количество теплоты, передаваемой теплоносителю, что снижает КПД установки [71].

В общей сложности потери с уходящими газами можно снизить на 3…8% за счет поддержания коэффициента избытка воздуха в требуемых пределах и за счет содержания в чистоте поверхностей нагрева, а также за счет снижения температуры уходящих газов [64, 65, 67].

Таблица 1.3 Тепловые потери в ТГУ сельскохозяйственного назначения

Виды тепловых потерь	Значения тепловых потерь, %	
	Пределы изменения	Усредненные значения
На нагрев стенок	3…5	4
В окружающую среду	2…10	6
С уходящими газами	8…26	17
От неполного сгорания топлива	3…21	12
Всего		39

Потери энергии на нагрев стенок теплогенерирующих установок практически являются постоянными и, как показывают расчеты (таблице 1.4), не превышают 5 %. Они зависят, главным образом, от металлоемкости установки и параметров теплоносителя.

Потери теплоты в окружающую среду через стенки ТГУ малой мощности составляют 2…10 %. Они регламентируются на стадии проектирования и реализуются путем применения современных термоизоляционных материалов. В процессе эксплуатации эти потери остаются практически постоянными [64-66].

Таблица 1.4 Расчетные показатели расхода теплоты на нагрев стенок котлов-парообразователей сельскохозяйственного назначения

Паспортные данные	Марки котлов-парообразователей			
	КВ-300У	КТ-500	Д-900	КТ-1000
Паропроизводительность, кг/ч	340	500	900	1000
Тепловая мощность, кВт	225	375	670	733
Давление пара, МПа	0,07	0,07	0,07	0,07
Температура пара, ^{0}С	120…130	120	120	120
КПД, %	85	76	91	76
Расчетные потери теплоты на нагрев стенок, %	2,9	3,0	3,4	4,9
Масса, кг	1620	1650	1800	3000

Особого внимания заслуживают потери энергии от неполного сгорания топлива в топках теплогенерирующих установок, которые определяются суммой потерь от химического и механического (физического) недожогов топлива и изменяются в довольно широких пределах (от 3 до 21 %).

Потери энергии от неполного сгорания топлива зависят от целого ряда факторов и, главным образом, от качества рабочей смеси в топочном пространстве, температуры в топке, коэффициента избытка воздуха [64, 65, 68-70, 72-74].

В производственных условиях эти потери могут достигать 60…70 % и более. Такие потери обусловлены, прежде всего, низким уровнем эксплуатации ТГУ и существенно снижают эксплуатационный КПД теплогенерирую-

щих установок, который находится в пределах 0,2…0,55, что значительно ниже паспортного (0,9…0,92). Следовательно, КПД теплового процесса также снижается, что напрямую связано с повышенным расходом топлива и с увеличением энергоемкости тепловых процессов [69, 70, 72].

Анализ тепловых потерь, допускаемых теплогенерирующими установками, используемыми в агропромышленном производстве, показывает, что основными из них являются потери, вызываемые неполным сгоранием топлива, которые существенно снижают КПД установок и повышают энергоемкость технологических процессов влаготермической обработки кормов.

1.4.2. Тепловые потери в теплопотребляющей установке

Тепловая обработка кормов выполняется в специальных тепловых аппаратах, предназначенных для запаривания и варки кормов (запарники-смесители, кормоприготовительные агрегаты, варочные котлы и т.д.). Основными потерями энергии в таких установках являются затраты на нагрев стенок, в окружающую среду через стенки, на продувку и перегрев корма выше температуры готовности.

Потери энергии на нагрев стенок теплопотребляющих установок не превышают 3…6 % и зависят, главным образом, от металлоемкости установки и температуры теплоносителя, подаваемого на обработку корма. Такие потери для каждого вида тепловых аппаратов имеют свои значения и являются практически постоянными (таблица 1.5). Наименьшие потери энергии (3…5,6 %) допускают варочные котлы [36, 75-77].

Потери энергии в окружающую среду через стенки теплопотребляющих установок не превышают 19,6 %. Наибольшие потери имеют запарники-смесители С-12 (19,6 %) и наименьшие (7,8 %) – вакуумные котлы с рубашкой для тепловой обработки пищевых отходов [36, 50, 76, 77].

Значительные потери энергии в окружающую среду запарниками-смесителями С-12 объясняются большой их поверхностью теплообмена и несовершенной системой подачи пара в технологическую зону.

Потери энергии, связанные с продувкой теплопотребляющих установок, различны и находятся в пределах 4…10 % от общего количества тепла, вырабатываемого теплогенерирующей установкой. Наибольшие потери имеют варочные котлы высокого давления (10,1 %), наименьшие потери (4%) - варочные котлы с рабочим давлением до 0,07 МПа, а также некоторые запарники-смесители периодического действия.

Таблица 1.5 Тепловые потери в теплопотребляющих установках для тепловой обработки кормов

Виды тепловых потерь	Тепловые потери по видам аппаратов, %			
	Запарники-смесители периодического действия	Запарники-смесители непрерывного действия	Варочные котлы высокого давления	Вакуумные котлы с рубашкой
Нагрев стенок тепловых аппаратов	5,3…6,1	4,6…5,9*	3,0…5,6*	3,3…6,0*
В окружающую среду через стенки	11,4…19,6	13,2	16,0	7,8
На продувку	4…9	-	6…10	-
На перегрев обрабатываемого корма	3…6	-	5…8	3,5…5,0
Усредненные суммарные тепловые потери	32,2	17,2	34,8	16,7

*- расчетные значения

Потери энергии, связанные со страховочным перегревом корма при тепловой обработке пищевых отходов, а также с неравномерным нагревом корма в рабочем объеме запарника-смесителя периодического действия составляют 3…6 %. Эти потери зависят от совершенства как самого технологического процесса тепловой обработки, так и тепловых аппаратов, в которых ведется обработка корма. Их можно снизить практически до нуля только при применении запарников-смесителей непрерывного действия [36, 50, 52, 78].

Из данных таблицы 1.5 видно, что наибольшие тепловые потери допускаются варочными котлами высокого давления (34,8 %) и запарниками-смесителями периодического действия (32,2 %), которые широко применяются в хозяйствах агропромышленного производства. В этих тепловых аппа-

ратах значительны тепловые потери в окружающую среду через стенки, на продувку и на страховочный перегрев корма.

Снизить потери энергии в них можно за счет совершенствования конструкции, применения современных высокоэффективных теплоизоляционных материалов, а также за счет совершенствования процессов влаготермической обработки кормов.

1.4.3. Тепловые потери в теплопроводящей сети

Потери энергии в теплопроводящих сетях незначительны и обусловлены потерями на нагрев стенок и в окружающую среду. Они составляют 2…3% [40] от общих затрат тепловой энергии на осуществление технологического процесса. Малые потери энергии в теплопроводящих системах кормоцехов обусловлены тем, что теплогенерирующие и теплопотребляющие установки монтируются в одном блоке. Это сокращает протяженность теплопроводящих сетей.

Анализ результатов ранее проведенных исследований показал, что наибольшие потери энергии (39 %) (таблица 1.6) допускают теплогенерирующие установки, к которым относятся котлы-парообразователи животноводческих ферм и комплексов. Значительно меньше потери (31 %) в теплопотребляющих установках и совсем незначительные (2,25 %) имеют теплопроводящие сети и устройства.

Анализ тепловых потерь по их видам системы ″ТГУ-ТС-ТПУ″ (таблица 1.6) показывает, что наиболее значительными являются потери энергии в окружающую среду через стенки тепловых аппаратов и устройств (21,5 %), потери с уходящими газами (17 %) и потери от неполного сгорания топлива (12 %).

Как отмечалось выше, потери энергии с уходящими газами и в окружающую среду в процессе эксплуатации могут изменяться в незначительных пределах. Что же касается потерь теплоты от неполного сгорания топлива, то они в производственных условиях изменяются в довольно широких преде-

лах, от 3 до 21 %, а в отдельных случаях и до 60 %, и существенно снижают эксплуатационный КПД (0,22…0,56) теплогенерирующих установок, а, следовательно, и КПД теплового процесса, что напрямую связано с повышением расхода топлива, и, следовательно, с увеличением энергоемкости самого процесса влаготермической обработки корма.

Таблица 1.6 Тепловые потери, допускаемые исследуемой системой ″ТГУ-ТС-ТПУ″ в эксплуатационных условиях при влаготермической обработке кормов

№ н/п	Виды тепловых потерь	Пределы изменения значений тепловых потерь, %			Усредненные значения тепловых потерь, %
		ТГУ	ТС	ТПУ	
1	Нагрев стенок тепловых аппаратов	3…5	3…6	0,5…1	9,25
2	В окружающую среду через стенки тепловых аппаратов	2…10	8…20	1…2	21,5
3	Потери с уходящими газами	8…26	-	-	17,0
4	Потери от неполного сгорания топлива	3…21	-	-	12,0
5	На продувку тепловых аппаратов	-	4…10	-	7,0
6	На страховочный перегрев обрабатываемого корма	-	3…8	-	5,5
Усредненные суммарные значения тепловых потерь		39,0	31,0	2,25	72,25

Таким образом, поиск способов снижения потерь теплоты от неполного сгорания топлива, является одной из важных задач настоящего исследования.

1.4.4. Анализ способов снижения тепловых потерь от неполного сгорания топлива в теплогенерирующей установке

Как уже отмечалось в разделе 1.4.3, основными потерями энергии для исследуемой системы ″ТГУ-ТС-ТПУ″ являются потери от неполного сгорания топлива в теплогенерирующих установках, которые могут достигать в

среднем 12 % от общего объема. Снизить эти потери можно путем интенсификации процессов горения и, в первую очередь, процессов смесеобразования и увеличения скорости реакции горения [68, 79-81].

По определению академика Б.В. Канторовича [80], существуют различные способы интенсификации процессов горения топлива: конструкторские, эксплуатационные, технологические, химические и физические.

Анализ научных публикаций [79-91] показал целесообразность использования физических факторов (ионизирующие излучения, ультразвук, магнитные и электрические поля) для целей интенсификации процессов горения топлива как наиболее эффективных. Особого внимания заслуживает вопрос использования электрических полей высокой напряженности.

Так, воздействие электрического поля на процесс смесеобразования (рисунок 1.2 *а*) как одного из факторов интенсификации процесса горения можно условно разделить на воздействие электрического поля на струю топлива, вытекающую из дозирующего устройства, и воздействие на топливовоздушную смесь.

Установлено [83-86], что влияние электростатического поля на топливовоздушную смесь проявляется двояко.

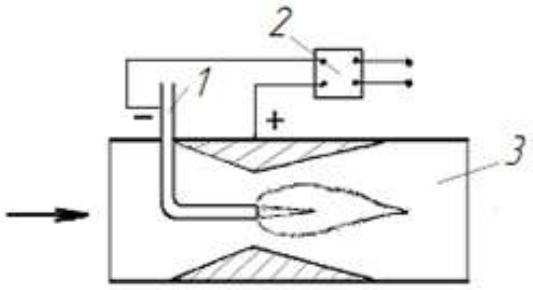
Во-первых, действие электростатического поля высокой напряженности на топливовоздушную смесь приводит к образованию озона, обладающего большой окислительной способностью, в результате чего растет скорость химической реакции, полнота тепловыделения, а также сокращается период воспламенения смеси.

Во-вторых, под влиянием электростатического поля уменьшается поверхностное натяжение и вязкость топлива, что способствует облегчению процесса разрушения струи и дробления капель воздушным потоком, и образованию качественной топливовоздушной смеси.

Кроме того, в результате дробления струи топлива на капли последние приобретают электрические заряды, что позволяет воздействовать на них

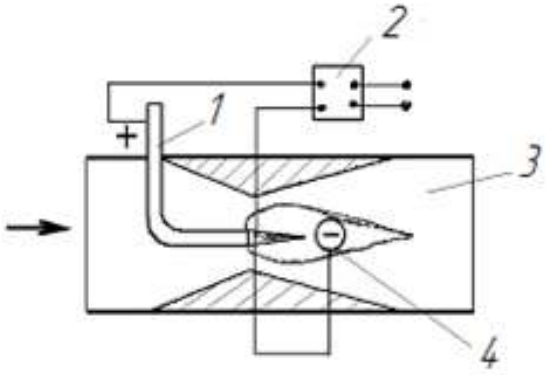
внешним электрическим полем и управлять процессом распыления в нужном направлении.

а)



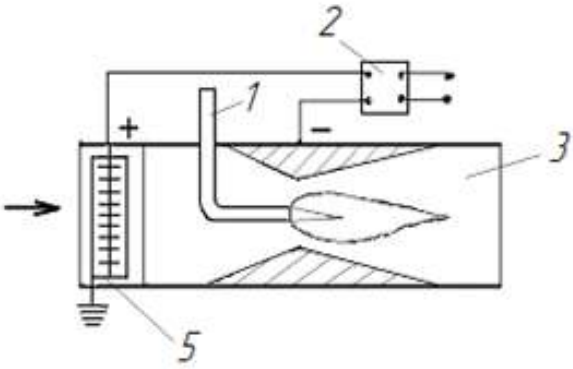
наложение электрического поля на процесс смесеобразования;

б)



наложение электрического поля на пламя;

в)



озонирование воздуха;

1 – распылитель топлива; 2 – блок питания; 3 – камера сгорания; 4 – электрод; 5 – электроозонатор.

Рисунок 1.2 – Схемы способов интенсификации процесса горения жидкого топлива

Таким образом, целесообразность использования электростатических полей как средства улучшения смесеобразования и интенсификации процесса горения в теплогенерирующих установках не вызывает сомнения.

Что же касается повышения кинетических характеристик процесса горения, то эксперименты показали, что наложение электрического поля на пламя (рисунок 1.2 *б*) во всех случаях интенсифицирует сам процесс горения за счет существенного увеличения скорости горения и распространения пламени [82, 83].

Механизм влияния электрического поля на скорость распространения пламени предполагает, что под действием поля электроны, генерируемые самим пламенем, приобретают достаточную кинетическую энергию поступательного движения и в процессе неупругих соударений с нейтральными молекулами горючей смеси образуют активные центры развития химической реакции (свободные атомы, ионы, радикалы), в результате чего интенсифицируется процесс горения [82, 83].

Кроме того, наложение электрического поля на пламя вызывает движение и положительных ионов (в сторону электрода, расположенного в пламени), которые увлекают за собой нейтральные частицы горючей смеси, в результате чего возрастает скорость распространения пламени и общая скорость процесса горения топлива.

Установлено, что скорость горения нефтяных топлив (дизельного, бензина и др.) в переменном электрическом поле возрастает в 2…4 раза [83, 85, 88, 92, 93].

Существенное влияние на процесс горения оказывает ионизированный воздух, используемый в качестве реагента (рисунок 1.2 *в*). Исследованиями [82, 86-88] установлено, что использование ионизированного воздуха интенсифицирует процесс горения на 4…39 % в зависимости от природы топлива и степени ионизации воздуха.

Наложение на воздушную среду, используемую в качестве реагента, внешнего электрического поля высокой напряженности приводит к ее иони-

зации и образованию озона, обладающего большей окислительной способностью и ускоряющего скорость химической реакции горения.

Таким образом, для генерирующих установок типа котел-парообразователь, используемых в сельскохозяйственном производстве, можно предположить следующие пути интенсификации процессов горения, а вместе с тем и снижения тепловых потерь от неполного сгорания топлива:

1. Совершенствование процесса смесеобразования за счет воздействия электрического поля высокой напряженности на топливовоздушную смесь.
2. Повышение кинетических характеристик процесса горения за счет наложения электрического поля на пламя.
3. Применение озонированного (ионизированного) воздуха в качестве реагента.

Каждый из указанных путей к настоящему времени изучен недостаточно, а их использование в сельскохозяйственных теплогенерирующих установках находится на начальной стадии применения.

В этой связи, для снижения тепловых потерь от неполного сгорания топлива при влаготермической обработке кормов и снижения удельного расхода топлива необходимо:

- выявить и изучить основные причины, влияющие на неэффективное увеличение расхода топлива;
- изыскать применяемые и более эффективные в условиях сельскохозяйственного производства способы снижения удельного расхода топлива;
- исследовать влияние озонированного воздуха и высоковольтного неоднородного электрического поля на снижение удельного расхода топлива и повышение производительности технологических линий влаготермической обработки кормов;
- исследовать влияние озонированного воздуха на снижение вредных выбросов в атмосферу;

- провести проверку результатов исследования в производственных условиях и дать им технико-экономическую оценку.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ КОРМОВ

2.1. Совершенствование процесса влаготермической обработки кормов в аппаратах периодического действия

В реальных условиях влаготермическая обработка кормов осуществляется системой машин (технологической линией), в состав которой входят теплогенерирующая (ТГУ) и теплопотребляющая (ТПУ) установки, а также теплопроводящие сети и устройства (ТС).

Такая система будет работать эффективно в том случае, если она обрабатывает максимальное количество корма с требуемым качеством при минимальных эксплуатационных затратах. И требования в совокупности являются составными элементами экономико – математической модели:

$$
\begin{aligned}
&З_{уэк} = \frac{З_{эк}}{G_к} \to min, \\
&З_{эк} \to min, \quad G_к \to max, \\
&П^{д}_{ТЛ} \geq П^{н}_{ТЛ}, \quad П^{н}_{ТЛ} = \frac{G_к}{\tau_{ТЛ}}, \\
&З^{д}_{э} \prec З^{н}_{э}, \quad З^{н}_{э} = З_{Т} + З_{эл}.
\end{aligned}
\tag{2.1}
$$

где $З_{уэк}$ – удельные эксплуатационные затраты, руб/т; $З_{эк}$ – эксплуатационные затраты, руб.; $G_к$ – масса обработанного корма, т; $П^{д}_{ТЛ}, П^{н}_{ТЛ}$ – действительная и номинальная производительности технологической машины, т/ч; $\tau_{ТЛ}$ – общее время работы технологической линии, ч.; $З^{д}_{э}, З^{н}_{э}$ – действительные и номинальные энергозатраты, руб.

Эксплуатационные затраты, в общем виде, включают следующие основные составляющие [94]:

$$З_{эк} = З_{п} + З_{т} + З_{эл} + З_{а} + З_{то} + З_{пр}, \qquad (2.2)$$

где $З_{п}$ – зарплата с начислениями, руб.; $З_{т}, З_{эл}$ – расходы на топливо и электроэнергию, руб.; $З_{а}$ – амортизационные отчисления, руб.; $З_{то}$ – затраты на техническое обслуживание технологической линии, руб.; $З_{пр}$ – прочие расходы, руб.

Из всех составляющих уравнения (2.2) основными являются затраты на топливо, которые достигают 28…42 % [52, 59, 63, 76].

Для того, чтобы влаготермическая обработка кормов была наиболее эффективной, необходимо, прежде всего, снизить затраты на топливо.

Для установления путей решения данного вопроса рассматривали теоретический график влаготермической обработки корма в технологической машине периодического действия в составе технологической линии (рисунок 2.1).

По данным этого рисунка видно, что общее время (τ) работы технологической линии запишется в виде суммы составляющих рабочего цикла:

$$\tau = \tau_{ТГУ} + \tau_{нк} + \tau_{тк} + \tau_{в}, \qquad (2.3)$$

где $\tau_{ТГУ}$ – продолжительность выхода ТГУ на рабочий режим (120^{0}С);

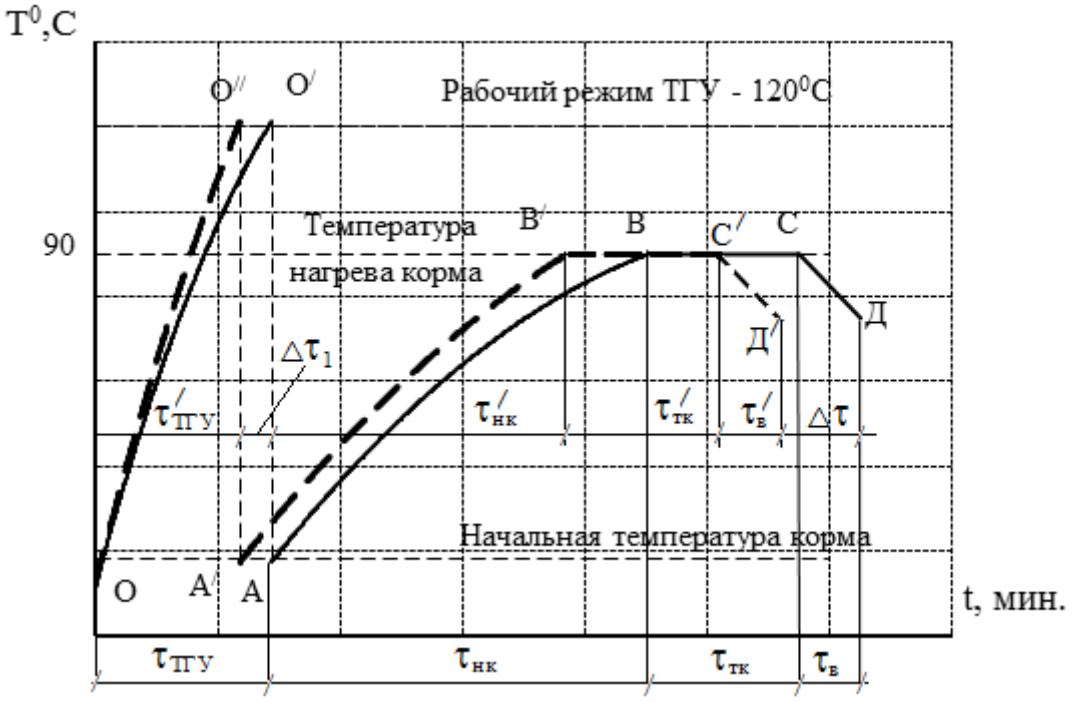
$\tau_{нк}$ – продолжительность нагрева корма в технологической машине;

$\tau_{тк}$ – продолжительность томления корма;

$\tau_{в}$ – продолжительность выгрузки корма из технологической машины.

На основе анализа (2.3) можно заключить, что продолжительность выгрузки корма определяется производительностью выгрузного устройства технологической машины и является величиной постоянной для конкретного вида корма.

Продолжительность томления корма задается зоотехническими требованиями и также является величиной постоянной.



OO' – кривая нагрева ТГУ до рабочей температуры (120^0С);

AB – кривая нагрева корма в ТПУ до заданной температуры;

BC – кривая томления корма;

$СД$ – кривая потерь энергии при выгрузке корма;

в точке O' производится подача пара в ТПУ;

в точке B подача пара прекращается;

$\tau'_{ТГУ}$, $\tau'_{нк}$, $\tau'_{тк}$, $\tau'_{в}$ параметры рабочего процесса технологической линии обработки корма при использовании озонированного воздуха, подаваемого на горение.

Рисунок 2.1 – Теоретический график рабочего цикла влаготермической обработки корма

Длительность выхода ТГУ на рабочий режим и продолжительность нагрева корма в технологической машине до требуемой температуры являются величинами переменными и могут изменяться в зависимости от интенсивности тепловых процессов, протекающих как в ТГУ, так и в технологической машине. Из этого следует, что общая продолжительность рабочего цикла технологической линии можно сократить за счет ускорения выхода ТГУ на рабочий режим (кривая OO') и ускорения нагрева корма в технологической машине (кривая $A'B'$) рисунок 2.1.

Продолжительность влаготермической обработки корма – основной технологический фактор, от которого зависит качество продукта, энергозатраты и стоимость самой влаготермической обработки в целом.

Таким образом, как видно из проведенного анализа, эффективность влаготермической обработки корма можно повысить за счет снижения продолжительности тепловой обработки, повышения производительности технологической линии и снижения расхода топлива.

В свою очередь, расход топлива можно существенно снизить за счет снижения тепловых потерь, которые, как показывают исследования, в реальных условиях могут достигать 70…72 % [59, 69, 71].

2.1.1. Анализ тепловых потерь при влаготермической обработке кормов

Тепловой баланс системы ″ТГУ-ТС-ТПУ″ представим выражением:

$$Q_{тп} = Q_{н}^{р} B = Q_{то} + \Sigma\ Q_{пот},\ \text{кДж} \qquad (2.4)$$

где $Q_{н}^{р}$ – низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг;

B – расход топлива теплогенерирующей установкой за время ее работы в технологическом процессе, кг;

$Q_{то}$ – расход теплоты на осуществление влаготермической обработки корма, кДж;

$\Sigma Q_{пот}$ – суммарные тепловые потери системы ″ТГУ-ТС-ТПУ″, кДж.

Суммарные тепловые потери для системы ″ТГУ-ТС-ТПУ″ представим в виде суммы составляющих:

$$\Sigma Q_{пот} = \Sigma Q_{ТГУ} + \Sigma Q_{ТПУ} + \Sigma Q_{ТС},\ \text{кДж} \qquad (2.5)$$

где $\Sigma Q_{ТГУ}$ – суммарные потери энергии ТГУ, кДж;

$\Sigma Q_{ТПУ}$ – суммарные потери энергии ТПУ, кДж;

$\Sigma Q_{ТС}$ – суммарные потери энергии ТС, кДж.

Тогда суммарные потери энергии теплогенерирующей установки можно представить выражением:

$$\Sigma Q_{ТГУ} = Q_{ст} + Q_{ос} + Q_{нст} + Q_{ухг} \ , \ \text{кДж} \qquad (2.6)$$

где $Q_{ст}$ – потери энергии на нагрев стенок установки, кДж;

$Q_{ос}$ – потери энергии в окружающую среду через стенки установки, кДж;

$Q_{нст}$ – потери энергии от неполного сгорания топлива, кДж;

$Q_{ухг}$ – потери энергии с уходящими газами, кДж.

Суммарные потери энергии теплопотребляющей установкой, можно представить по аналогии с (2.6) в виде:

$$\Sigma Q_{ТПУ} = Q'_{ст} + Q'_{ос} + Q_{пк} + Q_{пр}, \ \text{кДж} \qquad (2.7)$$

где $Q'_{ст}$ – потери энергии на нагрев стенок установки, кДж;

$Q'_{ос}$ – потери энергии в окружающую среду через стенки, кДж;

$Q_{пк}$ – потери энергии при перегревании корма выше температуры готовности, кДж;

$Q_{пр}$ – потери энергии при продувке установки, кДж.

Аналогичным образом можно представить и суммарные потери теплоты в теплопроводящей сети:

$$\Sigma Q_{ТС} = Q''_{ст} + Q''_{ос}, \ \text{кДж} \qquad (2.8)$$

где $Q''_{ст}$ – потери энергии на нагрев стенок элементов теплопроводящей системы, кДж;

$Q''_{ос}$ – потери энергии в окружающую среду через стенки элементов теплопроводящей системы, кДж.

Подставляя выражения (2.6), (2.7), (2.8) в уравнение (2.4), получим:

$$Q_{тп} = Q_н^р B = Q_{то} + Q_{ст} + Q_{ос} + Q_{нст} + Q_{ухг} + Q_{ст}^{/} + Q_{ос}^{/} + Q_{пр} + \\ + Q_{пк} + Q_{ст}^{//} + Q_{ос}^{//}, \text{ кДж} \quad (2.9)$$

Если потери энергии, идущие на нагрев стенок всех элементов исследуемой системы ″ТГУ-ТС-ТПУ″, представить их суммой:

$$Q_{ст.с} = Q_{ст} + Q_{ст}^{/} + Q_{ст}^{//}, \quad \text{кДж} \quad (2.10)$$

а потери в окружающую среду аналогично их составляющим:

$$Q_{ос.с} = Q_{ос} + Q_{ос}^{/} + Q_{ос}^{//}, \quad \text{кДж} \quad (2.11)$$

то уравнение теплового баланса примет вид:

$$Q_{тп} = Q_н^р B = Q_{то} + Q_{ст.с} + Q_{ос.с} + Q_{пр} + Q_{пк} + Q_{нст} + Q_{ухг}. \quad (2.12)$$

Из этого уравнения видно, что технологический процесс влаготермической обработки кормов в аппаратах периодического действия будет эффективным, если снизить расход топлива на его осуществление, а это, в свою очередь, возможно при снижении, прежде всего, потерь теплоты всеми или отдельными элементами исследуемой системы.

Количественно потери энергии, на нагрев стенок элементов исследуемой системы ″ТГУ-ТС-ТПУ″ составляет:

$$Q_{ст.с} = G_г C_г (t_{кг} - t_{нг}) + G_с C_с (t_{кс} - t_{нс}) + G_п C_п (t_{кп} - t_{нп}), \text{ кДж} \quad (2.13)$$

где $G_г$, $G_с$, $G_п$ – нагреваемая масса металлических корпусов ТГУ, ТПУ и ТС, кг;

$C_г$, $C_с$, $C_п$ – теплоемкость металлов, из которых изготовлены ТГК, ТС и ТПУ, кДж/(кг ^{0}К);

$t_{нг}$, $t_{нс}$, $t_{нп}$ – начальные температуры стенок ТГУ, ТС и ТПУ, ^{0}К;

$t_{кг}$, $t_{кс}$, $t_{кп}$ – конечные температуры стенок ТГУ, ТС и ТПУ, ^{0}К.

Как следует из уравнения (2.13), потери энергии, на нагрев стенок элементов исследуемой системы определяются их металлоемкостью, а также совершенством конструкции. Снижение вышеуказанных потерь энергии воз-

можно за счет совершенствования конструкции элементов исследуемой системы и самого технологического процесса тепловой обработки корма.

Потери энергии в окружающую среду через стенки элементов исследуемой системы ″ТГУ-ТС-ТПУ″ следует рассматривать как результат сложного теплообмена [66] и тогда уравнение теплопередачи можно записать в следующем виде:

$$Q_{ос.с} = \kappa_г F_г (t_{вг} - t_{нг}) \tau_г + \kappa_с F_с (t_{вс} - t_{нс}) \tau_с + \kappa_п F_п (t_{вп} - t_{нп}) \tau_п, \text{ кДж} \quad (2.14)$$

где $\kappa_г$, $\kappa_с$, $\kappa_п$ – коэффициенты теплопередачи через стенки ТГУ, ТПУ и ТС, кДж/(м^2 ^{0}К);

$F_г$, $F_с$, $F_п$ – площади нагреваемых стенок, м^2;

$t_{вг}$, $t_{вс}$, $t_{вп}$ – средние температуры нагреваемых стенок снаружи, ^{0}К;

$\tau_г$, $\tau_с$, $\tau_п$ – длительность работы каждого элемента исследуемой системы, с.

Для уменьшения теплопотерь все элементы исследуемой системы ″ТГУ-ТС-ТПУ″ должны иметь тепловую изоляцию. Тогда коэффициент теплопередачи при двухслойной стенки будет [66]:

$$\kappa = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2.15)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи от греющей среды к стенке и от изоляции стенки к окружающей среде, кДж/(м^2 ^{0}К);

λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности стенки и изоляции, кДж/(м^2 ^{0}К);

δ_1, δ_2 – толщины стенки и слоя изоляции, м.

Потери энергии в окружающую среду ($Q_{ос,с}$) через стенки элементов системы регламентируются на стадии проектирования, а реализуются путем разработки и применения эффективных конструктивных схем элементов си-

стемы и современных конструкционных и термоизоляционных материалов, что обеспечивает снижение потерь до минимума.

Тепловые потери $Q_{пр}$, связанные с продувкой теплопотребляющих установок (запарники-смесители периодического действия, варочные котлы и т.д.), обусловлены их конструктивными особенностями, а также особенностями самого технологического процесса. Для лучшего теплообмена между паром и нагреваемым кормом конденсат и воздух, находящиеся в кормозапарнике, удаляются продувкой, на что расходуется определенная масса пара, а, следовательно, и теплоты. Потери теплоты, связанные с продувкой аналогично [36, 50], можно представить уравнением:

$$Q_{п} = G_{п}(i_{п} - i_{к}), \text{ кДж} \qquad (2.16)$$

где $G_{п}$ – масса пара, расходуемого на продувку, кг;

$i_{п}$, $i_{к}$ – энтальпии пара и конденсата, кДж/кг.

Если массой воздуха, находящемся в первый момент в теплопотребляющей установке пренебречь ввиду небольшого ее значения по сравнению с массой конденсата, то можно считать, что при ее продувке выходит пароконденсатная смесь, состоящая из пара и конденсата, т.е.

$$G_{пк} = G_{п} - G_{к}. \qquad (2.17)$$

Тогда масса пара, расходуемого на продувку, будет определяться разностью:

$$G_{п} = G_{пк} - G_{к}. \qquad (2.18)$$

Если далее массу пара, расходуемую на продувку, выразить через площадь поперечного сечения трубопровода ($F_{тр}$) и скорость истечения пароконденсатной смеси ($V_{пк}$) на выходе из трубопровода, то получим:

$$G_{п} = F_{тр} V_{пк} \tau (\rho_{пк} - \rho_{к}), \qquad (2.19)$$

где τ – общая продолжительность продувки, с;

$\rho_{пк}$, $\rho_{к}$ – плотности пароконденсатной смеси и конденсата, кг/м^3.

Выразив $V_{пк}$ через давление пара в теплопотребляющей установке согласно [66, 93], получим:

$$V_{пк} = \sqrt{2g\frac{1}{\rho_{пк}}P_{изб}}, \qquad (2.20)$$

где $P_{изб}$ – избыточное (рабочее) давление пара в теплопотребляющей установке, МПа.

Подставляя выражения (2.19) и (2.20) в (2.16), получим:

$$Q_{пр} = F_{тр}\sqrt{2g\frac{1}{\rho_{пк}}P_{изб}}\,(\rho_{пк}-\rho_{к})\,\tau\,(i_{п}-i_{к}), \text{ кДж} \qquad (2.21)$$

Анализ выражения (2.21) показывает, что потери энергии при продувке тепло- потребляющей установки можно снизить путем понижения избыточного давления пара. Поэтому тепловая обработка корма в варочных котлах высокого давления сопровождается ростом тепловых потерь при продувке. В кормозапарниках-смесителях с низким давлением потери теплоты при продувке будут меньшими.

Рассмотрим следующую составляющую теплового баланса – потери теплоты на перегревание корма выше температуры готовности.

Исследованиями [36, 50, 77, 78] установлено, что при влаготермической обработке кормов температура отдельных слоев корма в запарниках не одинаковая. Несмотря на перемешивание, слои корма, расположенные ближе к паровым насадкам, имеют температуру выше, чем те, которые расположены дальше.

В этой связи, для доведения корма до полной готовности в ТПУ известных конструкций потребуется дополнительный расход тепла.

На наш взгляд, такие потери теплоты можно значительно уменьшить, если обеспечить доставку пара в ТПУ двумя путями, через нижние паровые

насадки, как и предусмотрено конструкцией, и через вращающиеся рабочие органы (мешалки).

Такое направление совершенствования процесса нагрева корма, с целью сокращения тепловых потерь, становится еще более очевидным, если функцией параметров производства и передачи пара, а также нагрева корма сделать продолжительность цикла.

Тогда на основе теории теплопередачи [95-98], процесс нагрева корма в ТПУ можно описать следующим уравнением:

$$G_{\text{к}} \cdot c_{к} \cdot dt = F_{p.o} \cdot \alpha_{o}(t_{n} - t_{\text{к}}) + q_{n}(i_{n} - i_{\text{к}}) \cdot d\tau \,, \tag{2.22}$$

где $G_{\text{к}}$ – масса обрабатываемого корма, кг;

$c_{к}$ – массовая теплоемкость обрабатываемого корма, кДж/кг·К;

dt – элементарное приращение температуры нагреваемого корма, ^{0}К;

$F_{p.o}$ – площадь теплопередающей поверхности рабочих органов, м^{2};

α_{o} – коэффициент теплопередачи через поверхности стенок рабочих органов запарника–смесителя, кДж/(м^{2}.^{0}К);

t_{n} – температура пара, ^{0}К;

$t_{\text{к}}$ – температура корма в текущий момент времени, ^{0}К;

q_{n} – массовый расход пара, кг/с;

i_{n}, $i_{\text{к}}$ – энтальпии пара и конденсата, кДж/кг;

$d\tau$ – элементарное время изменения температуры продукта, с.

Перепишем данное уравнение в виде, удобном для интегрирования

$$\int_{o}^{\tau_{n}} d\tau = G_{\text{к}} \cdot c_{к} \cdot \int_{t_{\text{н}}}^{t_{\text{к}}} \frac{dt}{F_{p.o} \cdot \alpha_{o}(t_{n} - t_{\text{к}}) + q_{n}(i_{n} - i_{\text{к}})}. \tag{2.23}$$

Анализ зависимости (2.23) показывает, что увеличение любого слагаемого знаменателя приводит к уменьшению продолжительности нагрева кор-

ма и рабочего цикла технологической линии. Это можно осуществить одновременно за счет повышения энтальпии пара и передачи корму дополнительного тепла через поверхности рабочих органов. При этом коэффициент теплопередачи α_o будет значительно выше при движении корма по горячим поверхностям лопастей рабочих органов, чем при подаче пара через систему паровых насадок.

Кроме того, допускается перерасход тепла и из-за страховочного перегрева корма, что особенно характерно для варочных котлов.

Согласно [36, 78], потери энергии при перегреве корма в аппаратах периодического действия определяются уравнением:

$$Q_{пк} = (t_c - t_г)\left[\frac{H^3 \pi \gamma_n C_n n}{4\kappa^2} - \frac{G \cdot r}{t_c - t_o} \cdot \frac{R_1^2}{\pi^2 a} \cdot (1 - e^{-NH})\right], \text{ кДж} \qquad (2.24)$$

где t_c, $t_г$ – температуры воды в запарнике и готовности корма, ^{0}С;

H – длина запарника, м;

γ_n – плотность корма, кг/м^3;

C_n – теплоемкость корма, Дж/кг^{0}К;

$\kappa = \frac{H}{d}$ – безразмерный параметр запарника;

d – диаметр запарника, м;

G – расход пара, кг/с;

r – скрытая теплота парообразования, кДж/кг;

t_o – начальная температура корма, ^{0}К;

R_1 – радиус частицы корма, м;

a – температуропроводность корма, м^2/с.

Анализ уравнения (2.24) показывает, что потери тепла на перегревание корма при периодическом запаривании можно сократить путем повышения

расхода пара или повышением его параметров, так как с увеличением G второе слагаемое увеличивается.

Потери энергии с уходящими дымовыми газами, как уже отмечалось, являются основными и определяются уравнением [43]:

$$Q_{ухг} = G_{дг} C_{дг} T_{уг} - LC_в T_в \text{, кДж/кг топлива} \qquad (2.25)$$

где $G_{дг}$ – масса дымовых газов при сжигании 1 кг топлива, кг;

$C_{дг}$ – весовая теплоемкость дымовых газов, кДж/кг ^{0}К;

$T_{уг}$ – температура уходящих газов, ^{0}К;

L – масса воздуха на 1 кг топлива, кг;

$C_в$ – весовая теплоемкость воздуха при постоянном давлении, кДж/кг ^{0}К;

$T_в$ – температура воздуха, ^{0}К.

Ориентировочно потери энергии с отходящими газами можно определить по формуле [73]:

$$Q_{ухг} = (a + в\alpha) \cdot \frac{T_{уг} - T_в}{100}, \% \qquad (2.26)$$

где a и $в$ – коэффициенты, зависящие от рода топлива и имеющие следующие значения: для дров и торфа - 1,60 и 3,75; для каменного угля и антрацита – 0,5 и 3,55; для мазута – 0,5 и 3,5, % на 100 ^{0}С,

α – коэффициент избытка воздуха, отнесенный к уходящим газам.

Из уравнений (2.25 и 2.26) следует, что потери энергии с отходящими газами увеличиваются с увеличением коэффициента избытка воздуха и температуры отходящих газов. Для снижения тепловых потерь необходимо стремиться к обеспечению полного сгорания топлива с минимальным избытком воздуха в топке и уменьшению температуры отходящих газов.

Снижение температуры отходящих газов достигается двумя способами: установкой на выходе дополнительных поверхностей нагрева и поддержанием в чистом виде всех поверхностей нагрева.

Особый интерес представляют потери энергии от неполного сгорания топлива, которые определяются суммой потерь от химического и механического недожогов. При использовании жидких видов топлива преобладает химический недожог, а при использовании твердых – механический [68, 73, 93].

Химический недожог возникает, прежде всего, от несовершенства организации смесеобразовательных процессов в топочном объеме. Так, при сжигании жидкого топлива может наблюдаться унос неиспарившихся и негазифицировавшихся частиц жидкой пыли.

Дополнительной причиной возникновения химического недожога может быть переход на низкотемпературный режим, когда газификационные явления и процесс горения замедляются, как всякий химический процесс. Это особенно заметно, когда температура в топке становится ниже 1000^0С, что может быть вызвано переохлаждением отдельных участков топки или чрезмерного местного избытка воздуха. Химический недожог выражается зависимостью [68, 80]:

$$q_x = 56{,}6 C^p \frac{CO}{CO_2 + CO}, \text{ ккал/кг,} \qquad (2.27)$$

где C^p – содержание углерода в рабочем топливе, %;

CO_2, CO – содержание углекислоты и окиси углерода в дымовых газах в процентах к объему;

56,6 – коэффициент, частное от деления 5660 ккал/кг (теплоты недополученной при сгорании 1кг C в CO) на 100 – для перевода C^p из процентов в доли килограмма.

Для ориентировочных расчетов потери энергии от химического недожога можно определить по эмпирической формуле [73]:

$$q_x = 3{,}2 CO \cdot \alpha, \% . \qquad (2.28)$$

Механический недожог обусловлен твердыми горючими остатками, не вступившими в процесс газификации и горения.

Оценка тепловой потери от механического недожога ($Q_{мн}$) определяется соотношением [68]:

$$q_м = 8000 \cdot C_{мн}, \text{ ккал/кг} \qquad (2.29)$$

где $C_{мн}$ – сумма углеродных остатков, вследствие несовершенства топочного процесса;

8000 – теплотворная способность углерода, ккал/кг.

Таким образом, на основе анализа тепловых потерь можно заключить, что основные из них в аппаратах периодического действия, связанные с перегревом корма и неполным сгоранием топлива.

Потери с отходящими газами по абсолютной величине наибольшие, обусловлены вторым законом термодинамики и в процессе эксплуатации ТГУ остаются практически постоянными. Уменьшить их можно незначительно, главным образом, за счет поддержания в оптимальных пределах значения коэффициента избытка воздуха.

Потери на нагрев стенок тепловых аппаратов и в окружающую среду через стенки, по сравнению с вышеуказанными меньше и в процессе эксплуатации остаются постоянными. Снижение их до минимума возможно за счет совершенствования конструкции аппаратов и применения современных теплоизоляционных материалов.

2.1.2. Оценка тепловых потерь от неполного сгорания топлива

Топочное устройство можно считать совершенным, если оно способно сжигать топливо с достаточно высокой полнотой тепловыделения, которая определяется соотношением [68]:

$$\psi_{пт} = \frac{Q_{выд}}{Q_н^р} = 1 - Q_{нст}, \qquad (2.30)$$

где $\psi_{пт}$ – коэффициент полноты тепловыделения;

$Q_{выд}$ – энергия, выделенная 1 кг сгоревшего топлива, кДж;

$Q_н^р$ – низшая теплотворная способность топлива, кДж;

$Q_{нст}$ – потери энергии от неполного сгорания топлива, %.

Из (2.30) следует, что коэффициент полноты тепловыделения можно повысить за счет снижения потерь энергии от неполного сгорания топлива. Потери энергии от неполного сгорания топлива можно представить известным выражением [68]:

$$Q_{нст} = q_{мех} + q_{хим}, \tag{2.31}$$

где $q_{мех}$, $q_{хим}$ – потери энергии от механического и химического недожогов топлива.

Известно, что эффективность процесса горения во всех случаях определяется временем сгорания каждой частички топлива, которая должна полностью выгореть за время ее нахождения в топке.

Полное время сгорания топлива определяется по аналогии с (2.31) [68,99]

$$\tau_г = \tau_ф + \tau_х, \tag{2.32}$$

где $\tau_ф$ – длительность стадии смесеобразования, с;

$\tau_х$ – длительность химической реакции процесса горения, с.

Если химическая реакция протекает несоизмеримо быстрее смесеобразовательного процесса, т.е. когда $\tau_х << \tau_ф$ (к этой области относятся практически все процессы горения), то продолжительность процесса сгорания топлива будет определяться чисто физическими факторами, регулирующими скорость смесеобразовательных процессов, т.е.

$$\tau_г \approx \tau_ф, \tag{2.33}$$

а отсюда следует, что смесеобразование является регулятором скорости горения и становится принципом регулировки основных топочных процессов.

Так, жидкое топливо предварительно ″измельчается″ до дисперсионного и тонкодисперсионного состояния чисто механически. В последующей стадии путем теплового воздействия оно доводится до окончательного молекулярного ″измельчения″ испарением, т.е. до газообразного состояния. Таким образом процесс газификации топлива является неизбежной предварительной стадией высокотемпературного процесса горения. Стадия газификации является самой замедленной стадией, определяющей общую скорость процесса горения.

Добиться требуемого снижения потерь энергии от механического и химического недожогов топлива можно путем интенсификации процессов горения [68, 79-81] и, в первую очередь, процесса смесеобразования и увеличения скорости реакции горения.

Согласно кинетической теории газов [81, 100], скорость химической реакции определяется зависимостью:

$$W = n_a n_в K_t, \tag{2.34}$$

или

$$W = P \cdot n_a n_в \cdot d_{ср}^2 \cdot \sqrt{\frac{8\pi RT}{M_{пр}}} \cdot e^{-\frac{E}{RT}}, \tag{2.35}$$

где $n_a, n_в$ – количество молекул *A* и *B* в 1 см^3;

$d_{ср}$ – средний эффективный диаметр сталкивающихся молекул, см;

P – поправочный множитель;

R – универсальная газовая постоянная (постоянная Больцмана), кал/град·моль;

T – абсолютная температура реакции, ^{0}К;

$M_{пр} = \frac{M_a \cdot M_в}{M_a + M_в}$ – приведенный молекулярный вес;

$M_a, M_в$ – молекулярный вес реагирующих веществ;

K_t – константа скорости реакции горения;

E – энергия активации, кал/моль;

e – основание натурального логарифма.

Из (2.35) следует, что скорость реакции горения зависит от величины константы, концентрации реагирующих веществ и пропорциональна количеству столкновений молекул друг с другом в единицу времени в единице объема пространства реагирующих газов. Константа скорости реакции имеет вид (уравнение Аррениуса) [81, 100]:

$$K_t = P \cdot d_{cp}^2 \cdot \sqrt{\frac{8\pi RT}{M_{np}}} \cdot e^{-\frac{E}{RT}}. \qquad (2.36)$$

Согласно уравнению Аррениуса константа скорости реакции горения определяется температурой горения и энергией активации молекул реагирующих веществ (топлива и окислителя).

Из кинетической теории газов известно, что из числа всех соударяющихся пар частиц (атомов, молекул) в реакцию вступает их незначительная доля и именно те частицы, суммарная кинетическая энергия которых при столкновении превышает некоторую критическую величину E. Возбуждение частиц до критического значения E можно осуществить с различной эффективностью не только в результате тепловых соударений, но и под действием других видов энергии.

Известно, что число активных столкновений Z определяется следующим уравнением [100]:

$$Z = Z_o \cdot exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \qquad (2.37)$$

где Z_o – число сталкивающихся частиц;

$exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$ – вероятность столкновения частиц.

Из уравнения (2.37) следует, что число активных столкновений можно повысить за счет снижения энергии активации E сталкивающихся частиц или увеличения температуры газовой смеси. Повышение температуры газовой смеси до значений, приводящих к образованию активных центров химических реакций, является нецелесообразным по экономическим соображениям. Поэтому остается только снижение энергии активации частиц реагирующих веществ. Здесь возможны два варианта.

Первый. Наиболее рациональным является повышение энергии сталкивающихся частиц за счет наложения электрического поля на газовую смесь или на пламя.

Одним из таких путей является использование неоднородных электрических полей для интенсификации процесса горения. Предпосылкой применения электрических полей служит наличие в горючей смеси топлива с воздухом электрических зарядов (электронов, ионов) за счет статической электризации капель распыливаемого топлива и температуры пламени [101]. Эти заряды рассеиваются в пламени в разных направлениях, и лишь некоторая доля из них участвует в неупругих столкновениях, приводящих к образованию активных центров химической реакции в виде атомов, радикалов, ионов или возбужденных частиц. Химическое взаимодействие частиц обусловливается в основном следующими факторами: природой частиц, энергетической подготовкой их к вступлению в реакцию и вероятностью соударений между ними.

Повышение энергии сталкивающихся частиц за счет наложения электрического поля на пламя приводит к тому, что электрон в поле напряженности E на пути x_n приобретает кинетическую энергию и ионизирует или диссоциирует нейтральную молекулу [102]:

$$\frac{mV^2}{2} = E_m \cdot x_n \cdot q_e, \qquad (2.38)$$

где m, V – масса и скорость электрона;

E_m – максимальная напряженность неоднородного поля;

x_n – путь электрона до столкновения с молекулой;

q_e – заряд электрона.

В результате этого появляются частицы с пониженной энергией активации, которые легко вступают в химическое взаимодействие, и таким образом увеличивают скорость горения топлива (газовой смеси).

Эффективность ионизационных процессов будет значительно выше, если применять неоднородные электрические поля, так как в них удается достичь значительных величин напряженности:

$$E_m = \Theta E, \tag{2.39}$$

где Θ – скалярный коэффициент;

E – напряженность однородного поля.

Для электродов ″острие-плоскость″ максимальная напряженность определяется по зависимости [103]:

$$E_m = \frac{4U}{l_n \cdot 4\frac{H}{r}} \cdot \frac{1}{r}, \tag{2.40}$$

где U – приложенное к электродам напряжение, кВ;

H – расстояние между электродами, см;

r – радиус кривизны острия, мм.

С другой стороны, число активных столкновений зависит от вероятности ионизации нейтральных молекул, которую можно представить как:

$$P = exp\left(-A_б U_u \frac{\delta}{E_m}\right), \tag{2.41}$$

где $A_б$ – коэффициент пропорциональности;

U_u – потенциал ионизации;

δ – относительная плотность смеси.

С учетом числа столкновений на 1 см пути и вероятности ионизации при столкновении получим зависимость для определения числа ионизации электрона на пути в 1 см:

$$n = \frac{1}{\lambda_e} exp\left(-A_б U_u \frac{\delta}{E_m} \right), \qquad (2.42)$$

где λ_e – средняя длина свободного пробега электрона.

Если допустить, что между числом ионизаций и скоростью химической реакции существует прямая зависимость, то можно записать:

$$W = K \cdot exp\left(-A_б U_u \frac{\delta}{E_m} \right), \qquad (2.43)$$

где K – коэффициент пропорциональности.

Вариация скорости химической реакции горения топлива должно приводить к изменению количества выделяемого в зоне химической реакции тепла. По Н.Н. Семенову [104], количество тепла, выделяющееся в единицу времени, прямо пропорционально объему V, в котором протекают реакции, скорости реакции W и теплоте $Q_э$, выделяющейся при каждом элементарном акте реакции, т.е.

$$q = WQ_э V . \qquad (2.44)$$

С учетом (2.43) уравнение (2.44) примет вид:

$$q = VQ_э K \cdot exp\left(-A_б U_u \frac{\delta}{E_m} \right), \qquad (2.45)$$

Уравнение (2.45) постулирует зависимость выделения тепла во фронте пламени от скорости генерирования активных центров химических реакций под действием электрического поля.

Второй. Понизить энергию активации молекул реагирующих веществ можно и путем ионизации воздушной среды, используемой в качестве окис-

лителя топлива, создав в ней высоковольтное неоднородное электрическое поле (коронный разряд). Влияние ионизированного воздуха на процессы горения различных видов топлива изучалось в ряде работ [82-91, 100].

Установлено, что озонированный воздух способствует интенсификации горения топлива и повышению температуры пламени.

В плазме коронного разряда происходят процессы ионизации, диссоциации и возбуждения молекул. Наиболее важным процессом является образование озона O_3. Общепринято считать, что в электрических разрядах, независимо от их формы, образование озона происходит в результате нескольких последовательных процессов по следующему механизму [105]:

$$O_2 + e \rightarrow O_2^* + e, \tag{2.46}$$

$$O_2^* \rightarrow O + O, \tag{2.47}$$

$$O + O_2 + M \leftrightarrow O_3 + M, \tag{2.48}$$

где O_2^* – возбужденная молекула кислорода;

M – частица аэрозоля, необходимая для отвода энергии.

Первым актом, ведущим к синтезу озона, является возбуждение ускоренными в электрическом поле свободными электронами колебательного уровня молекул кислорода (2.46). Следующим актом является диссоциация возбужденных молекул кислорода (2.47). Затем атомы кислорода реагируют с молекулами кислорода, образуя озон (2.48). Частица M необходима для отвода энергии от образующейся молекулы озона.

При этом энергия электронов, задаваемая напряженностью электрического поля в зоне ударной ионизации, должна находиться в определенных пределах, соответствующих максимальной вероятности диссоциации. Установлено [106], что генерирование озона зависит от количества электронов и их энергии, т.е. мощности, рассеиваемой в зоне ударной ионизации:

$$\Phi_{O_3} = P_e = \kappa \cdot J \cdot U_{\text{н}}, \tag{2.49}$$

где Φ_{O_3} – количество озона, образующегося в единицу времени;

P_e – энергия, рассеиваемая в зоне ионизации;

$\kappa \leq 1$ – коэффициент пропорциональности;

J – общий ток короны, мА;

$U_{\text{н}}$ – начальное напряжение зажигания короны, кВ.

Кроме того, та часть молекул, которая в результате действия электрического поля высокой напряженности становится активированной, приводит к снижению энергии активации и увеличению скорости реакции горения.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно полагать, что использование высоковольтного разряда, вызывающего ионизацию, диссоциацию и возбуждение молекул воздушной среды позволит повысить константу скорости реакции горения топлива, а, следовательно, и скорость самой реакции за счет снижения энергии активации молекул. Кроме того, использование высоковольтного разряда приводит к образованию озона в обрабатываемой воздушной среде, который является сильным окислителем, что также способствует увеличению скорости реакции горения топлива, а, следовательно, и снижению теплопотерь от химического недожога.

Вместе с тем, наряду с вышеуказанными факторами (концентрация реагирующих веществ, температура реакции, энергия активации), воздействующими на скорость горения топлива, определенное влияние будут оказывать и факторы, характеризующие состояние воздуха, подаваемого на горение (озоновоздушной смеси), и топлива. Согласно рисунка 2.2 такими факторами являются: концентрация озона в озоновоздушной смеси, температура и влажность воздуха, подаваемого на горение, температура и вязкость топлива и коэффициент избытка воздуха, т.е. скорость горения топлива в топочных устройствах котлов–парообразователей является многофакторной зависимостью.

Для наших исследований из всех вышеуказанных факторов были отобраны те, которые независимы и контролируемы. Такими факторами являют-

ся концентрация озона в озоновоздушной смеси (O_3), температура топлива (T_m) и коэффициент избытка воздуха (α).

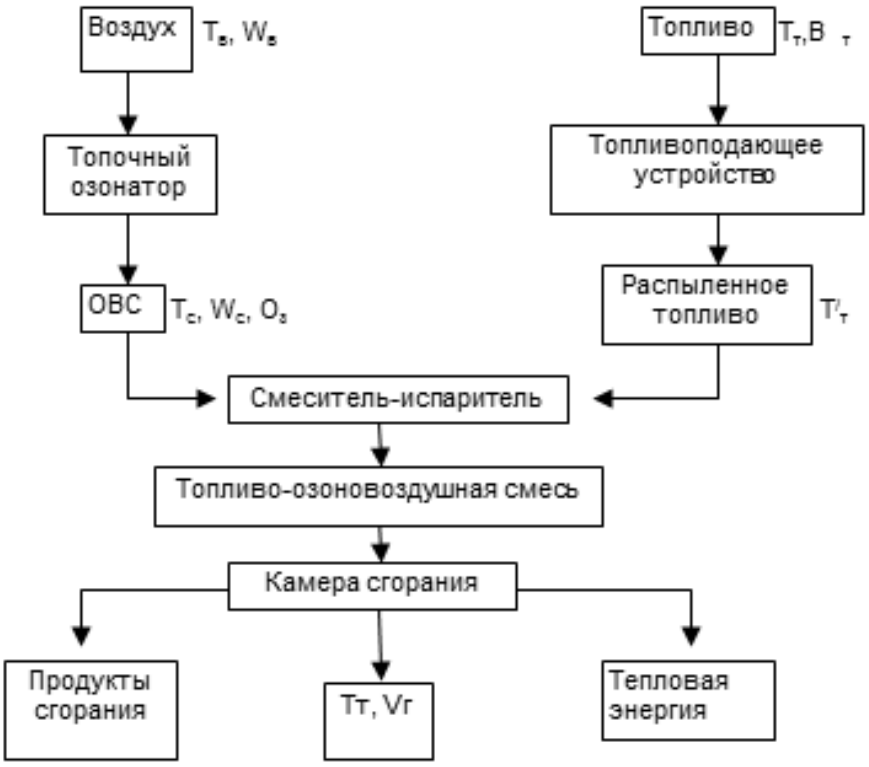


Рисунок 2.2 – Схема сжигания жидкого топлива в озоновоздушной смеси

Таким образом, скорость сгорания топлива в котлах–парообразователях, используемых для тепловой обработки кормов, можно описать целевой функцией вида:

$$V = f(O_3, T_m, \alpha) \tag{2.50}$$

или иначе функцией отклика типа:

$$y = f(x_1, x_2, x_3) \tag{2.51}$$

Для описания возможной связи отклика с факторами используем на первом этапе математическую модель в виде полинома первой степени [107-109].

$$\hat{y} = в_0 + в_1 x_1 + в_2 x_2 + \ldots + в_n x_n, \tag{2.52}$$

где x_1, x_2, x_n – независимые переменные; $в_0, в_1, в_2, в_n$ – коэффициенты регрессии.

2.2. Влияние озонированного воздуха на повышение производительности технологической линии влаготермической обработки корма

Если принять, что исследуемая система машин ″ТГУ-ТС-ТПУ″ представляет технологическую линию для тепловой обработки кормов, то производительность ее за один цикл тепловой обработки корма можно представить в виде:

$$П_{ТЛ} = \frac{V \cdot k \cdot \gamma_k}{\tau} \cdot n, \qquad (2.53)$$

где V – теоретический объем запарочной емкости теплопотребляющей установки, м^3;

k – коэффициент использования объема запарочной емкости;

$\gamma_к$ – удельная масса обрабатываемого корма, кг/м^3;

n – количество одновременно работающих однотипных теплопотребляющих установок;

τ – длительность одного цикла работы технологической линии, ч.

Для технологической линии, оборудованной теплопотребляющими установками периодического действия, время τ одного цикла тепловой обработки корма можно представить суммой:

$$\tau = \tau_{тгу} + \tau_ц, \qquad (2.54)$$

где $\tau_{тгу}$ – продолжительность выхода теплогенерирующей установки на рабочий режим, ч;

$\tau_ц$ – продолжительность цикла тепловой обработки корма в теплопотребляющей установке периодического действия, ч.

Согласно [36, 52], продолжительность цикла тепловой обработки корма в теплопотребляющей установке периодического действия складывается из продолжительности загрузки ($\tau_з$), выгрузки ($\tau_в$) и продолжительности тепловой обработки (τ), т.е.

$$\tau_ц = \tau_з + \tau + \tau_в. \qquad (2.55)$$

Подставляя (2.55) в (2.54), а результат в (2.53), получим:

$$П_{ТЛ} = \frac{V \cdot k \cdot \gamma_k \cdot n}{\tau_{тгу} + \tau_з + \tau + \tau_в}. \quad (2.56)$$

Таким образом, производительность исследуемой системы ″ТГУ-ТС-ТПУ″ зависит от продолжительности выхода теплогенерирующей установки на рабочий режим и продолжительности цикла тепловой обработки корма, включающего время загрузки и выгрузки корма, а также его тепловой обработки.

Время загрузки и выгрузки корма определяется техническими характеристиками технологической машины и является постоянной величиной для конкретного вида корма. Следовательно, основными факторами, влияющими на производительность исследуемой системы, будут снижение затрат времени на выход теплогенерирующей установки на рабочий режим и тепловую обработку корма.

Для подтверждения этого предположения рассмотрим теоретический график рабочего процесса влаготермической обработки корма в запарнике–смесителе периодического действия (рисунок 2.1).

Из графика видно, что

$$\tau = \tau_{тгу} + \tau_{нк} + \tau_{тк} + \tau_в, \quad (2.57)$$

где $\tau_{нк}$ – длительность нагрева обрабатываемого корма до заданной температуры, ч;

$\tau_{тк}$ – продолжительность томления корма, ч.

Продолжительность тепловой обработки корма в технологической машине складывается из времени нагрева корма ($\tau_{нк}$) до заданной температуры и времени томления ($\tau_{тк}$), т.е.

$$\tau = \tau_{нк} + \tau_{тк} \quad (2.58)$$

Конечная температура нагрева и время томления корма задаются зоотехническими требованиями и являются величинами постоянными. Отсут-

ствие в (2.57) времени загрузки корма в технологическую машину ($\tau_з$) объясняется тем, что загрузка корма производится параллельно работе ТГУ.

На основании изложенного в разделе 2.1.2, время выхода теплогенерирующей установки на рабочий режим ($\tau_{тгу}$) можно сократить за счет снижения тепловых потерь от неполного сгорания топлива путем интенсификации его горения, т.е. путем повышения скорости горения топлива. Это должно привести к увеличению количества выделяемого тепла в зоне горения топлива и повышению энтальпии пламени и пара, температуры теплоносителя (кривая OO'' графика) и, как следствие, к сокращению времени ($\tau_{тгу}$) и времени ($\tau_{нк}$), что, в конечном итоге, приведет к сокращению продолжительности влаготермической обработки корма и повышению производительности технологической линии и снижению всех тепловых потерь, а значит и топлива.

Сокращение продолжительности работы технологической линии по влаготермической обработки корма составит:

$$\Delta\tau = \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2, \tag{2.59}$$

где $\Delta\tau_1, \Delta\tau_2$ – сокращение времени вывода ТГУ на рабочий режим и нагрева обрабатываемого корма в технологической машине.

В соответствии с теоретическим графиком рабочего процесса влаготермической обработки корма (рисунок 2.1) можно записать, что

$$\Delta\tau_1 = \tau_{ТГУ} - \tau'_{ТГУ}, \tag{2.60}$$

$$\Delta\tau_2 = \tau_{нк} - \tau'_{нк}, \tag{2.61}$$

где $\tau_{ТГУ}, \tau'_{ТГУ}$ – длительность вывода ТГУ на рабочий режим, соответственно без озонированного воздуха и с ним, ч.;

$\tau_{нк,}\ \tau'_{нк}$ – продолжительность нагрева корма в технологической машине, соответственно без озонированного воздуха и с ним, ч.

С учетом положительного действия озонированного воздуха, продолжительность работы технологической линии уменьшается на время $\Delta\tau$. Тогда производительность линии определится по зависимости:

$$П_{ТЛ} = \frac{V \cdot k \cdot \gamma_{к} \cdot n}{\tau - \Delta\tau} .$$

(2.62)

Таким образом, с помощью интенсификации процессов горения топлива в теплогенерирующих установках можно не только снизить тепловые потери от неполного сгорания топлива, но и повысить производительность технологической линии, а вместе с тем, и существенно повысить эффективность тепловой обработки кормов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛАГОТРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОРМОВ И ИХ АНАЛИЗ

3.1. Поисковые экспериментальные исследования

Поисковые экспериментальные исследования проводили с целью подтверждения положительного влияния озонированного воздуха и высоковольтного неоднородного электрического поля на интенсификацию процесса горения топлива, а также с целью создания более совершенных лабораторных установок для проведения последующих исследований.

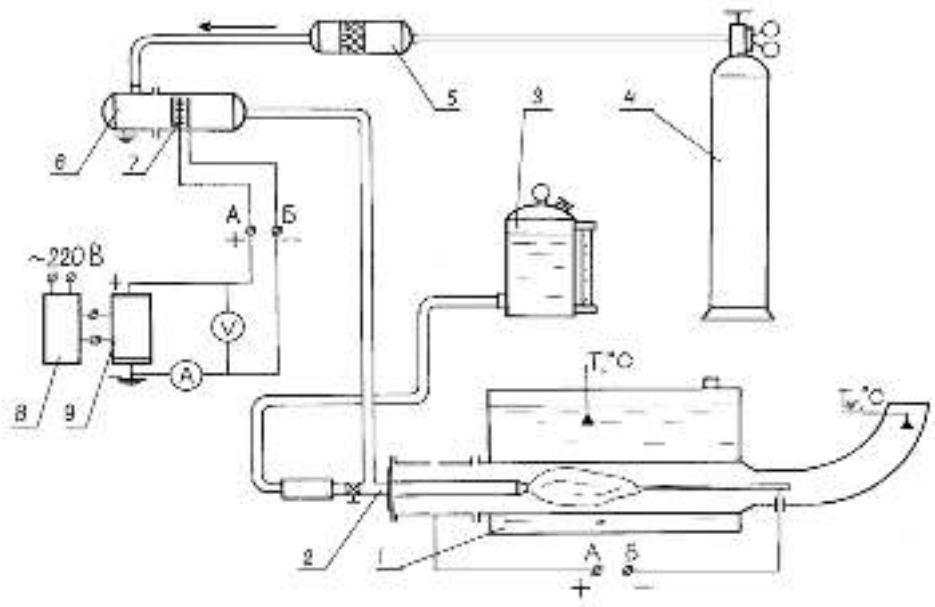
Для этого были изготовлены специальные лабораторные установки, представленные на рисунках 3.1 и 3.2.

В качестве исследуемого топлива использовали летнее топливо по ГОСТ4749-49. В процессе исследований топливо сжигали в камере сгорания калориметра (рисунок 3.1) и нагревали находящуюся в нем воду в количестве 12 литров до требуемой температуры. Подача топлива из бака 3 осуществлялась под давлением не более 0,03 МПа, которое создавалось ручным насосом и контролировалось показаниями манометра. Воздух на горение подавался из баллона 4 под давлением не более 0,5 МПа. Озонирование воздуха, подаваемого на горение, осуществлялось в замкнутом объеме ресивера 6 с помощью электроозонатора 7. Питание озонатора осуществлялось от выпрямительного высоковольтного блока 9. Изменение напряжения на озонаторе осуществлялось автотрансформатором 8 типа АОМН-40-220-75УХЛ4. Напряжение, подаваемое на электроозонатор, и силу тока в цепи некоронирующего электрода контролировали с помощью киловольтметра С196 и микроамперметра М2001.

Для проведения поисковых исследований, направленных на выявление влияния высоковольтного неоднородного электрического поля, накладывае-

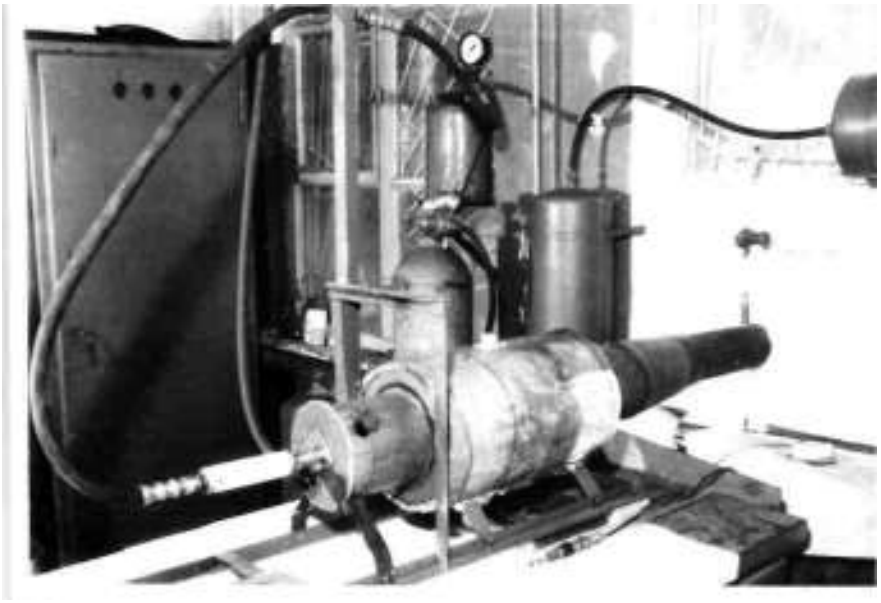
мого на пламя, на расход топлива, скорость и интенсификацию горения топлива с учетом изменения полярности на электродах использовали установку, схема которой представлена на рисунке 3.2.

а)



принципиальная схема

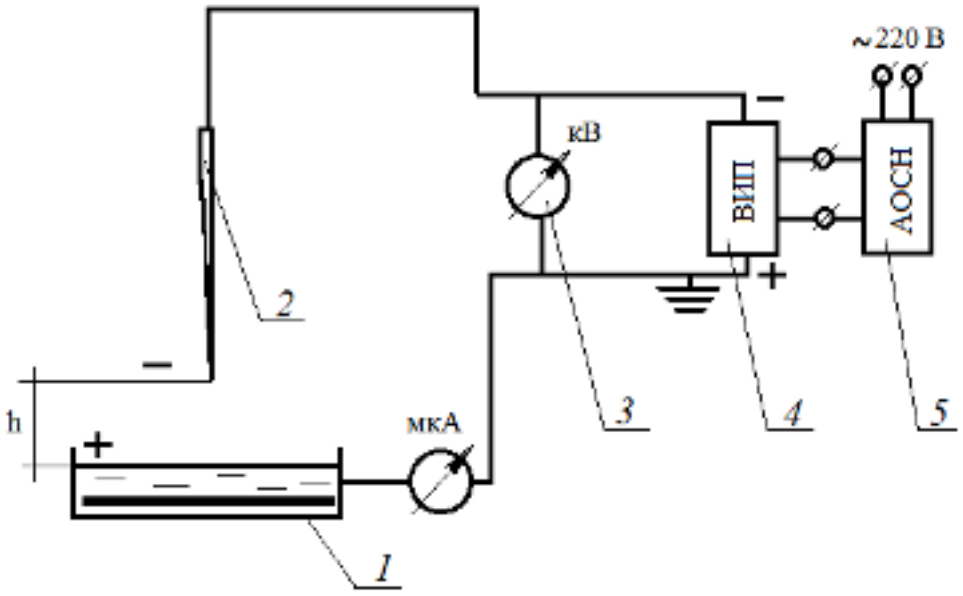
б)



общий вид установки

1 – калориметр; 2 – топливная горелка; 3 – топливный бак; 4 – баллон со сжатым воздухом; 5 – влагоочиститель воздуха; 6 – ресивер; 7 – электроозонатор; 8 – автотрансформатор АОМН-40-220-75УХЛ4; 9 – выпрямительный высоковольтный блок питания.

Рисунок 3.1 – Лабораторная установка для проведения поисковых исследований по выявлению влияния озонирования воздуха на расход топлива



1 – емкость для сжигания жидкого топлива; 2 – электрод-игла; 3 – киловольтметр; 4 – высоковольтный блок питания; 5 – автотрансформатор.

Рисунок 3.2 – Принципиальная схема лабораторной установки для проведения исследований по выявлению влияния высоковольтного неоднородного электрического поля на процесс горения

Напряжение на электродах изменяли от 0 до 10 кВт с помощью автотрансформатора 5 типа АОСН-20-220-75-У4. Напряжение, подаваемое на электроды 1 и 2, и силу тока в цепи контролировали с помощью киловольтметра С196 и микроамперметра ЭМКС-58М.

Максимальную напряженность (E_{max}) высоковольтного неоднородного электрического поля, накладываемого на пламя, определяли по формуле (2.40).

Влияние концентрации озона и напряжения электрического поля на интенсификацию процесса горения топлива определяли по формуле [86, 87]:

$$\Delta\tau = \frac{\tau_o - \tau}{\tau} \cdot 100\%, \qquad (3.1)$$

где $\Delta\tau$ – интенсивность горения топлива, %;

τ_o – продолжительность горения топлива в присутствии озона, мин.;

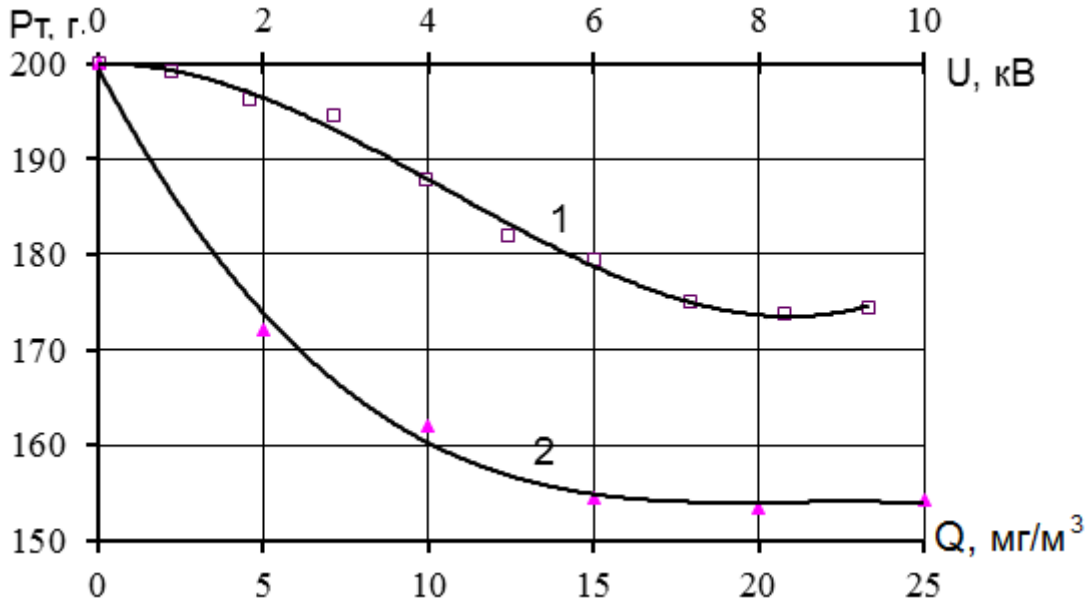
τ – продолжительность горения топлива при отсутствии озона, мин.

Результаты исследования влияния озонированного воздуха, подаваемого на горение, и высоковольтного неоднородного электрического поля, накладываемого на пламя, показывают (рисунок 3.3), что с увеличением концентрации озона и напряжения на электродах расход топлива снижается. Так, из полученных графиков следует, что введение даже незначительного количества озона (15…20 мг/м^3) способствует снижению расхода дизельного топлива (кривая 1) с 200 до 174 г, или на 13 %, а увеличение напряжения на электродах до 10 кВ снижает расход дизельного топлива до 153 г, или на 23,5 % (кривая 2), при отрицательной полярности электрода.

Во всех опытах по исследованию влияния озонированного воздуха на расход топлива воду в калориметре нагревали так, чтобы разность конечной и начальной её температур во всех опытах была постоянной 74,3 ^{0}C, что обеспечивало сообщение ей одного и того же количества энергии, равное 3736 кДж.

В опытах, связанных с использованием электрического поля разность температур воды в калориметре составляла 73,5 ^{0}C, что сообщало ей 3696 кДж энергии во всех опытах.

По данным рисунка 3.3 видно, что наиболее существенное влияние на снижение расхода топлива оказывает электрическое поле, накладываемое на пламя (кривая 2). Что же касается применения озонированного воздуха, то его действие в 1,8 раза ниже (кривая1). В первый момент при увеличении концентрации озона до 5 мг/м^3 расход топлива снизился всего лишь на 1,5 %, затем при увеличении концентрации с 5 до 15 мг/м^3 снижение расхода топлива составило 9,5 %. Дальнейшее увеличение концентрации озона снижает расход топлива всего на 1…1,5 %.



1 – изменение концентрации; 2 – изменение напряжения.

Рисунок 3.3 – Графики экспериментальных зависимостей расхода топлива от изменения концентрации озона и напряжения на электродах

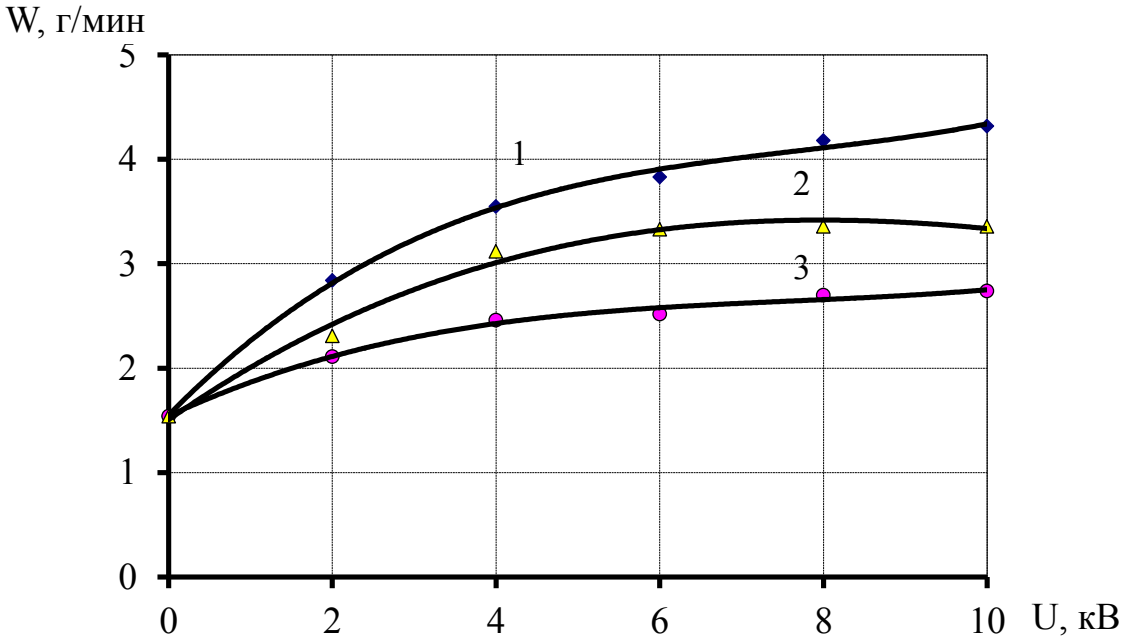
Результаты исследования влияния напряжения высоковольтного неоднородного электрического поля между электродами и их полярности на скорость и интенсификацию процесса горения топлива представлены на рисунках 3.4 и 3.5.

При наложении на пламя электрического поля постоянного тока напряжением 10 кВ и отрицательном электроде (рисунок 3.4) скорость горения дизельного топлива увеличивается с 1,54 до 4,32 г/мин или в 2,8 раза (кривая 1), в то же время при положительном электроде скорость горения дизельного топлива увеличивается только в 1,77 раза (кривая 3). Сила тока при положительном электроде изменялась от 6 до 38 мкА, а при отрицательном от 9 до 51 мкА.

При наложении на пламя электрического поля переменного тока того же напряжения скорость горения дизельного топлива также увеличивается,

но только на 1,82 г/мин или в 2,18 раза (кривая 2), что на 27 % меньше, чем при отрицательном электроде.

Таким образом наиболее значительное увеличение скорости горения дизельного топлива достигается при наложении на пламя высоковольтного электрического поля при отрицательном электроде.



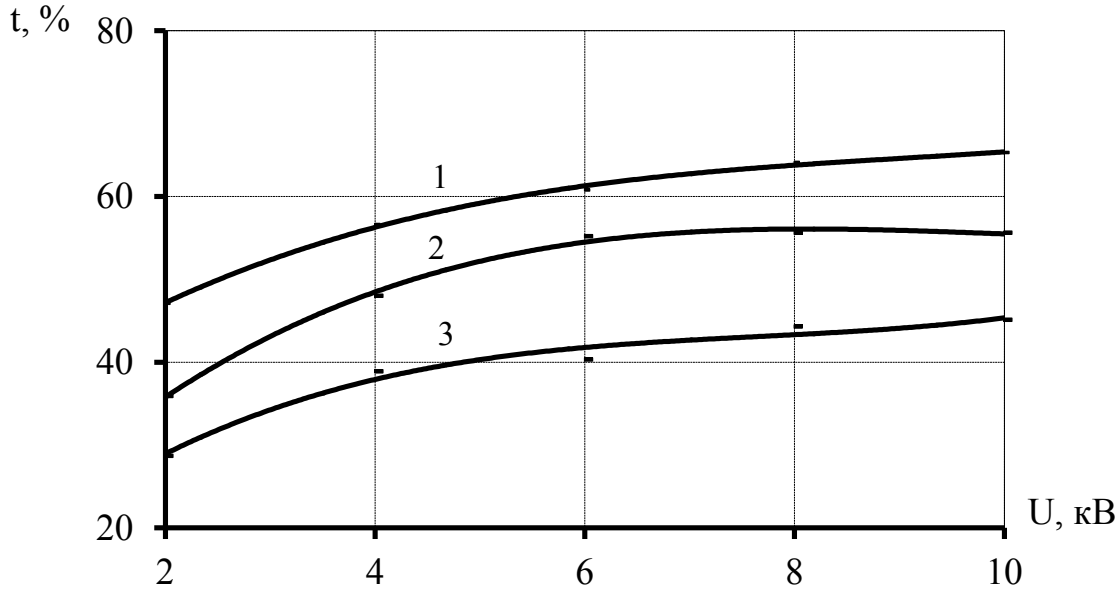
1 – постоянный ток, отрицательный электрод–игла; 2 – переменный ток;
3 – постоянный ток, положительный электрод.

Рисунок 3.4 – Графики экспериментальных зависимостей скорости горения дизельного топлива от напряжения и полярности электрического разряда

Графики экспериментальных зависимостей интенсификации горения топлива от напряжения, подаваемого на электрод и емкость, представлены на рисунке 3.5. Они показывают, что изменение напряжения в пределах от 0 до 10 кВ приводит к увеличению интенсификации горения от 47,1 до 65,3 % при отрицательном электроде (кривая 1) и от 35,9 до 55,6 % при переменном токе (кривая 2).

При положительном электроде (кривая 3) интенсификация процесса горения проявляется значительно слабее, чем в первых, двух случаях, т.е. полярность электрода и род тока оказывают большее влияние, на скорость, и

интенсификацию горения, т.е. при отрицательном электроде ионизация молекул топлива и воздуха в пламени больше, чем при положительном электроде, на что указывает и увеличение тока в цепи.



1 – постоянный ток, отрицательный электрод; 2 – переменный ток; 3 – постоянный ток, положительный электрод–игла.

Рисунок 3.5 – Графики экспериментальных зависимостей интенсификации горения дизельного топлива от напряжения и полярности электрического разряда

Кроме того, движение заряженных частиц (электронов, ионов) в пламени ускоряется наложением на него электрического поля. Величина ускорения определяется зависимостью [68]:

$$a = \frac{Z \cdot e \cdot E}{m}, \tag{3.2}$$

где Z – число элементарных зарядов e у частицы (с учетом знака);

E – напряженность электрического поля;

m – масса частицы.

Ускоренное движение заряженных частиц при столкновении их с молекулами топлива изменяет внутреннюю структуру последних. В результате

этих изменений часть молекул топлива может перейти в возбужденное или ионизированное состояние, а поэтому их энергия активации уменьшится и, следовательно, скорость химической реакции горения увеличится [82]. Внешне это проявляется как сокращение продолжительности горения, т.е. горение интенсифицируется. Высокая интенсификация горения от 60,8 до 65,3 % достигается при напряжениях 6…10 кВ. Наибольший прирост интенсивности на 1 кВ напряжения, подаваемого на электроды, достигается при изменении напряжения от 2 до 6 кВ и составляет 3,43 % на один киловольт. При изменении напряжения от 6 до 10 кВ он значительно меньше и составляет 1,13 % на один киловольт при постоянном токе и отрицательном электроде.

Результаты исследования влияния озонированного воздуха на скорость и интенсификацию горения топлива (рисунок 3.6) показывают, что с увеличением концентрации озона скорость горения топлива увеличивается (кривая 1), а сам процесс интенсифицируется (кривая 2).

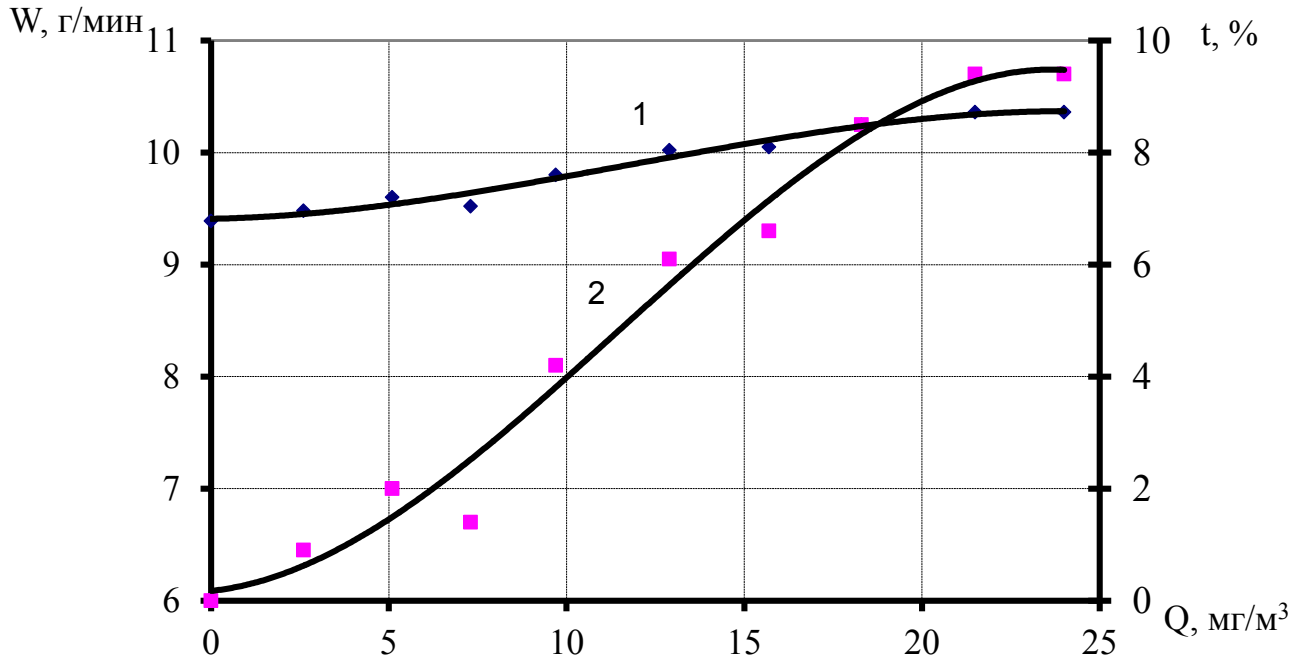
Установлено, что при изменении концентрации озона в пределах от 5 до 17,5 мг/м^3 наблюдается самый значительный рост скорости горения топлива от 9,5 до 10,2 г/мин, что составляет 7,4 %. Общий рост скорости горения топлива при изменении концентрации озона от 0 до 24 мг/м^3 составляет 110,3 %. Увеличение концентрации озона свыше 20 мг/м^3 практически не вызывает повышения скорости горения топлива.

Следует также отметить, что рост скорости горения топлива при подаче озонированного воздуха сопровождается интенсификацией горения. Так, при изменении концентрации озона в пределах от 0 до 24 мг/м^3 процесс горения топлива интенсифицируется на 9,4 %, т.е. настолько же сокращается продолжительность горения.

Анализ результатов исследований влияния высоковольтного неоднородного электрического поля на скорость и интенсификацию горения дизельного топлива (рисунок 3.7) показывает, что с увеличением напряжения

на электродах скорость горения топлива увеличивается (кривая 1), а сам процесс интенсифицируется (кривая 2).

Установлено, что с увеличением напряжения на электродах до 10 кВ скорость горения топлива увеличивается с 9,17 до 11,2 г/мин, или на 22,1 %. Наиболее интенсивный рост скорости горения топлива 0,32 г/мин на 1 кВ наблюдается при изменении напряжения на электродах в пределах от 0 до 5 кВ и совсем незначительный 0,06 г/мин на 1 кВ в пределах от 5 до 10 кВ.



1 – кривая скорости горения; 2 – кривая интенсификации горения.

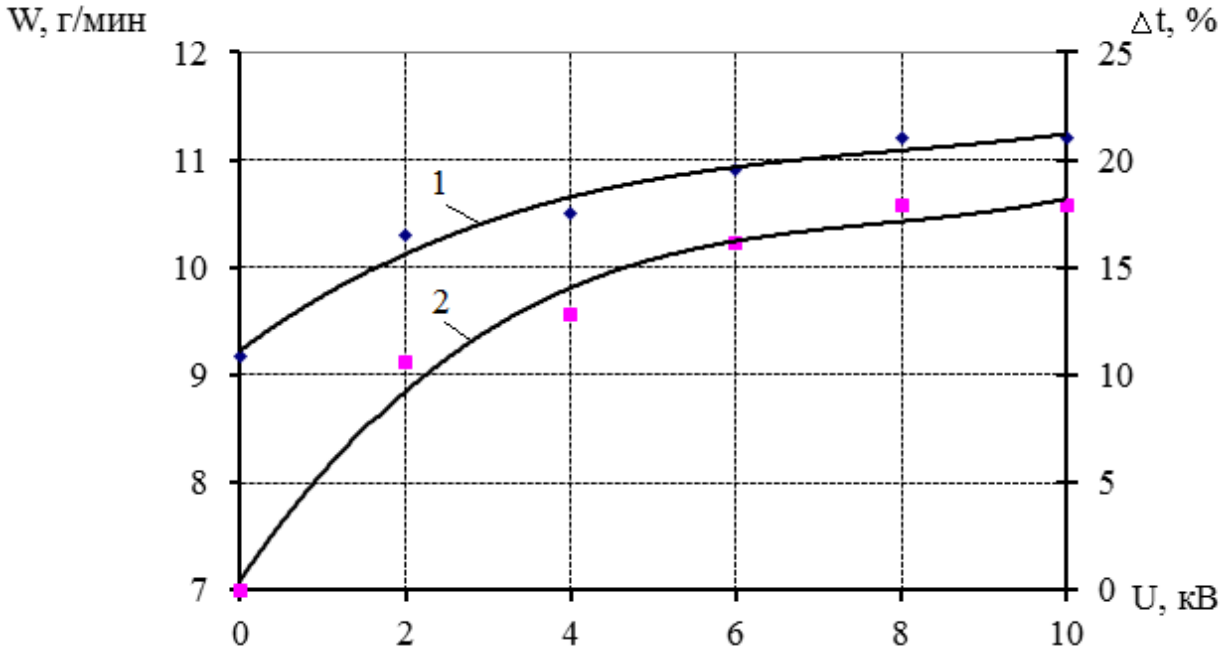
Рисунок 3.6 – Графики экспериментальных зависимостей скорости и интенсификации горения дизельного топлива от изменения концентрации озона

С изменением напряжения от 0 до 10 кВ процесс горения топлива интенсифицируется на 17,9 % (кривая 2).

Таким образом, на основании результатов поисковых исследований можно заключить, что использование озонированного воздуха, подаваемого на горение, а также наложение на пламя высоковольтного неоднородного электрического поля позволяет значительно повысить скорость сгорания топлива и интенсифицировать сам процесс горения, а это позволяет сокра-

тить длительности вывода ТГУ на рабочий режим, и разогрева обрабатываемого корма в технологической машине.

В связи с вышеизложенным, для проведения дальнейших исследований была принята рабочая гипотеза о возможности совершенствования технологического процесса влаготермической обработки корма за счет интенсификации процесса разогрева обрабатываемого корма в технологической машине.



1 – скорость горения; 2 – интенсификация процесса горения.

Рисунок 3.7 – Графики экспериментальных зависимостей скорости и интенсификации горения дизельного топлива от изменения напряжения на электродах

Учитывая результаты поисковых исследований, а также то обстоятельство, что начиная с 90–х годов, в стране наметилось существенное сокращение использования светлых нефтепродуктов в качестве топлива для теплогенерирующих установок и, в первую очередь, дизельного топлива как наиболее дорогостоящего, встал вопрос использования для этих целей топлив с утяжеленным фракционным составом (печного бытового, мазутов Ф5, Ф12, М40 и М100), а также природного газа [63, 67, 110-113].

В зависимости от температуры перегонки нефтепродукты делятся на фракции: бензиновые с температурой перегонки до 200-220^{0}С, керосиновые – 140-300^{0}С, дизельные –190-350^{0}С, соляровые – 300-400^{0}С, мазутные – свыше 350^{0}С [65]. Бензиновые, керосиновые, дизельные и соляровые фракции являются светлыми нефтепродуктами.

В этой связи в качестве исходного топлива для проведения исследований были выбраны дизельное, печное бытовое, мазут флотский Ф5 и природный газ пропан, наиболее широко применяемые в теплогенерирующих установках, используемых в сельскохозяйственном производстве и отличающихся по своим техническим характеристикам (таблица 3.1) [65].

Таблица 3.1 Техническая характеристика жидких топлив, используемых при проведении исследований

№ п/п	Наименование показателей	Марка топлива		
		Диз. летнее ДЛ	Печное бытовое ТПБ	Мазут флотский Ф5
1	Вязкость, ^{0}УВ при 50^{0}С	5	1,15	5
2	Температура вспышки, ^{0}С не ниже	65	42	80
3	Температура застывания, ^{0}С не выше	-5	-15	-5
4	Низшая теплота сгорания, кДж/кг	42500	41870	41450
5	Температура сжигания (T_{max}), ^{0}С	2092	2100	2100
6	Массовая доля в рабочем составе топлива различных элементов, %			
	C^p	86,3	86,2	87,8
	H^p	13,3	12,9	10,7
	S^p	0,3	0,5	0,7
	O^p+N^p	0,1	0,4	0,8

Для бытового потребления промышленностью выпускается топливо – печное бытовое ТПБ (ТУ38.101656-76), которое применяется для работы ма-

ломощных (мелких) отопительных котельных и котлов–паропроизводителей, используемых в сельскохозяйственном производстве, а также различного рода теплогенераторов [71, 110, 112].

Мазуты, применяемые для производства тепловой энергии в котлах, делятся на флотские мазуты марки Ф5 и Ф12 (легкие топлива), топочные мазуты марок 40В и 40 (средние топлива), топочные мазуты марок 100В,100 и 200 (тяжелые топлива) [65].

Флотский мазут предназначен для использования в судовых котлах, газотурбинных установках и двигателях, поэтому его условная вязкость при температуре 50^0С не превышает 5-12^0 УВ.

Природный газ пропан содержит CO_2 =0,1 %, CH_4 =98 %, N_2 =1,2 %, $C_пH_п$=0,7 % и имеет низшую теплоту сгорания 93203 кДж/$м^3$ [64, 111].

Для проведения исследований используется озоновоздушная смесь в качестве реагента для целей интенсификации процесса горения, в составе которой используется озон.

Озон – аллотропная модификация кислорода. Газ синего цвета с резким, раздражающим запахом, температура кипения -111,9 ^{0}С, ядовит, взрывоопасен. При концентрации от 0 до 15 % считается безопасным. Допустимая норма содержания озона в помещении 0,1 мг/$м^3$ [114]. В промышленности озон получают в результате ряда процессов, сопровождающихся возбуждением молекулы кислорода светом или электрическим разрядом.

Основным качеством, определяющим специфику физических и химических свойств озона, является большая избыточная энергия его молекул:

$$O_3 \rightarrow 3/2\ O_2 + 24 \text{ ккал/моль}$$

В результате этого озон является взрывоопасным соединением во всех трех агрегатных состояниях. Озон также имеет склонность к разложению и является сильнейшим окислителем. Химические реакции с участием озона протекают очень быстро и с малыми энергиями активации, скорость распада озона возрастает с температурой реакции. В результате большой окислительной способности озон может применяться и в топочных процессах.

3.2. Исследование влияния озонированного воздуха на интенсификацию сгорания исследуемых топлив

Перед проведением исследований по оценке влияния озонированного воздуха на интенсификацию процесса горения и полноту сгорания топлива проводили исследования по установлению оптимальных концентраций озона в озоновоздушной смеси, подаваемой на горение для каждого вида и марки исследуемого топлива, т.е. таких концентраций, при которых достигалось бы наибольшее снижение расхода топлива.

Исследования проводили на лабораторной установке, представленной на рисунке 3.8. Установка позволяла провести исследования с осуществлением подогрева топлива, подаваемого на горение до требуемой температуры (80^oC).

Воздух на горение подавался по воздуховоду вентилятором 2 через электроозонатор 3. Питание электроозонатора осуществлялось от выпрямительного высоковольтного устройства типа В-13/6,5-30 через автотрансформатор типа АОМН-40-220-75УХЛ4 или от высоковольтного блока питания конструкции ВНИПТИМЭСХ [115-117], позволяющего повышать напряжение на электродах электроозонатора до 20-22 кВ.

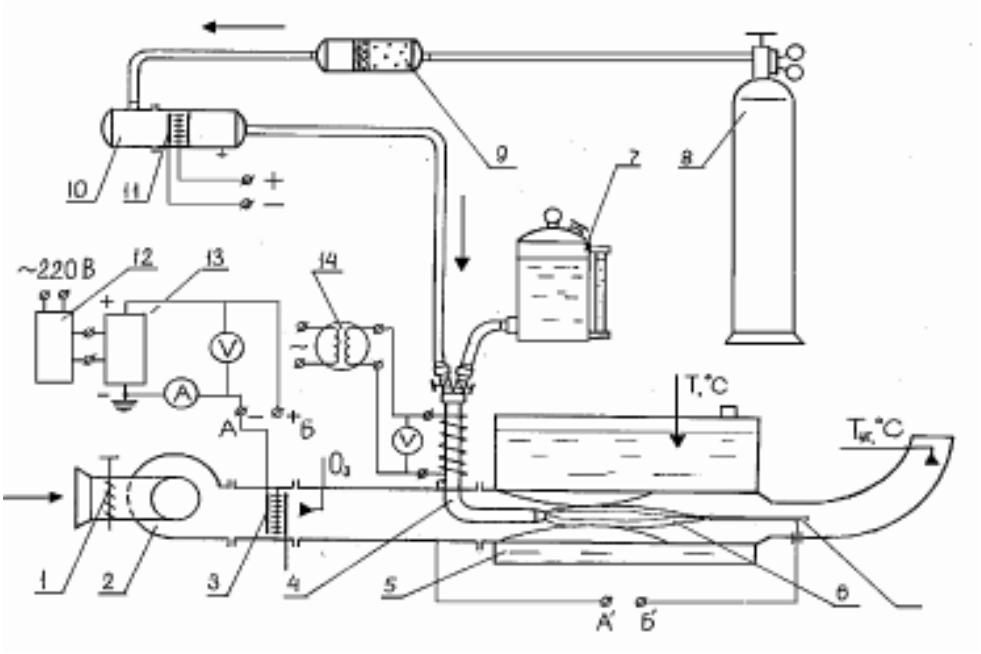
Расход воздуха, необходимого для полного сгорания 1 кг топлива устанавливали для каждого вида исследуемых топлив расчетным путем [120], значения его представлены в таблице 3.2.

Исследования по определению оптимальных концентраций озона в озоновоздушной смеси, подаваемой на горение для исследуемых топлив, представлены графиками экспериментальных зависимостей (рисунок 3.9) и показывают, что с увеличением концентрации озона в воздухе, подаваемом на горение, расход всех исследуемых топлив снижается от 2,2 до 12,8 %.

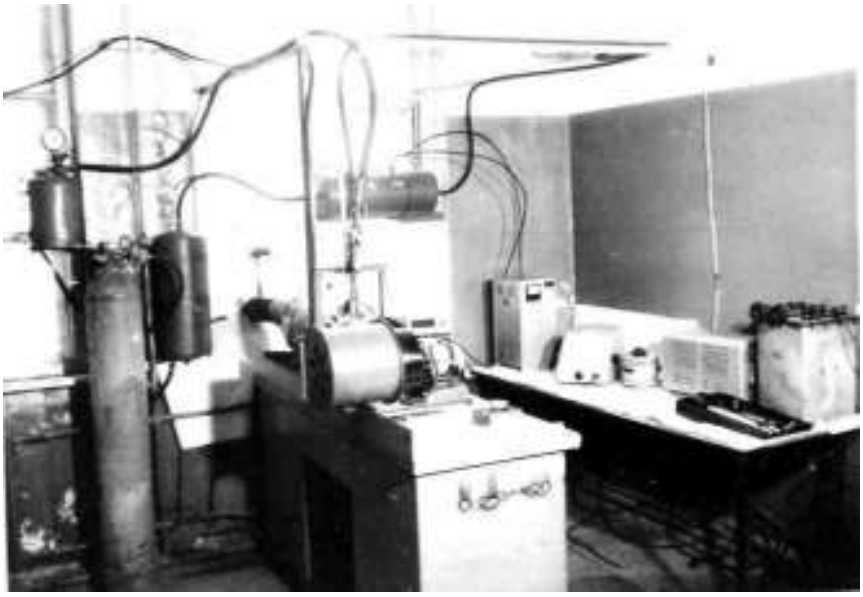
Таблица 3.2 Теоретические и требуемые значения количества воздуха для полного сгорания 1 кг исследуемых топлив

№ п/п	Исследуемое топливо	Коэффициент избытка воздуха, α	Теор. необх. объем воздуха, V_m, кг/кг		Требуемый объем воздуха, $V_д$	
			кг/кг	нм^3/кг	кг/кг	нм^3/кг
1	Дизельное	1,10	14,5	11,2	15,95	12,4
2	Печное бытовое	1,15	14,3	11,06	16,45	12,7
3	Мазут Ф5	1,20	13,8	10,7	16,60	12,8
4	Газ пропан	1,05	36,2	28,0	38,0	29,4

а)



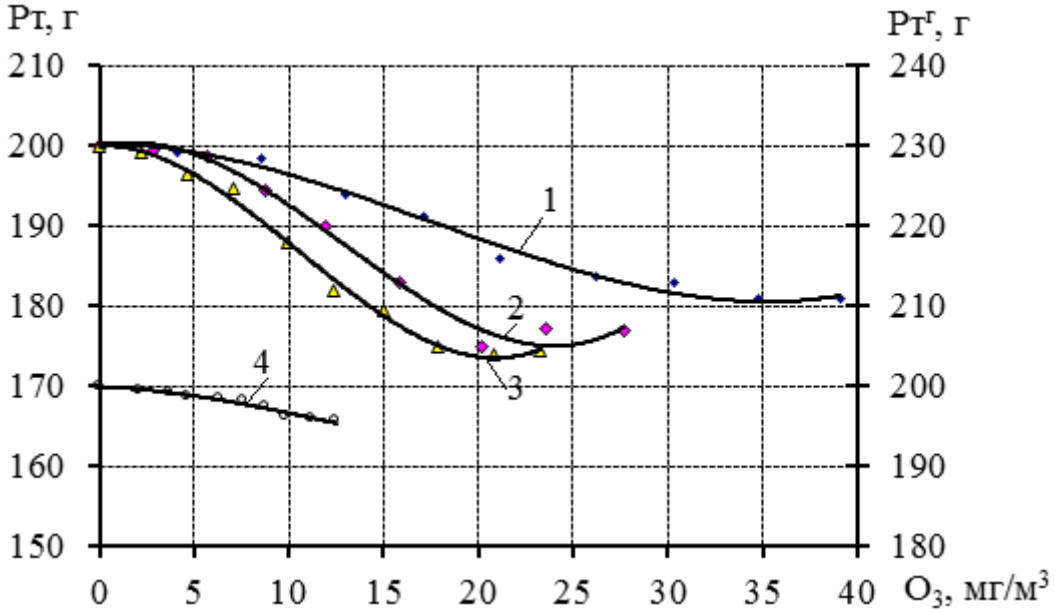
б)



а) принципиальная схема; б) общий вид.

1 – регулируемая жалюзийная решетка; 2 – вентилятор с электродвигателем; 3 – электроозонатор; 4 – горелка с устройством для подогрева топлива; 5 – калориметр; 6 – камера сгорания; 7 –- топливный бак с мерным устройством и подкачивающим насосом; 8 – баллон со сжатым воздухом; 9 – влагоочиститель воздуха; 10 – ресивер; 11 – электроозонатор; 12 – автотрансформатор; 13 – выпрямительный высоковольтный блок; 14 – трансформатор; 15 – электрод.

Рисунок 3.8 – Лабораторная установка для исследования влияния озонирования воздуха и высоковольтного неоднородного электрического поля на интенсификацию и скорость горения жидких топлив



$Р_т$ – расход жидких топлив; $Р_т^г$ – расход газа пропана; 1 – мазут флотский; 2 – печное бытовое топливо; 3 – дизельное топливо; 4 – газ пропан.

Рисунок 3.9 – Графики экспериментальных зависимостей расход топлива от изменения концентрации озона

Так, наиболее полное сжигание газа пропана достигается при концентрации озона от 10 до 12,5 мг/м^3 (кривая 4), дизельного топлива при концентрации от20 до 23,5 мг/м^3 (кривая 3), печного бытового топлива при концентрации от 22,5 до 27,5 мг/м^3 (кривая 2) и мазута Ф5 при более высокой кон-

центрации от 32,5 до 37,5 мг/м^3 (кривая 1). Различие значений полученных концентраций озона можно объяснить вариацией физико-химических свойств исследуемых топлив.

Таким образом, для проведения дальнейших исследований на основании полученных результатов приняты следующие значения концентраций озона: для газа пропана 11,5 мг/м^3; для дизельного топлива 22 мг/м^3; для печного бытового топлива 25 мг/м^3 и для мазута Ф5 36 мг/м^3. Эти величины являются средними для вышеуказанных интервалов изменения концентрации озона.

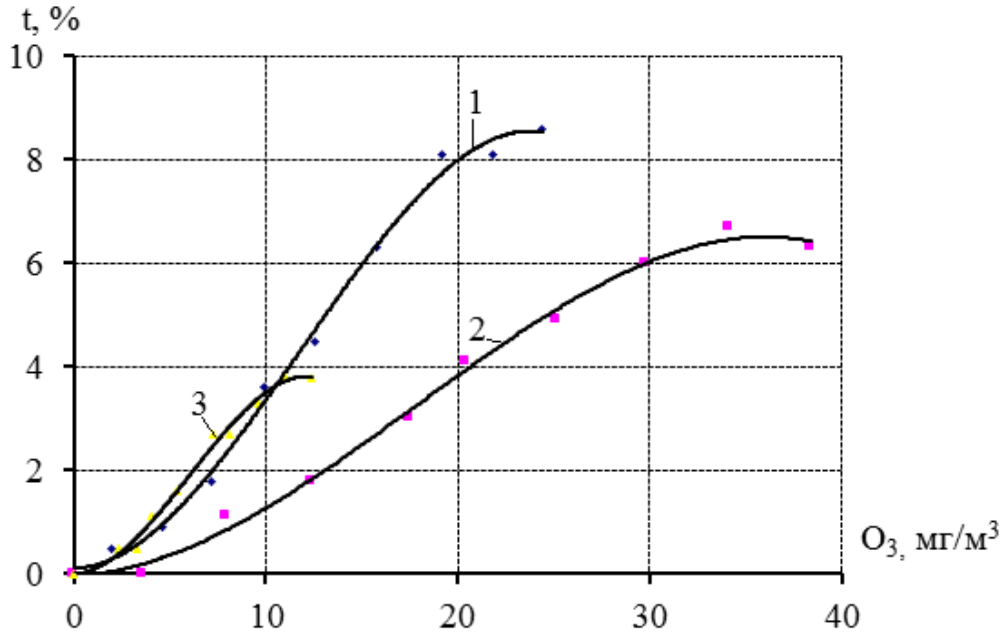
Влияние озонированного воздуха на интенсификацию процессов сгорания топлива отмечают многие исследователи [81-83, 87]. Это связано, в первую очередь с тем, что озон является более активным окислителем, чем кислород и воздух. Большинство реакций с участием озона протекает быстрее и с малыми энергиями активации [114].

Проведенные нами исследования [118] по определению влияния озонированного воздуха на интенсификацию процессов горения и тепловыделения показывают, что применение озонированного воздуха в качестве реагента интенсифицирует горение топлива, увеличивает полноту его сгорания и тепловыделение. Установлено, что озонированный воздух, используемый в качестве реагента, интенсифицирует горение исследуемых топлив на 4–8 % (рисунок 3.10). Наибольший эффект достигается при горении печного бытового топлива (кривая 1). При концентрации озона от 20 до 23,5 мг/м^3 горение интенсифицируется на 8–8,5 %. Горение мазута Ф5 (кривая 2) интенсифицируется на 6–6,8 % при концентрации озона от 30 до 38 мг/м^3. И совсем незначительный эффект достигается при сжигании газа пропана (кривая 3). При концентрации озона от 10 до 12,5 мг/м^3 горение интенсифицируется всего на 3,5–3,8 %.

В ходе лабораторных исследований установлено, что процесс интенсифицируется за счет уменьшения времени сгорания топлива, которое обуслов-

лено увеличением скорости горения. Следовательно, скорость горения является основным фактором, определяющим интенсификацию самого процесса.

Установлено, сто с увеличением концентрации озона увеличивается количество дополнительно выделяющейся теплоты (рисунки 3.11, 3.12) и повышается температура уходящих газов (рисунок 3.13), что является внешним признаком интенсификации процесса горения.



1 – печное бытовое топливо; 2 – мазут Ф5; 3 – газ пропан.

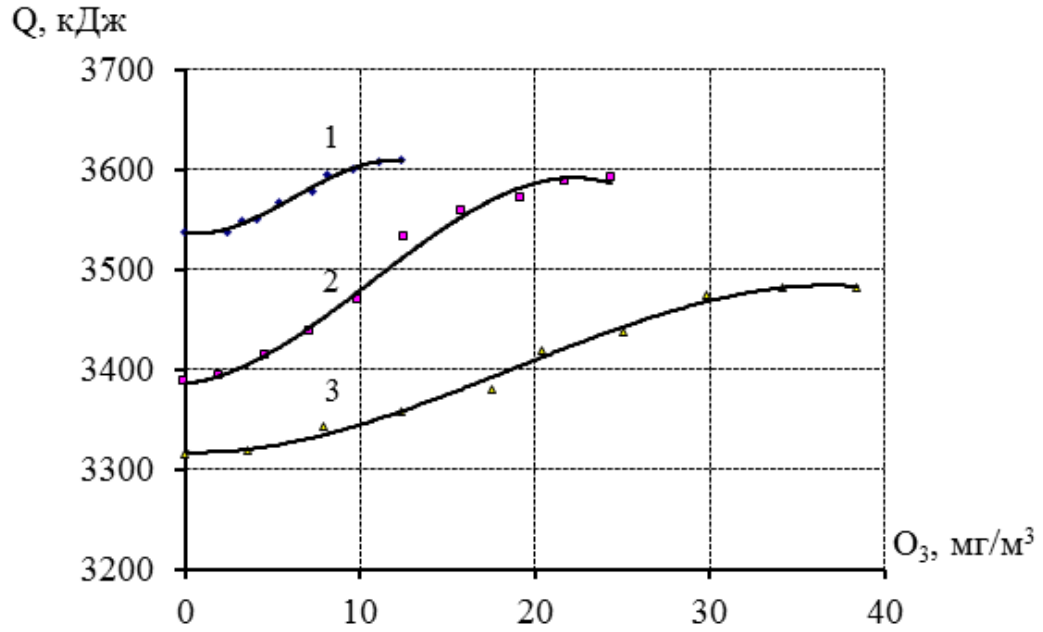
Рисунок 3.10 – Графики экспериментальных зависимостей степени интенсификации процессов горения топлива от изменения концентрации озона

Так, при сжигании 200 г печного бытового топлива с подачей на горение чистого воздуха было выделено 3388 кДж энергии (рисунок 3.11, кривая 2), пошедшей на нагрев 12 литров воды в калориметре, а при подаче воздуха с концентрацией озона 24,4 мг/м^3 было выделено уже 3591 кДж энергии, или на 6,0 % больше (рисунок 3.12, кривая 1), при этом температура уходящих газов увеличилась с 246 до 262,6 ^{0}С, или на 6,7 % (рисунок 3.13, кривая 2).

При сжигании мазута Ф5 без озона было выделено 3315 кДж энергии (кривая 3, рисунок 3.11), а в присутствии озона с концентрацией 38,4 мг/м^3 выделилось 3481 кДж энергии, или на 5 % больше (кривая 2, рисунок 3.12).

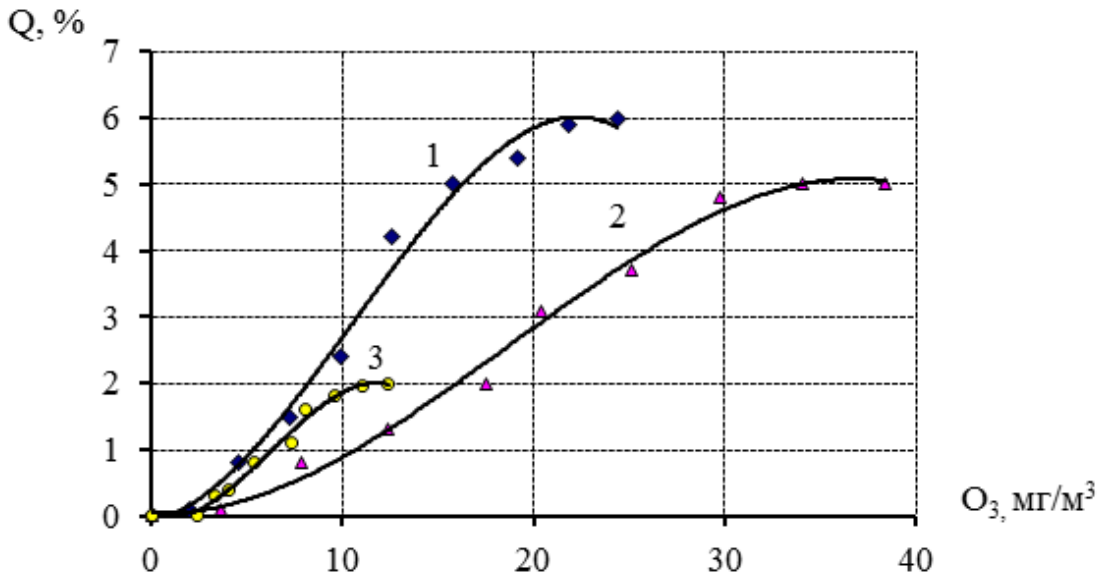
Температура уходящих газов при этом повысилась с 238 до 251,6 ^{0}С, или на 5,6 % (кривая 3, рисунок 3.13).

Вместе с тем, исследования показали, что при сжигании газа пропана влияние озона незначительное. Так, при оптимальной концентрации озона 12,4 мг/м^3 было выделено 3609 кДж энергии (кривая 1, рисунок 3.11). Это



1 – газ пропан; 2 – печное бытовое топливо; 3 – мазут Ф5.

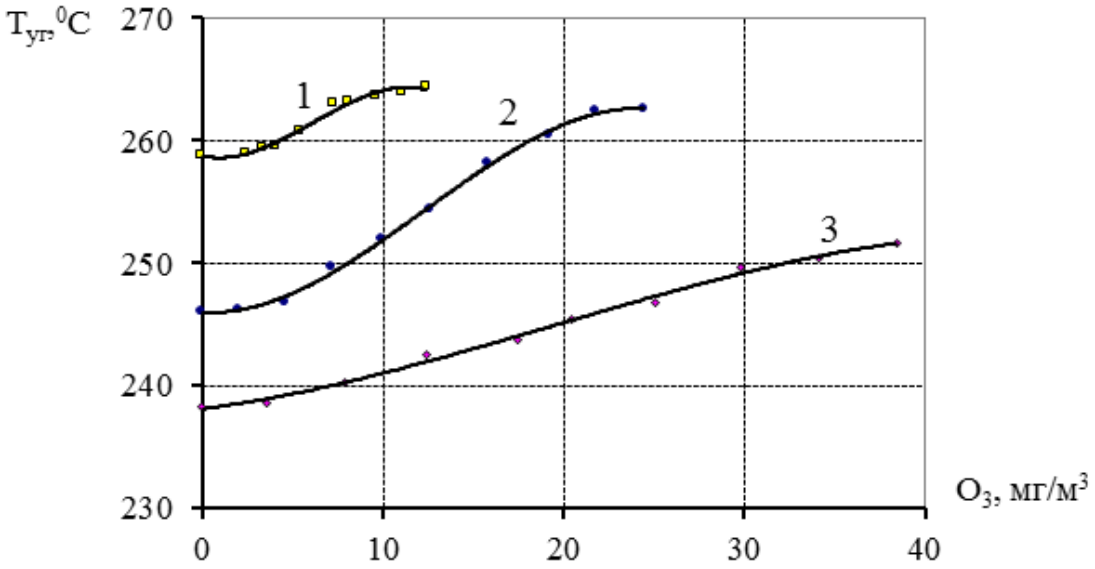
Рисунок 3.11 – Графики экспериментальных зависимостей дополнительно выделившейся теплоты при сгорании топлива от концентрации озона



1 – печное бытовое топливо; 2 – мазут Ф5; 3 – газ пропан.

Рисунок 3.12 – Графики экспериментальных зависимостей дополнительно выделившейся теплоты при сгорании топлива от концентрации озона в процентном отношении

всего лишь на 2 % больше, чем без озона (кривая 3, рисунок 3.12), а интенсификация горения составила всего 3,8 % (кривая 3, рисунок 3.10), т.е. с учетом ошибки опыта можно утверждать, что озонированный воздух практически не интенсифицирует процесс горения пропана. Это можно объяснить, прежде всего, тем, что газ более легко образует с воздухом качественную рабочую смесь, чем жидкие виды топлива, и обеспечивает наиболее полное его сгорание с минимальными потерями энергии от химического недожога.



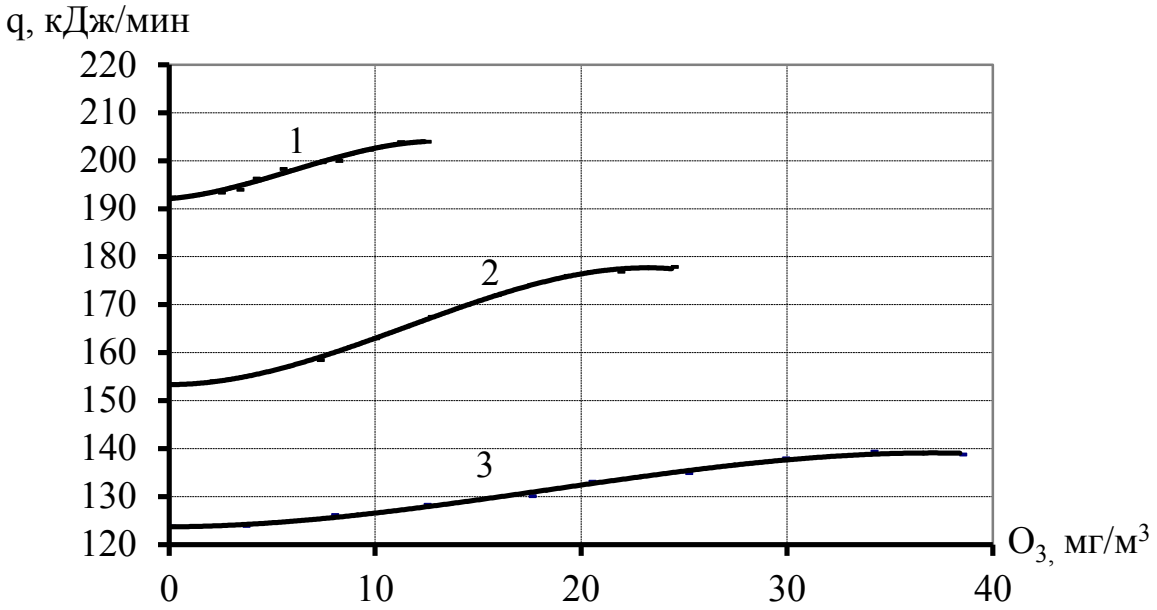
1 – газ пропан; 2 – печное бытовое топливо; 3 – мазут Ф5.

Рисунок 3.13 – Графики экспериментальных зависимостей температуры отходящих газов от концентрации озона

Следует отметить также, что во всех опытах с увеличением концентрации озона наблюдалось и увеличение тепловыделения (рисунок 3.14), т.е. увеличение количества теплоты, выделившейся в единицу времени.

Наиболее существенный рост тепловыделения наблюдался при сжигании печного бытового топлива (рисунок 3.14, кривая 2). Так, при оптимальной концентрации озона 24,4 мг/м^3 тепловыделение составило 177,8

кДж/мин, что на 16 % больше, чем при отсутствии озона, а средний прирост тепловыделения, приходящийся на каждые 5 мг/м^3 концентрации озона, со-



ставил 5,1 кДж/мин.

1 – газ пропан; 2 – печное бытовое топливо; 3 – мазут Ф5.

Рисунок 3.14 – Графики экспериментальных зависимостей дополнительного тепловыделения от изменения концентрации озона

При горении мазута Ф5 тепловыделение составило 138,7 кДж/мин при концентрации озона 38,4 мг/м^3 или на 12,1 % больше, чем при отсутствии озона (кривая 3), а средний рост тепловыделения, приходящийся на каждые 5 мг/м^3 концентрации озона, составил 1,92 кДж/мин, что в 2,66 раза меньше, чем при горении печного бытового топлива.

Рост тепловыделения при горении газа пропана составил 6 % (кривая 1) – это в 2,7 раза меньше, чем при горении соответственно мазута и печного бытового топлива.

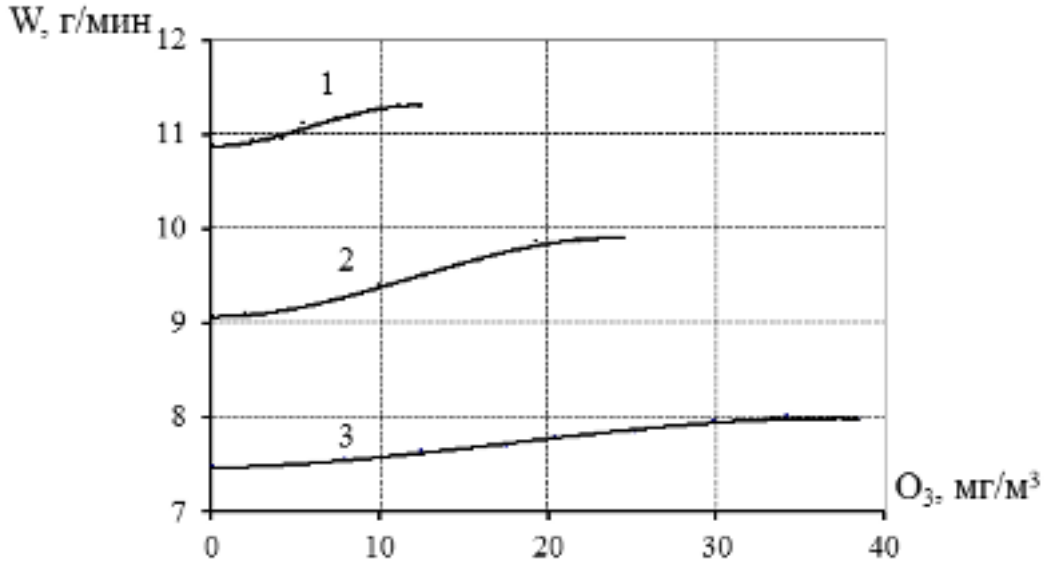
Рост тепловыделения, а также температуры отходящих газов, можно объяснить увеличением скорости горения топлива в зоне химической реакции. Так, выделившееся в зоне химической реакции количество теплоты по Н.Н. Семенову [104] определяется зависимостью (2.44), по которому количе-

ство теплоты, выделившееся в единицу времени, прямо пропорционально объему V, где протекает реакция, скорости реакции W_p и теплоте Q, выделяющейся при каждом элементарном акте реакции.

В данном случае объем, где протекает реакция горения топлива, является постоянным, тогда тепловыделение будет зависеть от изменения остальных двух факторов, т.е. от теплоты, выделяющейся при каждом элементарном акте реакции горения, и от скорости реакции.

Нашими исследованиями установлено, что с увеличением концентрации озона количество энергии, выделяющейся при сгорании исследуемых топлив, увеличивается (рисунок 3.11, 3.12), увеличивается и скорость горения (рисунок 3.15).

Так, скорость горения печного бытового топлива увеличивается от 9,05 до 9,90 г/мин, или на 9,4 % (кривая 2 рисунок 3.15), мазута флотского Ф5 от 7,46 до 7,97 г/мин, или на 6,8 % (кривая 3). Скорость горения газа пропана увеличилась всего лишь на 4 % (кривая 1).



1 – газ пропан; 2 – печное бытовое топливо; 3 – мазут Ф5.

Рисунок 3.15 – Графики экспериментальных зависимостей скорости горения топлива от изменения концентрации озона

Наиболее интенсивный рост (8,4 %) скорости горения печного бытового топлива наблюдается при изменении концентрации озона в пределах от 5

до 20 мг/м^3, при концентрациях более 20 мг/м^3 скорость горения увеличивается незначительно (0,6 %).

Для мазута Ф5 наиболее интенсивный рост скорости горения (6,4 %) наблюдается при изменении концентрации озона от 8 до 30 мг/м^3.

Средний рост скорости горения газа пропана, печного бытового топлива и мазута на каждые 5 мг/м^3 роста концентрации озона составил соответственно 17,9 %, 15 % и 6,5 %.

Влияние озонированного воздуха на увеличение скорости горения исследуемых топлив, можно объяснить, прежде всего, высокими окислительными свойствами самого озона, образующегося в плазме высоковольтного коронного разряда [100], а также ионизацией, диссоциацией и возбуждением молекул воздушной среды, обрабатываемой высоковольтным коронным разрядом, что способствует повышению константы скорости реакции горения топлива за счет снижения энергии активации молекул, а, следовательно, и повышению скорости самой реакции.

Таким образом, проводимые исследования по установлению влияния озонированного воздуха на интенсификацию горения топлива, полноту сгорания и тепловыделения позволили установить закономерности и количественные характеристики этого влияния, установить влияние озонированного воздуха на тепловыделение и повышение температуры отходящих газов, что указывает на полноту сгорания топлива.

Установлено, что горение жидких исследуемых топлив интенсифицируется на 6,3 и 8,6 %, в то же время интенсификация горения газа пропана незначительна и не превышает 3,8 %.

Установлено также увеличение тепловыделения на 12…16 % и повышение температуры отходящих газов на 5…7 %.

Дополнительное выделение энергии и повышение температуры отходящих газов при сжигании исследуемых топлив в озонированном воздухе подтверждает интенсификацию процесса. Как дополнительное выделение теплоты, так и повышение температуры связано с вступлением в процесс го-

рения дополнительного количества топлива за счет наиболее полного его сгорания. По нашему мнению, это обусловлено двумя факторами.

– Первый – это активацией молекул кислорода воздуха, которая возникает в результате высоковольтного коронного разряда в электроозонаторе.

– Второй – это образование озона и атомарного кислорода при возбуждении молекул кислорода воздуха электронным ударом в газовом разряде [100].

В активированной воздушной среде происходит увеличение внутренней энергии молекул кислорода, что приводит к снижению энергии активации и повышению их реакционной способности, а, следовательно, к увеличению скорости реакции горения. Озон легко отдает один атом кислорода и является очень сильным окислителем [68, 80, 81, 99, 114].

Как полагают некоторые исследователи [81, 101], действие озона, главным образом, заключается в облегчении образования начальных активных центров цепной реакции. Кроме того, возможны и прямые реакции озона с углеводородами. Так как озон интенсифицирует скорость зарождения активных центров реакции, то в самом процессе горения он также играет роль активатора.

Таким образом:

– озонированный воздух, используемый в качестве реагента при сжигании исследуемых углеводородных топлив, интенсифицирует процесс сгорания на 6,3–9,4 %, что выражается в увеличении тепловыделения и повышении температуры отходящих газов;

– озонированный воздух слабо интенсифицирует процесс сжигания газа пропана. Интенсификация его горения не превышает 3,8 %;

– озонированный воздух, используемый в качестве реагента снижает расход жидких исследуемых углеводородных топлив на 9,6–12,8 %;

– полученные результаты лабораторных исследований подтверждают целесообразность использования озонированного воздуха в качестве реагента

при сжигании жидких углеводородных топлив в ТГУ, используемых в сельскохозяйственном производстве.

Основные количественные характеристики процесса сгорания исследуемых топлив в озонированном воздухе представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 Основные количественные характеристики процесса сгорания исследуемых топлив в озонированном воздухе

№ п/п	Исследуемое топливо	Оптимальная концентрация озона, мг/м^3	Снижение расхода топлива, %	Увеличение скорости сгорания топлива, %	Интенсификация сгорания топлива, %	Увеличение тепловыделения, %	Повышение температуры уходящих газов, %
1	Дизельное	22	12,8	10,2	9,4	17,2*	7,2*
2	Печное бытовое	25	11,6	9,4	8,6	16,0	6,7
3	Мазут Ф5	36	9,6	6,8	6,3	12,1	5,6
4	Газ пропан	11,5	2,2	4,0	3,8	6,0	2,2

- * по данным ВНИПТИМЭСХ

3.3. Исследование влияния высоковольтного неоднородного электрического поля на сгорание исследуемых топлив

Исследования влияния озонирования воздуха и высоковольтного неоднородного электрического поля на интенсификацию и скорость горения газообразных сортов топлива проводили на лабораторной установке (рисунок 3.16), которая представляла собой специально доработанную лабораторную установку, представленную на рисунке 3.8.

В процессе проведения лабораторных исследований контролировали такие показатели, как температура воды в калориметре, концентрация озона в воздухе, подаваемом на горение, температура топлива перед распыливанием, температура уходящих газов, количество окиси углерода (CO) в уходящих

газах, расход топлива, напряжение и силу тока, подаваемых на электроды электроозонатора, скорость воздуха в воздуховоде.

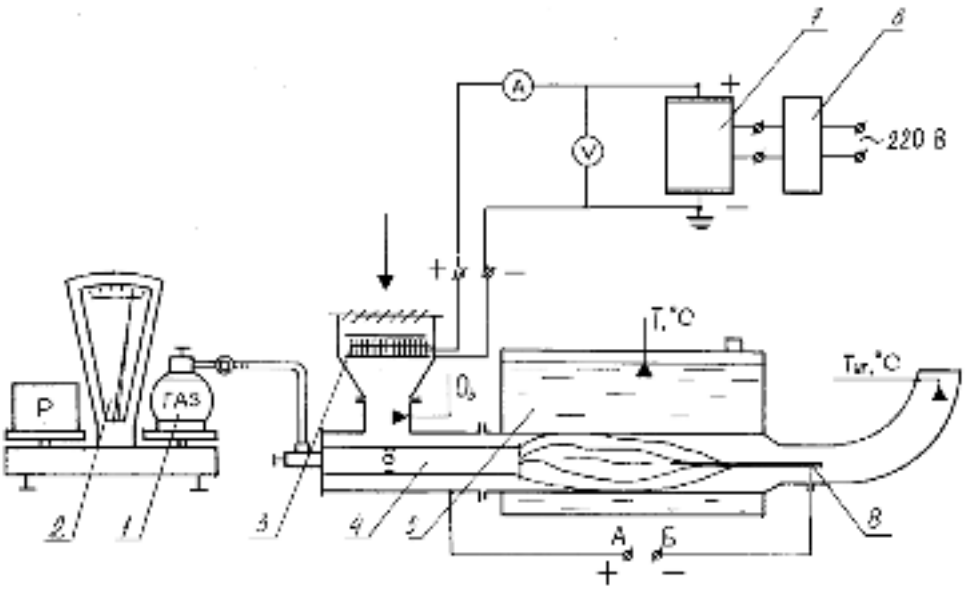
Для исследования влияния высоковольтного неоднородного электрического поля на интенсификацию и скорость горения жидких топлив использовали иглу (электрод) 15, которая заостренным концом вводилась в пламя. В процессе исследований высоковольтное напряжение накладывалось на пламя через топливную горелку и иглу (клеммы А′,Б′) (рисунок 3.8).

При проведении лабораторных исследований использовали проточные электроозонаторы, специально изготовленные для этих целей (рисунки 3.8; 3.16). Мощность электроозонаторов не превышала 20 Вт. Основные их технические характеристики представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 Основные технические характеристики электроозонаторов

№ п/п	Наименование характеристик	Един. измерен.	Значения	
			№ 1	№ 2
1	Частота сети	Гц	50	50
2	Напряжение сети	В	220	220
3	Наибольшее напряжение на электродах озонатора	кВ	20	20
4	Номинальная мощность	Вт	19,7	16,3
5	Наибольшая производительность по озону	г/ч	1,64	1,36
6	Расход воздуха	$м^3$/ч	20	20

а)



б)



а) принципиальная схема; б) общий вид

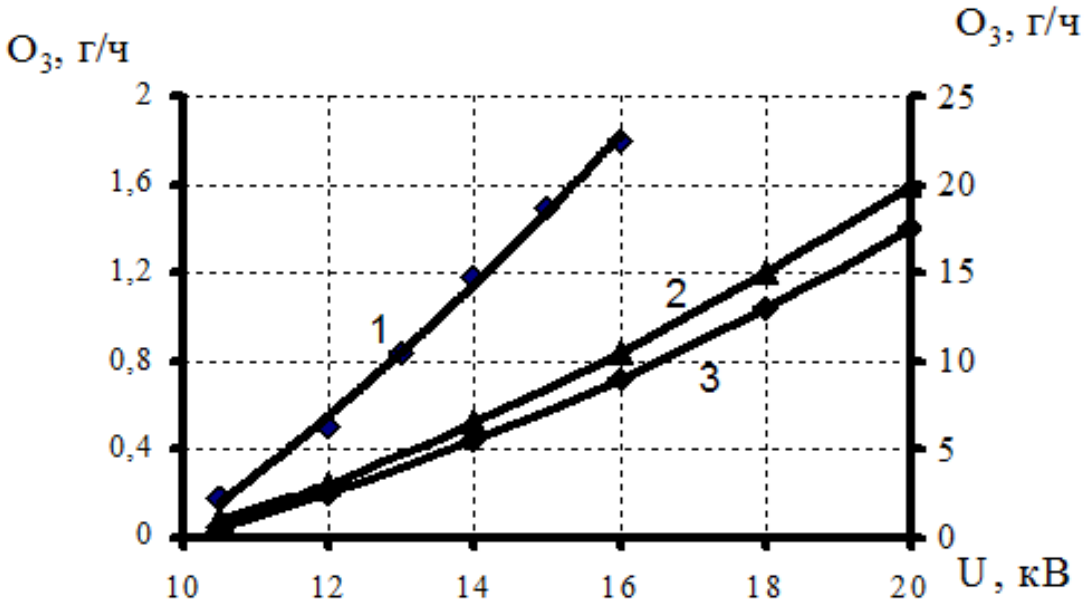
1 – баллон для природного газа; 2 – весы; 3 – электроозонатор; 4 – газовая горелка; 5 – калориметр; 6 – автотрансформатор; 7 – высоковольтный блок питания; 8 – игла.

Рисунок 3.16 – Лабораторная установка для исследования влияния озонирования воздуха и высоковольтного неоднородного электрического поля на интенсификацию и скорость горения природного газа

Для удобства и оперативности проведения исследований нами были установлены графические зависимости производительности используемых электроозонаторов от изменения напряжения, подаваемого на коронирующие элек троды (рисунок 3.17).

Результатами исследований влияния высоковольтного электрического поля на интенсификацию процесса горения исследуемых топлив, полноту сгорания и тепловыделения установлено, что наложение на пламя высоковольтного неоднородного электрического поля приводит к интенсификации процессов горения исследуемых топлив, увеличивает полноту их сгорания и тепловыделение.

Исследования показали, что при увеличении напряжения между электродами до 10 кВ, процессы горения исследуемых топлив интенсифицируются на 5–14 % (рисунок 3.18) [92, 118].

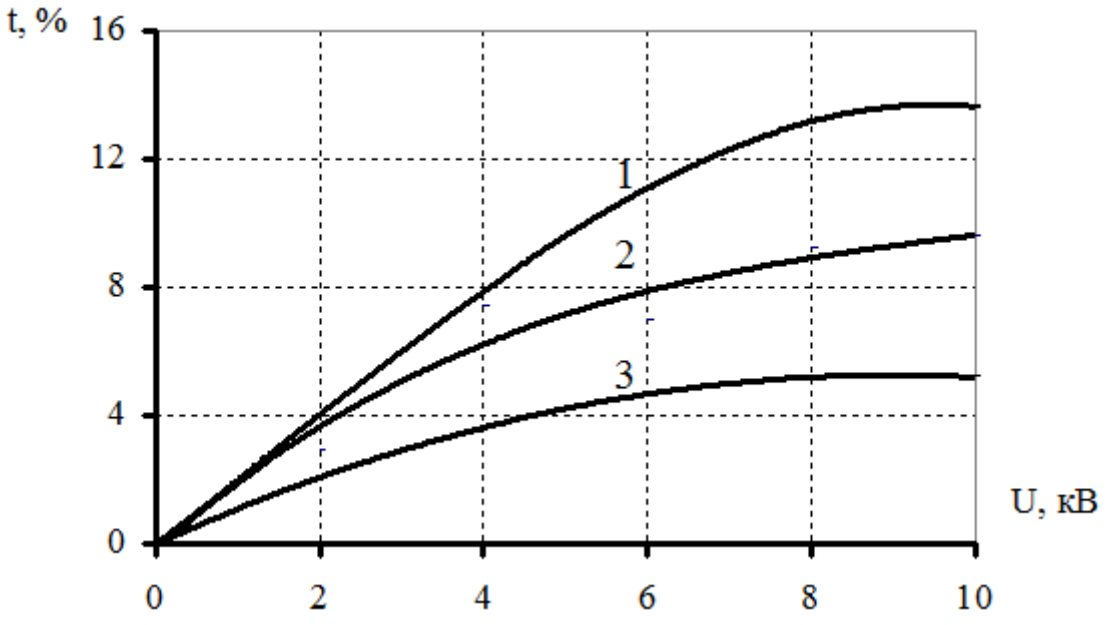


1 – топочный озонатор для котла–парообразователя КВ-300Л;

2 – озонатор, установленный в ресивере лабораторной установки;

3 – озонатор, установленный в воздуховоде лабораторной установки.

Рисунок 3.5 – График зависимости производительности используемых озонаторов от напряжения на коронирующих электродах



1 – печное бытовое топливо; 2 – мазут Ф5; 3 – газ пропан.

Рисунок 3.18 – Графики экспериментальных зависимостей интенсификации горения топлив от изменения напряжения на электродах

Наибольший эффект достигается при напряжении 8–10 кВ. Так, при горении печного бытового топлива и мазута Ф5 интенсификация составила 13,6% (кривая 1 рисунок 3.18) и 9,6 % (кривая 2). Интенсификация горения газа пропана незначительна и не превышает 5,2 % (кривая 3), это всего лишь на 1,4…1,7 % выше, чем при использовании озонированного воздуха. Незначительную интенсификацию горения газа пропана можно, по всей вероятности, объяснить тем, что применение как озонированного воздуха, так и высоковольтного электрического поля практически не уменьшает полного времени сгорания топлива $\tau_г$, скорость сгорания газа $W_г$ существенно не изменяется, что следует из зависимости:

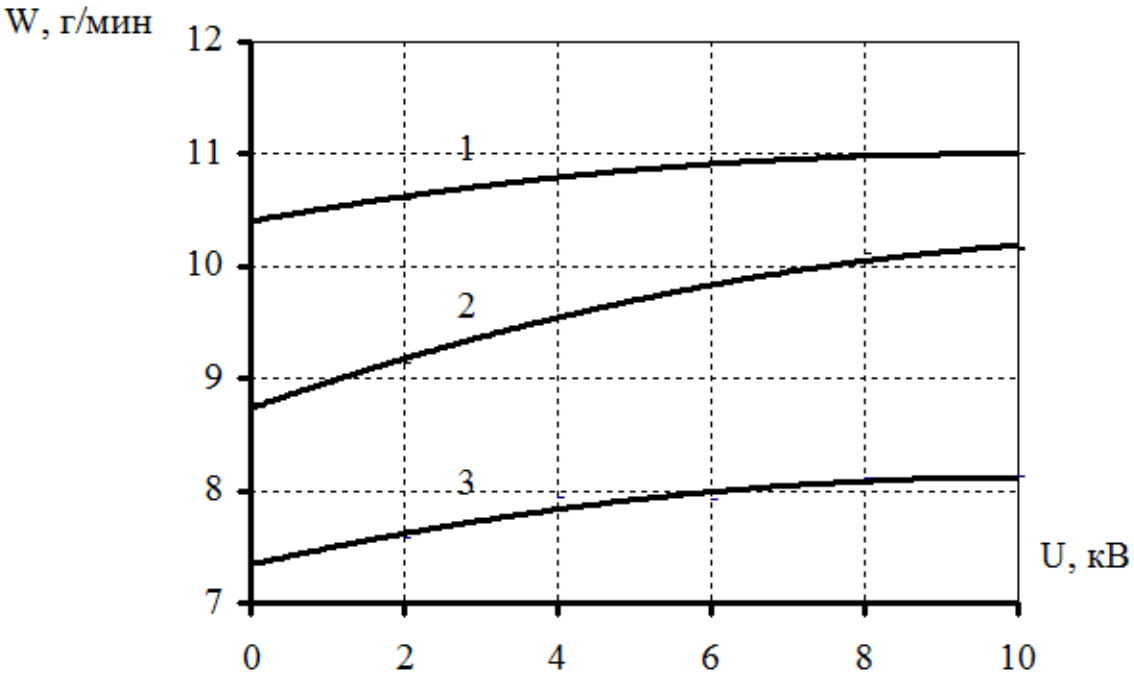
$$W_г = \frac{P}{\tau_г} = \frac{P}{\tau_ф + \tau_x}, \qquad (3.3)$$

где P – количество сжигаемого топлива, г

Такие заключения достоверно подтверждают и результаты исследования влияния озонированного воздуха и высоковольтного электрического поля на скорость горения пропана (рисунок 3.15 – кривая 1 и рисунок 3.19 – кривая 1).

Исследования показали, что увеличение напряжения, накладываемого на пламя, до 10 кВ, приводит к увеличению скорости горения газа пропана всего лишь на 5,5 %, в то время, как скорость горения печного бытового топлива и мазута Ф5 увеличились соответственно на 15,7 % и на 10,6 % (кривые 2 и 3 рисунка 3.19) [92].

Наиболее интенсивный рост скорости горения наблюдается при повышении напряжения от 0 до 6 кВ. На каждый киловольт роста напряжения приходится в среднем 2,05 % роста скорости горения печного бытового топлива и 1,27 % – мазута Ф5.



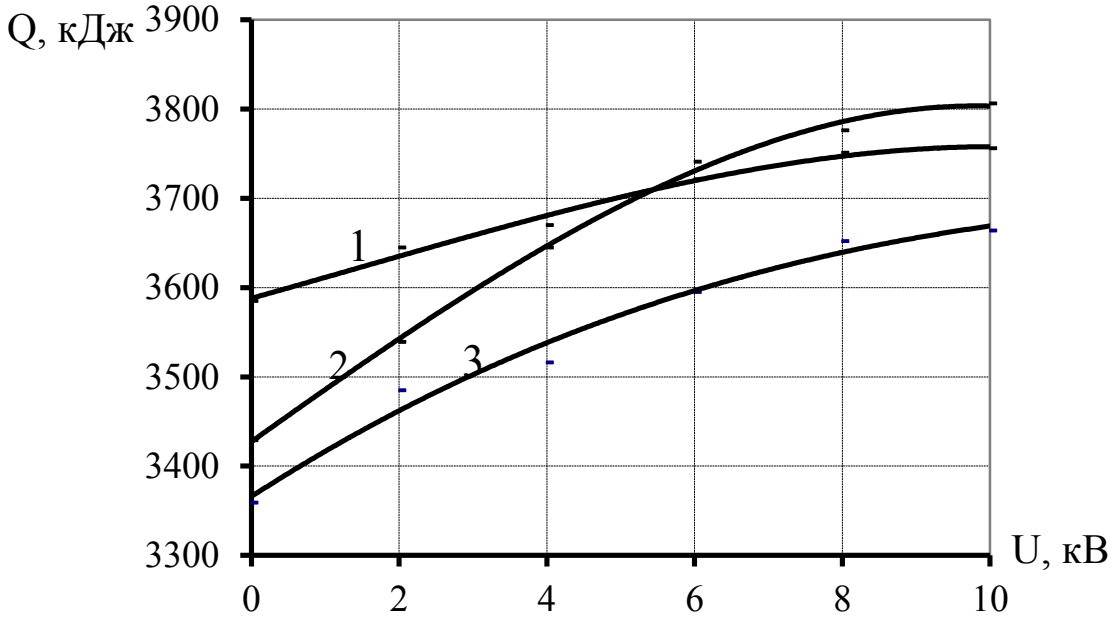
1 – газ пропан; 2 – печное бытовое топливо; 3 – мазут Ф5.

Рисунок 3.19 – Графики экспериментальных зависимостей скорости горения топлива от изменения напряжения на электродах

Влияние высоковольтного неоднородного электрического поля на увеличение скорости горения топлива можно объяснить тем, что движение заряженных частиц (электронов, ионов) в пламени ускоряется наложением на него электрического поля, что приводит к повышению их кинетической энергии и, как следствие, к ионизации и диссоциации нейтральных молекул (зависимости 2.45, 2.46, 2.48). В результате этого появляются частицы с пониженной энергией активации, которые легко вступают в химическое взаимодействие и таким образом увеличивают скорость горения топлива [82].

Лабораторными исследованиями также установлено, что наряду с интенсификацией горения топлива с повышением напряжения на электродах увеличивается и количество дополнительно выделяющейся теплоты, а также повышение температуры отходящих газов [92].

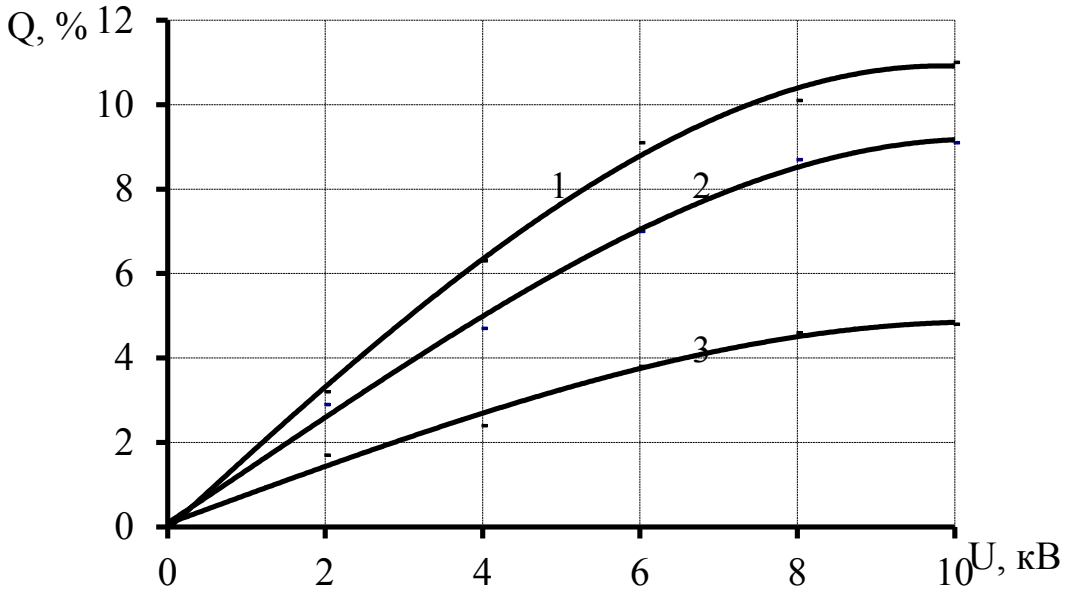
Так, при сжигании печного бытового топлива в количестве 200 г при напряжении равном нулю было выделено 3429 кДж теплоты (рисунок 3.20 –



кривая 2), а при напряжении 10 кВ было выделено уже 3806 кДж, или на 11 % больше (рисунок 3.21 – кривая 1), кроме того повысилась и температура уходящих газов с 241,8 ^{0}C до 281,1 ^{0}C или на 16,3 % (кривая 1 рисунка 3.22).

1 – газ пропан; 2 – печное бытовое топливо; 3 – мазут Ф5.

Рисунок 3.20 – Графики экспериментальных зависимостей дополнительно выделяющейся энергии при сгорании топлива от изменения напряжения на электродах



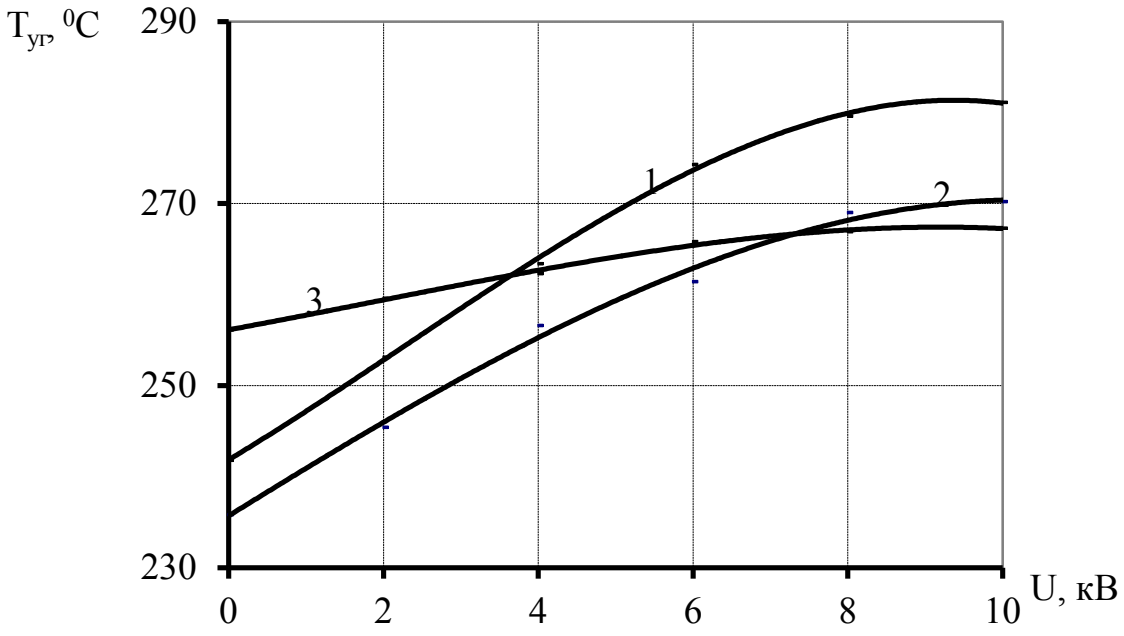
1 – печное бытовое топливо; 2 – мазут Ф5; 3 – газ пропан.

Рисунок 3.21 – Графики экспериментальных зависимостей дополнительно выделяющейся теплоты при сгорании топлива от изменения напряжения

При сжигании мазута Ф5 без напряжения было выделено 3359 кДж теплоты (кривая 3, рисунок 3.20), а при напряжении 10 кВ 3664 кДж, или на 9,1 % больше (кривая 2, рисунок 3.21), температура уходящих газов повысилась с 235,8 ^{0}С (508,8 ^{0}К) до 270,2 ^{0}С (543,2 ^{0}К), или на 14,6 % (кривая 2, рисунок 3.22).

Кроме того, исследования показали, что влияние высоковольтного электрического поля на дополнительное выделение тепла при сжигании газа пропана незначительное и не превышает 4,8 % (кривая 3, рисунок 3.21). Температура отходящих газов повысилась всего на 4,5 % и составила 267,3 ^{0}С (540,3 ^{0}К) (кривая 3, рисунок 3.22).

Во всех опытах с увеличением напряжения на электродах, как и с применением озонированного воздуха, наблюдалось увеличение тепловыделения (рисунок 3.23), т.е. увеличение количества энергии, выделившейся в единицу времени.

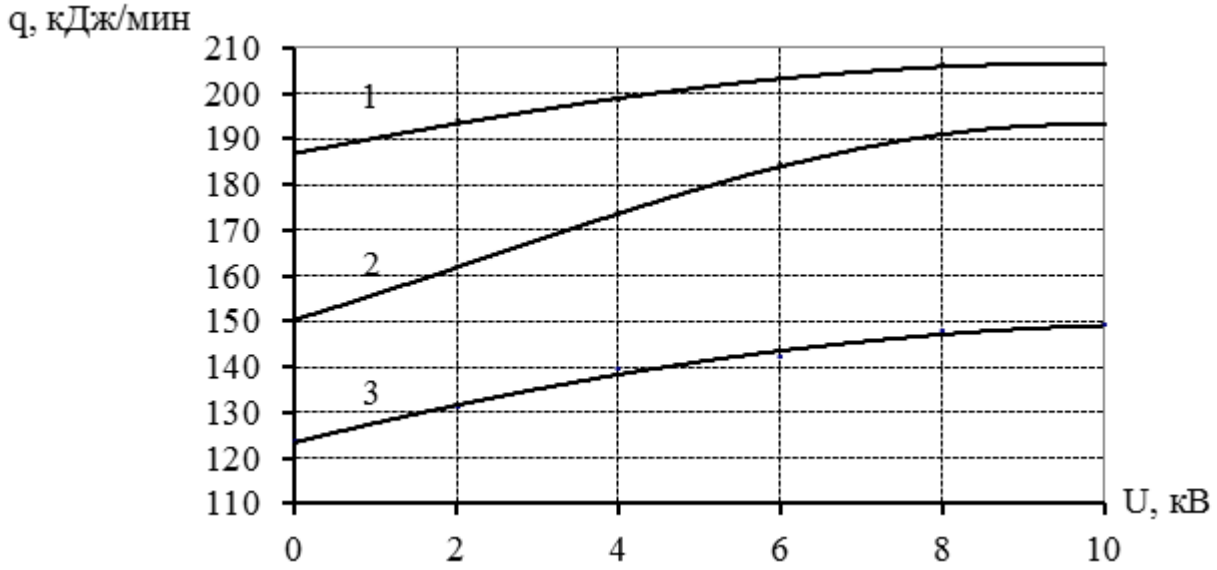


1 – печное бытовое топливо; 2 – мазут Ф5; 3 – газ пропан.

Рисунок 3.22 – Графики экспериментальных зависимостей температуры уходящих газов от изменения напряжения на электродах

Особенно существенный рост тепловыделения с повышением напряжения на электродах наблюдался при горении печного бытового топлива и мазута. Так, при изменении напряжения от 0 до 10 кВ тепловыделение при сгорании печного бытового топлива увеличилось с 150,4 до 193,2 кДж/мин (рисунок 3.23, кривая 2), или на 28,5 % (рисунок 3.24, кривая 1), это на 12,5 % больше, чем при использовании озонированного воздуха (рисунок 3.14).

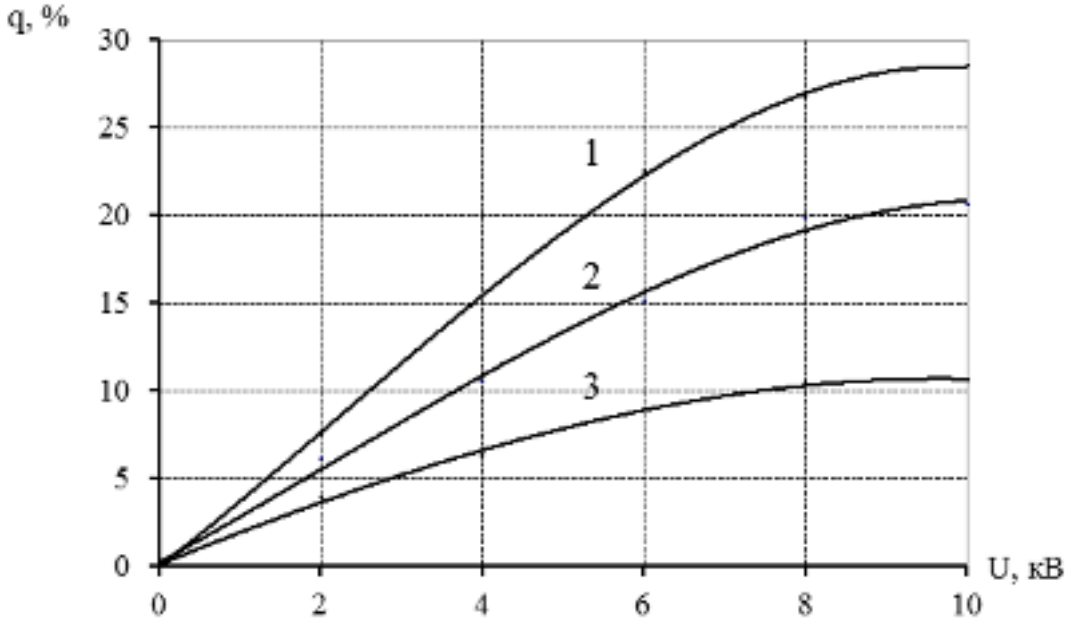
Средний рост тепловыделения, приходящегося на каждый киловольт роста напряжения, составил 4,28 кДж/мин в интервале напряжения от 0 до 6 кВ 5,77 кДж/мин, а в интервале от 6 до 10 кВ – всего лишь 2,05 кДж/мин, что в 2,8 раза меньше, чем в первом интервале, т.е. наиболее интенсивный рост тепловыделения наблюдается при росте напряжения на электродах примерно до 6 кВ.



1 – газ пропан; 2 – печное бытовое топливо; 3 – мазут Ф5.

Рисунок 3.23 – Графики экспериментальных зависимостей тепловыделения при сгорании топлива от изменения напряжения на электродах

Тепловыделение при сгорании мазута увеличивается с 123,5 до 148,9 кДж/мин (рисунок 3.23, кривая 3), или на 20,6 % (рисунок 3.24, кривая 2): это на 8,5 % больше, чем при использовании озонированного воздуха (рисунок 3.14).



1 – печное бытовое топливо; 2 – мазут Ф5; 3 – газ пропан.

Рисунок 3.24 – Графики экспериментальных зависимостей изменения тепловыделения при сгорании топлива от изменения напряжения на электродах

Средний прирост тепловыделений, приходящихся на каждый киловольт роста напряжения, составил 2,54 кДж/мин. Это в 1,69 раза меньше, чем при сгорании печного бытового топлива при тех же условиях. При изменении напряжения до 6 кВ средний рост тепловыделения составил 3,58 кДж/мин, а при изменении его от 6 до 10 кВ – 2,125 кДж/мин, что в 1,7 раза меньше, чем в первом диапазоне.

Тепловыделения при сгорании газа пропана при напряжении 10 кВ составили 206,4 кДж/мин (рисунок 3.23, кривая 1), что на 10,6 % больше, чем при отсутствии напряжения (рисунок 3.24, кривая 3).

Таким образом, проведенные исследования показывают, что наиболее сильное влияние на повышение интенсификации горения топлива, полноту его сгорания и тепловыделения оказывает высоковольтное электрическое поле, накладываемое на пламя. Оно интенсифицирует процесс горения жидких

исследуемых топлив на 11–16 %, увеличивает тепловыделение от 20 до 28,5 %, что сопровождается повышением температуры отходящих газов на 15–16 %.

Повышение эффективности горения топлива наложением высоковольтного неоднородного электрического поля на пламя можно объяснить тем, что под действием поля электроны, генерированные самим пламенем, приобретают достаточную энергию поступательного движения (выражение 2.37) и в процессе неупругих соударений типа ″электрон - нейтральная частица″ создаются новые активные центры в виде свободных атомов, радикалов, ионов или возбужденных частиц, т.е. появляются частицы с пониженной энергией активации, которые легко вступают в химическое взаимодействие, и, таким образом, увеличивают скорость горения [82, 102]. Этот процесс наиболее эффективно идет, как установлено поисковыми исследованиями, при таком наложении электрического поля на пламя, когда горелка приобретает заряд со знаком (+), т.е. когда поток электронов разгоняется в направлении к положительно заряженной горелке навстречу потоку горючей смеси, что увеличивает вероятность неупругих столкновений, а, следовательно, и скорость химической реакции. Это подтверждается и другими исследователями [82, 88-91, 101].

По нашим данным, высоковольтное неоднородное электрическое поле, накладываемое на пламя, влияет на кинетику процесса горения, что в свою очередь, вызывает рост скорости горения горючей смеси, рост выделения теплоты и температуры в зоне реакции, что подтверждает достоверность наших теоретических предпосылок (зависимость 2.43).

По Семенову Н.Н. [104], количество тепла, выделяющегося в единицу времени, пропорционально объему V, где протекает реакция, скорости реакции W и теплоте $Q^{/}$ (выражение 2.44). Если применить к зоне химической реакции формулу Семенова Н.Н., то можно записать:

$$T = \frac{Q^{/} W}{C_p \rho} \quad ,$$

(3.4)

где C_p – удельная теплоемкость смеси;

ρ – плотность смеси.

Таким образом, при наложении электрического поля на пламя следует ожидать в зоне химической реакции некоторое повышение температуры, что подтверждается результатами данных экспериментов.

Однако, в наших экспериментах повышение температуры отходящих газов, а следовательно, и пламени, объясняется вступлением в процесс горения дополнительного количества топлива. С учетом [104] можно предполагать, что это происходит, в первую очередь, в связи с электризацией сжигаемых топлив при их распыливании, а именно за счет создания более высокой дисперсности среды, интенсификации процессов испарения и окисления, т.е. благодаря ускорению процессов смесеобразования, что и обеспечивает наиболее полное сгорание топлива, которое сопровождается увеличением тепловыделения и повышением температуры отходящих газов. Электрическое поле, накладываемое на топливовоздушную смесь (на пламя), уменьшает поверхностное натяжение и вязкость топлива [104], что и способствует облегчению процесса разрушения струи и дробления капель топлива воздушным потоком, а, следовательно, и образованию качественной топливовоздушной смеси.

Чем выше дисперсность жидкого топлива, тем большая его часть переходит в паровую фазу и тем выше температура в зоне горения.

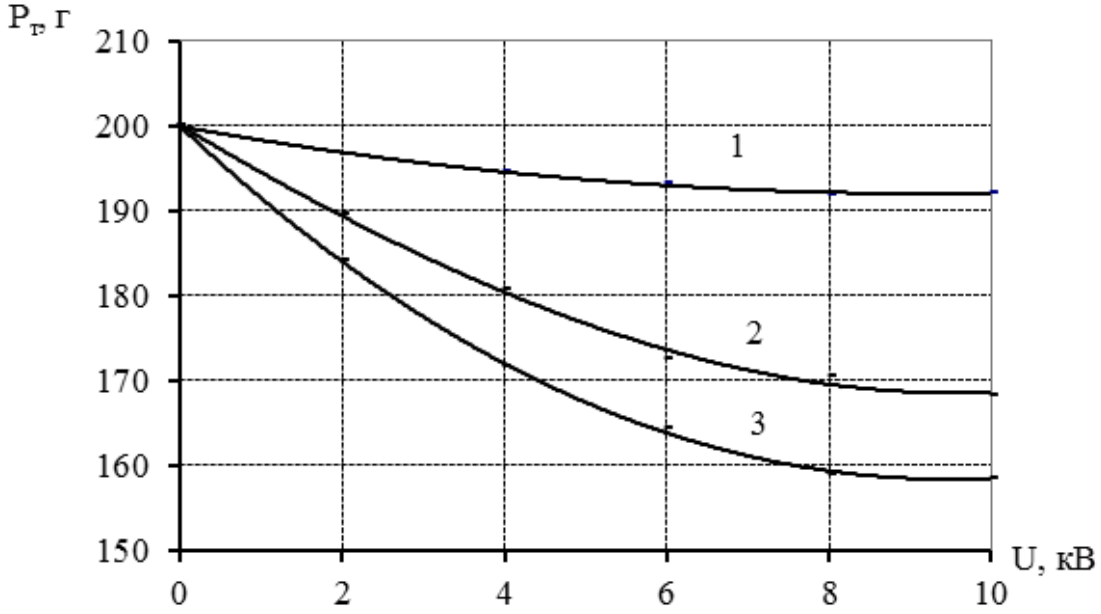
Данные эксперименты носят прикладной характер, поэтому перед нами не стояла задача установления механизма (природы) влияния вышеуказанных факторов на процесс интенсификации сжигания топлив.

Для того, чтобы иметь наиболее полную картину влияния высоковольтного неоднородного электрического поля на процесс сжигания исследуемых

топлив, мы провели исследования расхода топлив в зависимости от изменения напряжения. Результаты проведенных опытов представлены графическими зависимостями (рисунок 3.25), показывающими, что с увеличением напряжения на электродах, наложении электрического поля на пламя, расход исследуемых топлив снижается. Так, при изменении напряжения от 0 до 10 кВ расход печного бытового топлива снизился с 200 до 158,6 г (кривая 3), или на 20,7 %; расход мазута Ф5 снизился с 200 до 168,4 г (кривая 2), или на 15,8 %; а расход газа пропана снизился на 3,9 % (кривая 1).

Наиболее интенсивное снижение расхода жидких топлив достигается при изменении напряжения от 0 до 6 кВ. На каждый киловольт роста напряжения снижение расхода печного бытового топлива составило в среднем 6 г, или 3 %; мазута Ф5 – 4,3 г, или 2,2 %. И совсем незначительное (менее 1 %) снижение расхода топлив достигается при изменении напряжения от 6 до 10 кВ.

Основные количественные характеристики влияния высоковольтного неоднородного электрического поля на сгорание исследуемых топлив представлены в таблице 3.5.



1 – газ пропан; 2 – мазут Ф5; 3 – печное бытовое топливо.

Рисунок 3.25 – Графики экспериментальных зависимостей расхода топлива от изменения напряжения на электродах

Таким образом:

– в результате наложения на пламя высоковольтного неоднородного электрического поля процесс сжигания жидких углеводородных исследуемых топлив значительно интенсифицируется (9,6…13,6 %), что выражается в повышении температуры отходящих газов, повышении полноты их сгорания и тепловыделения;

Таблица 3.5 Основные количественные характеристики влияния высоковольтного неоднородного электрического поля на показатели сгорания исследуемых топлив

№ п/п	Исследуемое топливо	Показатели сгорания топлива				
		Снижение расхода топлива, %	Увеличение скорости сгорания, %	Интенсификация сгорания, %	Увеличение тепловыделения, %	Повышение температуры уходящих газов, %
1	Печное бытовое топливо	20,7	15,7	13,6	28,5	16,3
2	Мазут Ф5	15,8	10,6	9,6	20,6	14,6
3	Газ пропан	3,9	5,5	5,2	10,6	4,4

– процесс сжигания газа пропана интенсифицируется незначительно (5,2%), что практически находится в пределах ошибки опыта. Это дает основание полагать, что использование данного метода к нему на практике малоэффективно;

– наложение на пламя высоковольтного неоднородного электрического поля с напряжением между электродами в 10 кВ снижает расход жидких, исследуемых углеводородных топлив, на 16–21 %;

– полученные нами результаты открывают перспективы применения электрических полей при совершенствовании и интенсификации процессов влаготермической обработки кормов.

3.4. Многофакторная модель скорости горения жидкого топлива в топочном устройстве

Горение является сложным многофакторным процессом, характеризующимся такими особенностями, как многообразие управляемых, неуправляемых и неконтролируемых факторов, оказывающих существенное влияние на ход процесса, а также наличие сложных корреляционных связей между факторами. В этой связи, применение метода математического планирования эксперимента является предпочтительным.

В наших исследованиях в качестве параметра оптимизации принята скорость сгорания топлива, т.к. она является основой интенсификации процесса сгорания.

Процесс горения топлива в работе рассматривается в двух вариантах.

В первом учтен процесс взаимодействия озонированного воздуха, подаваемого на горение, с топливом, протекающем при высокой температуре (температуре горения).

Во втором – взаимодействие чистого воздуха с топливом при высокой температуре в высоковольтном неоднородном электрическом поле.

Наряду с известными факторами (концентрация реагирующих веществ и температура), влияющими на скорость протекания химической реакции горения топлива, определенное действие будут оказывать и факторы, характеризующие состояние озонированного воздуха и топлива. Такими факторами являются температура и влажность воздуха, концентрация озона в воздухе, подаваемом на горение, коэффициент избытка воздуха, температура и вязкость жидкого топлива. При наложении электрического поля на пламя ос-

новным фактором является напряжение между электродом и топливной горелкой.

Для проведения экспериментальных исследований из всех вышеуказанных факторов были отобраны только те, которые независимы и значимы. Такими факторами оказались концентрация озона в воздухе, подаваемом на горение, температура топлива перед распылителем, коэффициент избытка воздуха и напряжение между электродом и топливной горелкой.

Вязкость топлива нами не учитывалась, т.к. она функционально зависит от его температуры.

Что касается температуры и влажности воздуха, подаваемого на горение, то они тоже не учитывались ввиду того, что котлы-парообразователи (ТГУ), как правило, располагаются в закрытых помещениях, где эти показатели изменяются незначительно и существенно влиять на скорость сгорания топлива не могут.

Уровни варьирования выбранных факторов, кроме концентрации озона и напряжения на электродах, устанавливали на основе анализа априорной информации [134].

Верхние уровни варьирования концентрации озона и напряжения на электродах устанавливали на основе результатов предварительно проведенных экспериментов [134].

Таким образом, в первом варианте исследований основными факторами являются: концентрация озона, температура топлива перед распылителем, коэффициент избытка воздуха.

Во втором варианте исследований основными факторами являются: температура топлива перед распылителем, коэффициент избытка воздуха и напряжение между электродами.

Согласно [112] оптимальная температура исследуемых видов топлива перед распылителем должна быть в пределах: печное бытовое 20…40^{0}С; дизельное 30…50^{0}С; флотские мазуты Ф5, Ф12 соответственно 80…100^{0}С и

90…110^{0}С. Для газа его температура перед камерой сгорания особого значения не имеет [111, 120].

Рекомендуемые оптимальные коэффициенты избытка воздуха согласно [111, 112, 119, 120] должны быть в пределах: печное бытовое, дизельное – 1,1…1,2; мазуты флотские Ф5, Ф12 –1,15…1,25 и газ –1,01…1,1.

Для оценки влияния вышеуказанных факторов и математического описания скорости сгорания исследуемых топлив использовали модель полинома первого порядка [107, 108]

$$\hat{y} = в_0 + в_1 x_1 + в_2 x_2 + в_3 x_3 + в_{12} x_1 x_2 + в_{13} x_1 x_3 + в_{23} x_2 x_3 + в_{123} x_1 x_2 x_3, \quad (3.5)$$

Для получения оценок коэффициентов уравнения (3.5) использовали полный факторный эксперимент типа 2^3. Матрица планирования эксперимента с расчетными столбцами взаимодействия факторов представлена в таблице 3.6. Порядок проведения опытов рандомизирован с помощью таблицы случайных чисел [121].

Как установлено (разделы 3.2 и 3.3) действие озонированного воздуха, подаваемого на горение, и наложение высоковольтного неоднородного электрического поля на пламя не оказывают существенного влияния на повышение интенсификации процесса горения газа пропана, следовательно дальнейшие эксперименты были проведены только с использованием печного бытового топлива и мазута Ф5.

Таблица 3.6 Матрица планирования полного факторного эксперимента типа 2^3 с расчетными столбцами взаимодействия факторов

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	Обозначен. матрицы
1	+	+	+	+	+	+	+	+	(1)
2	+	-	+	+	-	-	+	-	a
3	+	+	-	+	-	+	-	-	$в$

4	+	-	-	+	+	-	-	+	*ав*
5	+	+	+	-	+	-	-	-	*с*
6	+	-	+	-	-	+	-	+	*ас*
7	+	+	-	-	-	-	+	+	*вс*
8	+	-	-	-	+	+	+	-	*авс*

Уровни и интервалы варьирования выбранных факторов приведены в таблицах 3.7 и 3.8.

Реализация матриц планирования с расчетными столбцами взаимодействия факторов и результатами эксперимента (таблицы 3.9-3.12) позволила определить значения параметров оптимизации для каждого опыта.

Статистическая оценка результатов проведенных экспериментов заключалась в определении значимости коэффициентов регрессии, проверке воспроизводимости и адекватности моделей линейным (таблица 3.13). Данные этой таблицы показывают, что полученные модели адекватны линейным, а их дисперсии однородны.

Результаты оценок значимости коэффициентов регрессии показали, что коэффициенты парных взаимодействий $в_{12}, в_{13}, в_{23}$ незначимы.

В результате реализации вышеприведенных матриц планирования и статистической обработки опытных данных получены уравнения регрессии в кодированном виде (3.6), (3.7), (3,8) и (3,9), устанавливающие связь между параметрами оптимизации y_1, y_2, y_3, y_4 и действующими на них управляемыми факторами x_1, x_2, x_3:

$$y_1 = 7{,}74 + 0{,}35x_1 + 0{,}24x_2 + 1{,}31x_3, \quad (3.6)$$

$$y_2 = 6{,}54 + 0{,}27x_1 + 0{,}19x_2 + 0{,}98x_3, \quad (3.7)$$

$$y_3 = 8{,}35 + 0{,}53x_1 + 0{,}31x_2 + 1{,}12x_3, \quad (3.8)$$

$$y_4 = 6{,}7 + 0{,}38x_1 + 0{,}21x_2 + 0{,}86x_3, \quad (3.9)$$

Анализ уравнений (3.5), (3.6), характеризующих скорость сгорания топлива при использовании озонированного воздуха, подаваемого на горение, позволяет сделать следующие выводы:

– с увеличением коэффициента избытка воздуха α и увеличением концентрации озона O_3 в воздухе, подаваемом на горение, скорость сгорания топлива W возрастает, так как коэффициенты $в_1, в_2, в_3$ при x_1, x_2, x_3 положительны, причем наибольшее влияние на нее оказывает коэффициент избытка воздуха при выбранных уровнях варьирования ($в_3 > в_1$ и $> в_2$);

Таблица 3.7 Уровни и интервалы варьирования факторов по исследованию влияния озонированного воздуха на скорость сгорания топлива

№ п/п	Факторы	Обозначение	Марка топлива	Уровни факторов			Интервал варьирования
				Верхний (+1)	Нижний (-1)	Основной (0)	
1	Концентрация озона	O_3, мг/м^3	ПБТ	25	0	12,5	12,5
		X_1	Ф5	36	0	18	18
2	Температура топлива перед распылителем	$T_т$, ^{0}C	ПБТ	30	10	20	10
		X_2	Ф5	90	50	70	20
3	Коэффициент избытка воздуха	α	ПБТ	1,15	0,8	0,975	0,175
		X_3	Ф5	1,2	0,8	1,0	0,2

Таблица 3.8 Уровни и интервалы варьирования факторов по исследованию влияния высоковольтного неоднородного электрического поля на скорость сгорания топлива

№ п/п	Факторы	Обозначения	Марка топлива	Уровни варьирования			Интервал варьирования
				Верхний (+1)	Нижний (-1)	Основной (0)	
1	Напряжение на электродах	U, кВ	ПБТ	10	0	5	5
		X_1	Ф5	10	0	5	5
2	Температура топлива перед распылителем	$T_т$, ^{0}C	ПБТ	30	10	20	10
		X_2	Ф5	90	50	70	20
3	Коэффициент избытка воздуха	α	ПБТ	1,15	0,8	0,975	0,175
		X_3	Ф5	1,2	0,8	1,0	0,2

Таблица 3.9 Расчетная матрица и результаты эксперимента по исследованию влияния озонированного воздуха на скорость сгорания печного бытового топлива

№ опыта	Случайный порядок опытов	Матрица планирования эксперимента								Результаты эксперимента				Проверка адекватности	
		X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Y_1	Y_2	$\bar{Y}_i$	Дисперсия ошибки опыта $S^2_{\{\}}$	$\hat{Y}_i$	$(\bar{Y}_i - \hat{Y}_i)^2$
1	2	+	+	+	+	+	+	+	+	9,68	10,08	9,88	0,080	9,66	0,0484
2	6	+	-	+	+	-	-	+	-	9,18	8,82	9,0	0,065	8,91	0,0081
3	1	+	+	-	+	-	+	-	-	8,88	9,24	9,06	0,065	9,12	0,0036
4	7	+	-	-	+	+	-	-	+	8,01	8,47	8,24	0,106	8,49	0,0625
5	3	+	+	+	-	+	-	-	-	6,99	6,65	6,82	0,058	7,04	0,0484
6	8	+	-	+	-	-	+	-	+	6,14	6,26	6,20	0,007	6,29	0,0081
7	4	+	+	-	-	-	-	+	+	6,74	6,38	6,56	0,065	6,50	0,0036
8	5	+	-	-	-	+	+	+	-	5,96	6,28	6,12	0,051	5,87	0,0625
$\sum X_{ig}\bar{Y}_i$		61,88	2,76	1,92	10,48	0,24	0,64	1,24	-0,12			61,88	0,497	0,2452	
$в_i$		7,735	0,345	0,240	1,31	0,03	0,08	0,141	-0,015	$S^2_{\{\}}$=0,062				$S^2_{ад}$=0,123	

Таблица 3.10 Расчетная матрица и результаты эксперимента по исследованию влияния озонированного воздуха на скорость сгорания мазута флотского Ф5

№ опыта	Случайный порядок опытов	Матрица планирования эксперимента								Результаты эксперимента				Проверка адекватности	
		X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Y_1	Y_2	$\overline{Y}_i$	Дисперсия ошибки опыта $S^2_{\{illegible\}}$	$\widehat{Y}_i$	$(\{illegible\}_i - \widehat{Y}_i)^2$
1	2	+	+	+	+	+	+	+	+	7,86	8,34	8,10	0,115	7,98	0,0144
2	6	+	-	+	+	-	-	+	-	7,32	7,74	7,53	0,088	7,45	0,0064
3	1	+	+	-	+	-	+	-	-	7,80	7,48	7,64	0,051	7,60	0,0016
4	7	+	-	-	+	+	-	-	+	6,66	6,98	6,82	0,051	7,06	0,0576
5	3	+	+	+	-	+	-	-	-	5,68	5,98	5,83	0,045	6,02	0,0361
6	8	+	-	+	-	-	+	-	+	5,30	5,62	5,46	0,051	5,48	0,0004
7	4	+	+	-	-	-	-	+	+	5,82	5,50	5,66	0,051	5,63	0,0009
8	5	+	-	-	-	+	+	+	-	5,13	5,41	5,27	0,039	5,10	0,0289
$\sum X_{ig}\overline{Y}_i$		52,31	2,15	1,53	7,87	-0,27	0,63	0,81	-0,23			52,31	0,491	0,1463	
$в_i$		6,539	0,269	0,191	0,984	-0,034	0,079	0,101	-0,029	$S^2_{\{illegible\}}$=0,061				$S^2_{ад}$=0,073	

Таблица 3.11 Расчетная матрица и результаты эксперимента по исследованию влияния высоковольтного неоднородного электрического поля на скорость сгорания печного бытового топлива

№ опыта	Случайный порядок опытов	Матрица планирования эксперимента								Результаты эксперимента				Проверка адекватности	
		X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Y_1	Y_2	$\overline{Y}_i$	Дисперсия ошибки опыта $S^2_{\{\}}$	$\widehat{Y}_i$	$(\overline{Y}_i - \widehat{Y}_i)^2$
1	2	+	+	+	+	+	+	+	+	10,12	10,6	10,36	0,116	10,3	0,0036
2	6	+	-	+	+	-	-	+	-	9,32	8,92	9,12	0,080	9,25	0,0169
3	1	+	+	-	+	-	+	-	-	9,45	9,93	9,69	0,115	9,69	0,0000
4	7	+	-	-	+	+	-	-	+	8,93	8,47	8,70	0,106	8,64	0,0036
5	3	+	+	+	-	+	-	-	-	8,38	7,78	8,08	0,180	8,06	0,0004
6	8	+	-	+	-	-	+	-	+	6,85	7,25	7,05	0,080	7,01	0,0016
7	4	+	+	-	-	-	-	+	+	7,52	7,20	7,36	0,051	7,45	0,0081
8	5	+	-	-	-	+	+	+	-	6,54	6,30	6,42	0,029	6,40	0,0004
$\sum X_{ig}\overline{Y}_i$		66,78	4,20	2,44	8,96	0,34	0,26	-0,26	0,16			66,78	0,757	0,0346	
$в_i$		8,35	0,525	0,305	1,12	0,043	0,033	-0,033	0,02	$S^2_{\{\}}$=0,0946				$S^2_{ад}$=0,0173	

Таблица 3.12 Расчетная матрица и результаты эксперимента по исследованию влияния высоковольтного неоднородного электрического поля на скорость сгорания мазута флотского Ф5

№ опыта	Случайный порядок опытов	Матрица планирования эксперимента								Результаты эксперимента				Проверка адекватности	
		X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Y_1	Y_2	$\overline{Y}_i$	Дисперсия ошибки опыта $S^2_{\{}$	$\widehat{Y}_i$	$(\overline{Y}_i - \widehat{Y}_i)^2$
1	2	+	+	+	+	+	+	+	+	8,07	8,47	8,27	0,080	8,15	0,0144
2	6	+	-	+	+	-	-	+	-	7,49	7,07	7,28	0,088	7,39	0,0121
3	1	+	+	-	+	-	+	-	-	7,50	7,94	7,72	0,097	7,73	0,0001
4	7	+	-	-	+	+	-	-	+	6,73	7,17	6,95	0,097	6,97	0,0004
5	3	+	+	+	-	+	-	-	-	6,66	6,24	6,45	0,088	6,43	0,0004
6	8	+	-	+	-	-	+	-	+	5,44	5,80	5,62	0,065	5,67	0,0025
7	4	+	+	-	-	-	-	+	+	5,98	5,76	5,87	0,024	6,01	0,0196
8	5	+	-	-	-	+	+	+	-	5,6	5,22	5,41	0,072	5,25	0,0256
$\sum X_{ig}\overline{Y}_i$		53,57	3,05	1,67	6,87	0,59	0,47	0,09	-0,15			53,57	0,611	0,0751	
$в_i$		6,7	0,381	0,209	0,859	0,074	0,059	0,011	-0,019	$S^2_{\{}$=0,076				$S^2_{ад}$=0,0375	

– вторым значимым фактором является концентрация озона в воздухе, подаваемом на горение, так как $в_1 > в_2$;

– менее значим фактор – температура топлива перед распылителем, так как коэффициент $в_2 < в_1$ и $< в_3$.

Таблица 3.13 Критерии оценки результатов эксперимента с использованием озонированного воздуха

№ п/п	Наименование статистических параметров	Обозначен.	Исследуемое топливо	
			ПБТ	Мазут Ф5
1	Дисперсия параметра оптимизации	$S^2_{(y)}$	0,062	0,061
2	Дисперсия коэффициента регрессии	$S^2_{(bi)}$	0,0039	0,0038
3	Доверительный интервал	$\Delta в_i$	±0,144	±0,143
4	Критерий Фишера	F_P	1,98	1,19
		F_T	3,80	3,80
5	Критерий Кохрена	G_P	0,213	0,234
		G_T	0,680	0,680

Из анализа уравнений (3.7) и (3.8), характеризующих скорость сгорания топлива при наложении высоковольтного неоднородного электрического поля на пламя, следует, что:

– с увеличением коэффициента избытка воздуха α, температуры топлива T_m и напряжения U между электродами при наложении высоковольтного неоднородного электрического поля на пламя, скорость горения топлива возрастает, так как коэффициенты $в_1, в_2, в_3$ при x_1, x_2, x_3 положительны, причем наибольшее влияние оказывает коэффициент избытка воздуха ($в_3 > в_1$ и $> в_2$).

– вторым значимым фактором является напряжение между электродами, так как $в_1 > в_2$;

– менее значимым фактором, как и в первом случае, является температура топлива перед распылителем, так как коэффициент $в_2 < в_1$ и $< в_3$.

Таблица 3.14 Критерии оценки результатов эксперимента с использованием электрического поля высокой напряженности

№ п/п	Наименование статистических параметров	Обозначен.	Исследуемое топливо	
			ПБТ	Мазут Ф5
1	Дисперсия параметра оптимизации	$S^2_{\{y\}}$	0,095	0,076
2	Дисперсия коэффициента регрессии	$S^2_{\{bi\}}$	0,0059	0,0047
3	Доверительный интервал	$\Delta в_i$	±0,178	±0,159
4	Критерий Фишера	F_P	0,18	0,49
		F_T	3,80	3,80
5	Критерий Кохрена	G_P	0,238	0,159
		G_T	0,680	0,680

Анализ уравнений (3.6-3.8) показывает, что наиболее сильное влияние на увеличение скорости горения исследуемых топлив во всех рассматриваемых случаях оказывают коэффициент избытка воздуха и напряжение на электродах при наложении высоковольтного неоднородного электрического поля на пламя, так как коэффициенты $в_1$ уравнений (3.7) и (3.8) по абсолютной величине больше коэффициента $в_1$ уравнений (3.6) и (3.7). Влияние же температуры на скорость сгорания топлива во всех рассматриваемых случаях примерно одинаково, так как коэффициенты $в_2$ при x_2 отличаются друг от друга несущественно.

Для увеличения скорости сгорания топлива, а, следовательно, и повышения интенсификации процессов горения необходимо стремиться поддерживать в требуемых пределах значения основных факторов, влияющих на

процесс горения, а именно, коэффициент избытка воздуха, концентрацию озона в воздухе, подаваемом на горение, а также напряжение высоковольтного неоднородного электрического поля, накладываемого на пламя.

3.5. Производственные экспериментальные исследования

3.5.1. Условия и порядок проведения эксперимента

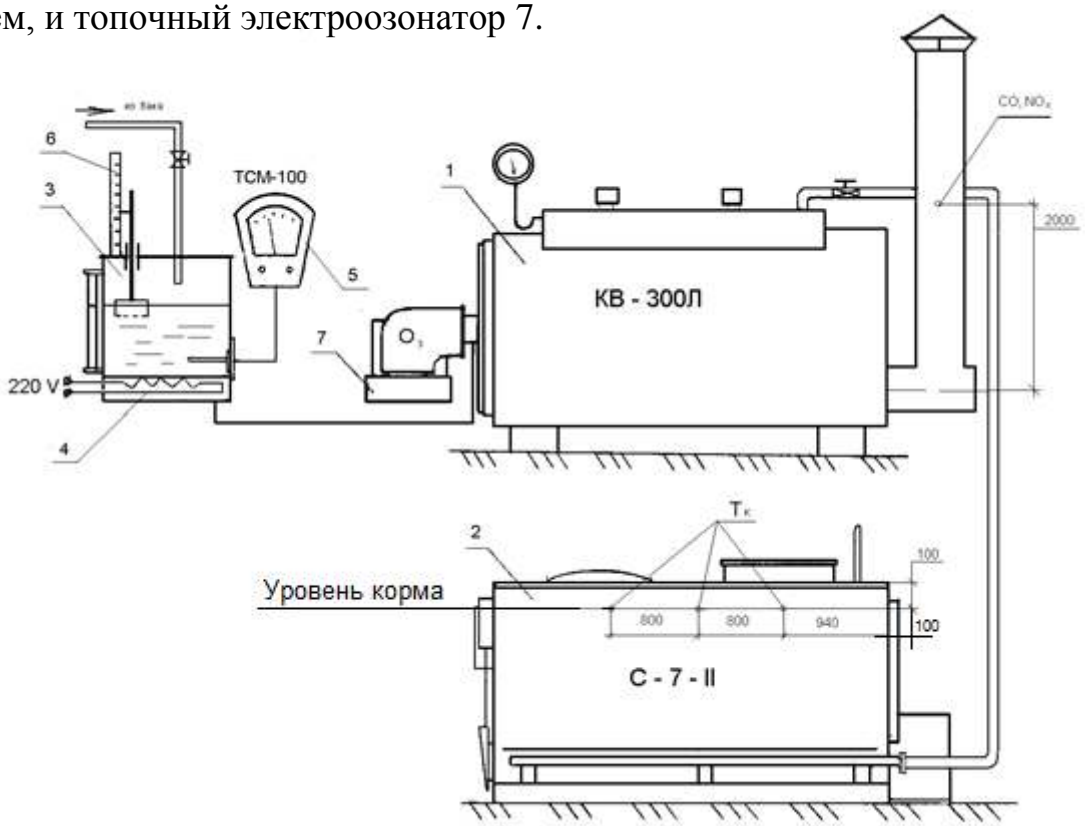
Производственный эксперимент проводили в условиях действующего кормоцеха 4-го отделения ОАО ″Учхоз Зерновое″ Зерноградского района Ростовской области, который был укомплектован четырьмя запарниками-смесителями С-7-II и двумя котлами–парообразователями КВ-300Л. Кормоцех построен в 1968 году по индивидуальному проекту с последующей частичной реконструкцией и рассчитан на кормление свиней с поголовьем до 12000 голов при суточной его производительности до 140 т.

На период проведения эксперимента, в связи с существенным сокращением поголовья свиней, суточная производительность кормоцеха не превышала восьми тонн готового корма. Кормоцех работал в одну смену. Тепловая обработка корма производилась попеременно в двух запарниках–смесителях С–7–II, один из которых работал, а второй загружался кормом и готовился к работе.

Кормление поголовья двукратное по половине суточной нормы. В период проведения исследований половина суточной нормы составляла 3972 кг, что соответствовало 5,6 $м^3$ или 80 % от общего объема смесителя. В качестве исходного материала использовали концентрированный корм, приготавливаемый в хозяйстве, основу которого представляла ячменная дерть крупного помола.

Производственные исследования проводили с использованием существующей технологической линии кормоцеха (рисунок 3.26), в состав которой входили котёл-парообразователь (ВК-300Л) 1, запарник-смеситель (С-7-II) 2, мерный бак 3 для контроля расхода топлива, оборудованный электро-

нагревательным элементом 4 мощностью 2 кВт, прибором автоматического контроля температуры топлива 5 и мерной линейкой 6 с поплавковым указателем, и топочный электроозонатор 7.



1 – котел-парообразователь КВ-300Л; 2 – запарник-смеситель С–7–II; 3 – мерный топливный бак; 4 – электронагревательный элемент; 5 – термометр манометрический ТСМ–100; 6 – мерная линейка; 7– топочный электроозонатор ОЭТ–40

Рисунок 3.26 – Схема экспериментальной установки для проведения исследований в условиях производства

Продолжительность влаготермической обработки корма определялась временем, в течение которого достигалась требуемая конечная температура его нагрева. Для определения температуры нагрева корма производили ее измерения в трех точках, расположенных по оси запарника на глубине 100 ± 5 мм от верхнего уровня корма (рисунок 3.26). Такая схема позволила получить наиболее достоверные результаты измерения.

Режим влаготермической обработки корма в эксперименте был следующим. Корм вместе с водой нагревался паром до температуры 363 ^{0}К (90^0С) [47], после чего подача пара в смеситель-запарник прекращалась, а корм выдерживался при достигнутой температуре в течение 30 минут. В процессе нагрева корм постоянно перемешивался мешалками смесителя. Режим обработки корма задавался и контролировался зоотехником отделения.

Для проведения производственного эксперимента котел-парообразователь КВ-300Л был дооборудован топочным озонатором ОЭТ– 40 конструкции ВНИПТИМЭСХ [117], характеристика которого представлена в таблице 3.15.

В процессе эксперимента котел-парообразователь работал при полной нагрузке с максимальным часовым расходом топлива. Питание котла водой было равномерным. С целью снижения затрат на проведение эксперимента использовали только печное бытовое топливо ТУ38.101.565-76.

Таблица 3.15 Основные технические данные доработанного топочного электроозонатора ОЭТ–40

№ п/п	Наименование показателей	Единицы измерения	Значения показат.
1	Номинальная производительность по озону	г/ч	23,5
2	Удельный расход энергии по озону	Вт/г	17,4
3	Номинальное напряжение	кВ	16
4	Напряжение сети	В	220
5	Потребляемая мощность электроозонатора	Вт	408
6	Производительность по воздуху	$м^3$/ч	600

В начале проведения эксперимента опытным путем устанавливали оптимальную концентрацию озона в воздухе, подаваемом на горение в котел-парообразователь КВ-300Л. Этот вопрос решался из принятого условия, из которого следует, что оптимальной концентрацией озона можно считать ту кон-

центрацию, при которой будут достигнуты наименьшее время выхода котла-парообразователя на рабочий режим (120 ^{0}C), наименьший расход топлива и наибольшее снижение объемного содержания окиси углерода (CO) в дымовых газах.

Перед началом исследований было проведено техническое обслуживание топливно-подающей системы котла и определен средний часовой расход топлива при полной нагрузке котла, который составил 27,12 кг, что на 0,12 кг (0,44%) больше паспортного, и обусловлено техническим состоянием самого котла.

В ходе эксперимента контролировали расход топлива, длительность работы котла-парообразователя, объемное содержание окиси углерода (CO) в дымовых газах, температуру топлива, подаваемого на горение, температуру и влажность воздуха в котельной, напряжение на озонаторе и концентрацию озона.

Опыты проводили с двукратной повторностью, что обеспечивало 90 % их надежности при относительной ошибке, равной трем стандартам [123, 124].

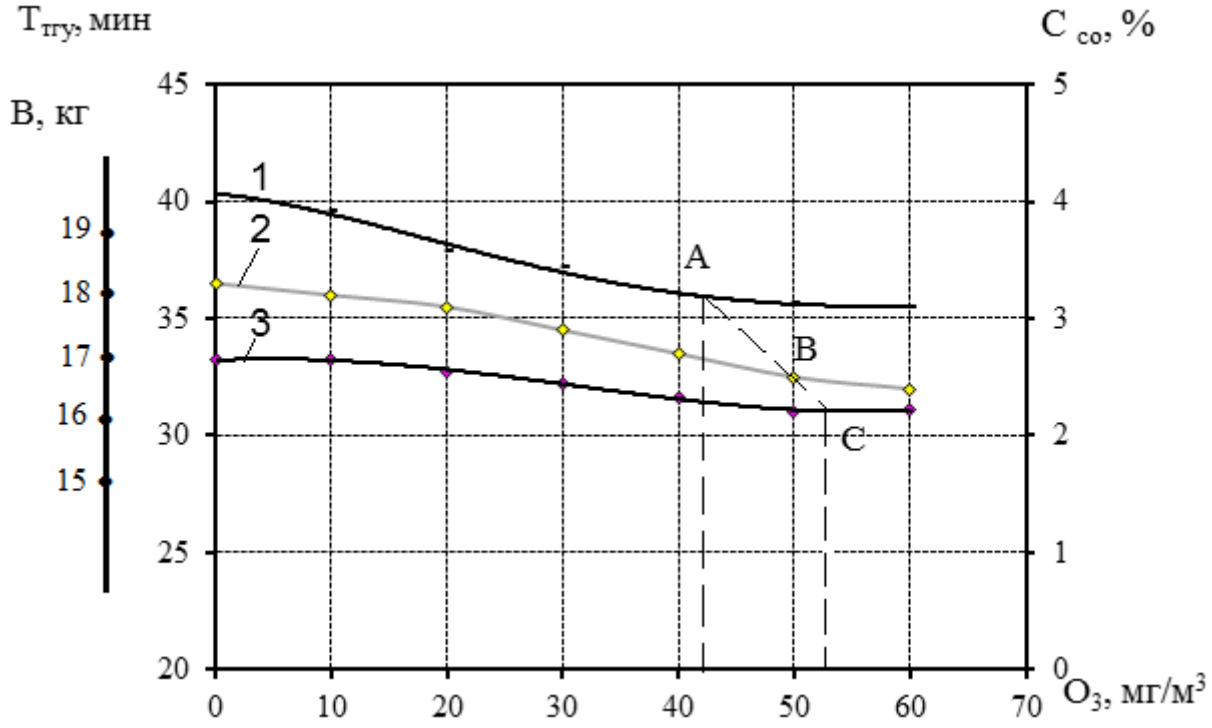
3.5.2. Определение оптимальной концентрации озона при сжигании печного топлива в котле-парообразователе КВ-300Л

При сжигании печного топлива в котле-парообразователе КВ-300Л оптимальная концентрация озона в воздухе, подаваемом на горение, полученная в ходе проведения лабораторных исследований, не может быть использована при проведении исследований в производственных условиях, так как лабораторные установки и котел-парообразователь имеют совершенно разные технические параметры. В связи с этим, были проведены исследования по определению оптимальной концентрации озона при сжигании ПБТ в котле-парообразователе КВ–300Л.

Графики экспериментальных зависимостей результатов исследований представленные на рисунке 3.27 показывают, что с увеличением концентра-

ции озона время выхода котла-парообразователя на рабочий режим (120 ^{0}C) снижается (кривая 1) с 40,3 до 35 минут, или на 13,2 %. Наибольшее снижение достигается при концентрации озона 42…43 мг/м^3 (точка А кривой 1).

С увеличением концентрации озона снижается и расход топлива (кривая 2) с 18,38 до 16,60 кг, или на 9,7 %. Наибольшее снижение расхода топлива достигалось при концентрации озона 50 мг/м^3 (точка В кривой 2).



1 – длительность выхода котла на рабочий режим; 2 – расход топлива от концентрации озона; 3 – содержание СО в газах.

Рисунок 3.27 – Характеристики работы котла КВ–300Л в зависимости от концентрации озона в воздухе, подаваемом в его топку

Учитывая то, что одним из наиболее существенных параметров, показывающих эффективность процесса горения топлива, является содержание окиси углерода (СО) в отходящих газах котла-парообразователя были проведены исследования по оценке влияния концентрации озона на ее снижение. Анализ результатов исследований показывает, что с увеличением концентрации озона содержание окиси углерода в отходящих газах снижается (кривая

3) с 2,62 до 2,22 % или на 15,3 %. Наибольшее снижение достигается при концентрации озона 52…53 мг/м^3 (точка С кривой 3).

Анализ полученных результатов показывает, что оптимальная концентрация озона при сжигании печного бытового топлива в котле-парообразователе КВ-300Л при полной его нагрузке находится в пределах от 42 до 53 мг/м^3. Для последующих исследований принята концентрация, равная 52 мг/м^3, при которой процесс сжигания печного бытового топлива в данном случае наиболее эффективен.

3.5.3. Исследование влияния озонированного воздуха на снижение расхода топлива при влаготермической обработке корма

Одним из основных параметров, влияющих на эффективность влаготермической обработки корма, является расход топлива на единицу продукции. Поэтому, среди задач исследования было определение влияния озонированного воздуха, подаваемого на горение, на снижение расхода топлива котлом КВ-300Л при влаготермической обработке концентрированного корма в запарнике-смесителе С–7–II.

На расход топлива влияют такие факторы, как техническое состояние ТГУ и, прежде всего, топливоподающей системы, коэффициент избытка воздуха, температура топлива, подаваемого на горение, температура окружающей среды и др. Наиболее существенно могут влиять коэффициент избытка воздуха (α) и температура топлива ($T_т$), а также концентрация озона в воздухе, подаваемом на горение (O_3). Температура окружающей среды не может существенно влиять на часовой расход топлива, так как ТГУ, как правило, располагаются в закрытых помещениях, где параметры среды достаточно стабильны. Часовой расход топлива можно представить многофакторной зависимостью вида:

$$B_ч = f(O_3, T_T, \alpha), \qquad (3.10)$$

Исследования проводили по плану полного факторного эксперимента типа 2^3 на двух уровнях при двух значениях факторов, для чего составляли

матрицу планирования эксперимента, которая определяла последовательность и порядок проведения опытов.

Основная задача экспериментального исследования – определение степени влияния исследуемых факторов и, в первую очередь, озонирования воздуха на снижение часового расхода печного бытового топлива, а также наиболее эффективного режима работы ТГУ.

Количество топлива (В), необходимого для осуществления влаготермической обработки находящегося в смесителе–запарнике корма суммировалось

$$B=B_{КП} + B_{ТК}, \tag{3.11}$$

где $B_{КП}$ – количество топлива, необходимого для вывода котла-парообразователя на рабочий режим, кг;

$B_{ТК}$ – количество топлива, необходимого для нагрева корма в запарнике-смесителе до требуемой температуры, кг.

Входящие в уравнение (3.11) величины $B_{КП}$ и $B_{ТК}$ определялись через часовой расход топлива

$$B_{КП} = B_{ч} \cdot t_{ТГУ}\,, \tag{3.12}$$

$$B_{ТК} = B'_{ч} \cdot t_{НК}\,, \tag{3.13}$$

где $t_{ТГУ}$, $t_{НК}$ – время выхода котла-парообразователя на рабочий режим и время нагрева обрабатываемого в смесителе–запарнике корма до требуемой температуры, ч;

$B_{ч}$ – часовой расход топлива котлом-парообразователем при выходе на рабочий режим, кг/ч;

$B'_{ч}$ – часовой расход топлива котлом-парообразователем при нагреве обрабатываемого корма до требуемой температуры, кг/ч.

Если допустить, что $B_{ч} \approx B'_{ч}$, то с учетом (3.12) и (3.13), получим:

$$B =B_{ч} (t_{ТГУ} + t_{НК}), \tag{3.14}$$

Таблица 3.16 Матрица планирования и результаты эксперимента по исследованию влияния озонированного воздуха на часовой расход топлива котлом-парообразователем КВ-300Л «Учхоза Зерновое» при выходе на рабочий режим (393 ^{0}К)

№ опыта	Случайный порядок опытов	Матрица планирования эксперимента								Результаты эксперимента (часовой расход топлива)				Проверка адекватности		Продолжит. опыта,
		X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Y_1	Y_2	$\overline{Y}_i$	Дисперсия ошибки опыта S^2_{yi}	$\widehat{Y}_i$	$(\overline{Y}_i - \widehat{Y}_i)^2$	t, мин
1	2	+	+	+	+	+	+	+	+	23,202	24,412	23,807	0,3660	23,77	0,0014	28,4
2	6	+	-	+	+	-	-	+	-	25,288	26,516	25,902	0,3770	26,17	0,0718	29,8
3	1	+	+	-	+	-	+	-	-	24,436	24,486	24,997	0,2611	24,87	0,0161	31,0
4	7	+	-	-	+	+	-	-	+	27,882	26,846	27,364	0,2683	27,27	0,0940	31,9
5	3	+	+	+	-	+	-	-	-	29,302	30,352	29,827	0,2756	29,69	0,0188	32,7
6	8	+	-	+	-	-	+	-	+	32,599	31,795	32,197	0,1616	32,09	0,0115	35,2
7	4	+	+	-	-	-	-	+	+	30,996	30,080	30,538	0,2098	30,79	0,0635	36,4
8	5	+	-	-	-	+	+	+	-	32,698	33,688	33,193	0,2450	33,19	0,0009	37,7
$\sum X_{ig}\overline{Y}_i$		227,83	-9,60	-4,40	-23,68	0,560	0,563	-0,945	-0,013			227,83	2,1644	0,278		
$в_i$		28,48	-1,20	-0,55	-2,96	0,07	0,07	-0,12	-0,002	$S^2_{(\overline{Y}_i)}$=0,271				$S^2_{ад}$=0,115		

Часовой расход топлива, входящий в выражение (3.14), является многофакторной зависимостью вида (3.10). Он, длительность выхода его на рабочий режим и продолжительность нагрева обрабатываемого корма в запарнике-смесителе определяли в ходе эксперимента.

После реализации плана эксперимента (таблица 3.16) и исключения незначимых коэффициентов получено кодированное уравнение регрессии (3.15), описывающее зависимость часового расхода топлива ($B_ч$) от величины коэффициента избытка воздуха (α), концентрации озона ($O_З$) и температуры топлива (T_T), подаваемого на горение:

$$y= 28,48 -1,2X_1 – 0,55X_2 –2,96X_3 \qquad (3.15)$$

Или в натуральных значениях факторов:

$$B_ч = 47,93 – 0,046O_З –0,055T_T \text{ - } 16,9\alpha\ . \qquad (3.16)$$

Анализ этих уравнений показывает, что наибольшее положительное влияние на часовой расход топлива оказывает коэффициент избытка воздуха, подаваемого на горение. При увеличении его от 0,8 до 1,15 (3.16) при постоянной температуре топлива 20°С и отсутствии озона в воздухе, подаваемом на горение, часовой расход топлива снижается с 33,193 до 27,364 кг, или на 17,4 %.

Следующим по значимости фактором является концентрация озона в воздухе, подаваемом на горение. При подаче 52 мг/м^3 озона в топку котла КВ–300Л в режиме полной его нагрузки и постоянных значениях температуры топлива (40°С) и коэффициента избытка воздуха (1,15) часовой расход топлива снижается с 25,902 до 23,807 кг, или на 8,1 %.

Менее значимым фактором является температура топлива. Так, увеличение ее с 20 до 40°С при постоянных значениях концентрации озона (52 мг/м^3) и коэффициента избытка воздуха (1,15) приводит к снижению часового расхода топлива с 24,997 до 23,807 кг, или только на 4,8 %.

Наиболее эффективнй режимом работы котла-парообразователя наблюдается при коэффициенте избытка воздуха 1,15, температура топлива 40°С и концентрации озона 52 мг/м^3 (таблица 3.16). Указанный режим работы обеспе-

чивает наименьший часовой расход топлива, который составил 23,807 кг, что на 11,8 % ниже паспортного (27 кг).

Полученная математическая модель (3.16) часового расхода топлива позволяет в реальных условиях работы технологической линии поддерживать оптимальный часовой расход топлива котлом-парообразователем КВ-300Л при влаготермической обработке корма.

3.5.4. Исследование влияния озонированного воздуха на повышение производительности технологической линии обработки корма

Продолжительность влаготермической обработки корма – основной технологический фактор, от которого зависят не только качество продукта, но и энергозатраты, а, следовательно, и стоимость самой влаготермической обработки.

Определена степень влияния озонирования воздуха на сокращение продолжительности нагрева корма в запарнике-смесителе, которая оказывает непосредственное влияние на снижение энергозатрат и на повышение производительности кормоцеха.

Экспериментальные исследования проводили в следующей последовательности. Запускали в работу ТГУ и выводили ее на рабочий режим (120^{o}С), после чего пар температурой 120^{o}С подавали в смеситель-запарник, в котором было 3972 кг кормовой смеси. В процессе нагрева кормовую смесь постоянно перемешивали включением в работу мешалок. При достижении температуры 90^{o}С подачу пара в запарник прекращали, а кормовую смесь еще выдерживали в течение 30 минут, а затем производили выгрузку.

В ходе эксперимента исследовали влияние озонированного воздуха на изменение температуры отходящих дымовых газов с целью подтверждения факта повышения или понижения температуры пламени в топке котла.

По данным лабораторных исследований, как уже отмечали, применение озонированного воздуха в качестве реагента, кроме снижения расхода топлива, способствовало и сокращению времени нагрева воды в калориметре на 8…8,6

% (раздел 3.2). Это подтверждается и результатами производственных исследований [125].

Графические зависимости результатов исследований (рисунок 3.28) показывают, что применение озонированного воздуха в качестве реагента с концентрацией озона 52 мг/м^3 при α =1,15 и T_T =20^{o}C увеличивает температуру смеси (пар-вода) в котле-парообразователе на 8,1^{o}C (кривые 1 и 2) и сокращают время выхода его на рабочий режим с 28,8 до 23,6 мин, или на 5,2 мин.

Если при отсутствии озона для достижения температуры смеси (пар–вода) 120^{o}C необходимо 28,8 мин (кривая *OO´*) при расходе топлива 13,018 кг, то при подаче озона за это же самое время температура смеси достигала 128,1^{o}C (кривая *OO´´*) почти при таком же расходе топлива (13,206 кг).

Температура смеси (пар – вода) во втором случае увеличилась на 8,1^{o}C, а расход топлива увеличился на 0,188 кг, или на 1,4 %.

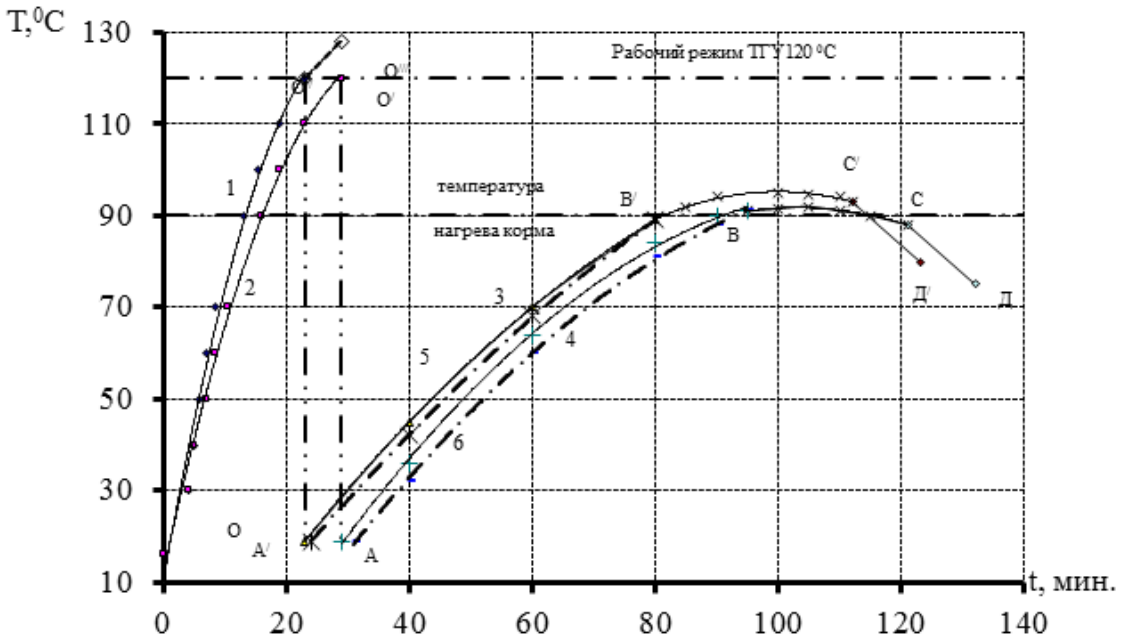
С учетом ошибки опыта расход топлива в обоих случаях практически одинаков, а это значит, что увеличение температуры смеси (пар – вода) и сокращение времени выхода котла на рабочий режим практически не потребовало дополнительного расхода топлива и стало возможным благодаря интенсификации процесса горения топлива, которая достигнута за счет озонирования воздуха, подаваемого на горение, обеспечившее наиболее полное его сгорание. Это согласуется и с результатами лабораторных исследований (раздел 3.2).

Вместе с тем, следует отметить, что сокращение времени выхода котла на рабочий режим (120^{o}C) с 28,8 до 23,6 мин при подаче озона на горение, сопровождается снижением расхода топлива с 13,018 до 10,688 кг, или на 17,9 %, т.е. пропорционально отработанному времени. Часовой расход топлива в эксперименте постоянный и составлял в среднем 27,12 кг/ч.

Интенсификация горения печного бытового топлива в котле КВ-300Л при концентрации озона в воздухе, подаваемом на горение, равной 52 мг/м^3, составила 18,1 %.

Интенсификация горения топлива повышает температуру пламени, а, следовательно, и температуру смеси (пар – вода), что подтверждается повыше-

нием температуры дымовых газов котла КВ-300Л с 313 до 331°С или на 18 % (рисунок 3.29).



экспериментальные кривые: 1, 3 – с подачей озона; 2, 4 – без озона; теоретические кривые: 5 – с озоном; 6 – без озона.

Рисунок 3.28 – График рабочего процесса влаготермической обработки корма в запарнике-смесителе С-7-II с использованием озонирующего эффекта

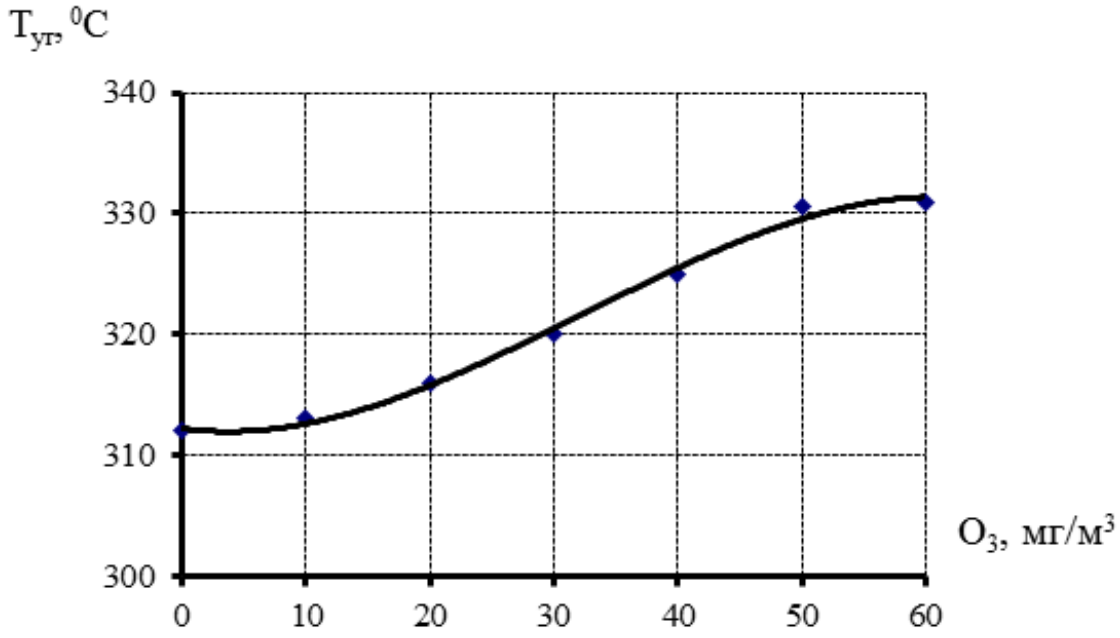


Рисунок 3.29 – Температура дымовых газов на выходе из котла КВ-300Л в зависимости от изменения концентрации озона в воздухе, подаваемом на горение.

Продолжительность влаготермической обработки корма в технологической машине, то она зависит от параметров пара и, в первую очередь, от температуры и давления. По данным рисунка 3.28 видно, что при обработке кормовой 3972 кг смеси, состоящей из концентрированного корма, воды и пара температурой 120°С (кривая 2, точка *O´*) при отсутствии озона в воздухе, подаваемом на горение, продолжительность нагрева корма до температуры 90°С составила 61,8 мин (кривая 4, участок *AB*).

При подаче в котел–парообразователь воздуха на горение с концентрацией озона 52 мг/м^3 температура смеси (пар – вода) в котле увеличилась на 8,1°С, что привело к повышению температуры обрабатываемого корма в запарнике – смесителе на 4,5…5°С (кривая 3, участок *A´B´*), а, следовательно, и к ускорению процесса нагрева корма. Продолжительность нагрева корма в последнем случае составила 57,9 мин, что на 3,9 мин (6,3 %) меньше, чем в первом случае, когда озонированный воздух не использовался. Следует заметить, что и томление корма также протекает при более высокой температуре, которая составила в среднем 92,5…93°С (кривая 3, участок *B´C´*), что на 2,5°С выше, чем на участке *BC* кривой 4.

Продолжительность влаготермической обработки корма в технологической машине теоретически может быть описана выражением

$$\tau = \frac{Q_{нк}}{Q_{кп}}, \text{ ч}, \qquad (3.17)$$

где $Q_{нк}$ – количество теплоты, необходимой для нагрева кормовой смеси до требуемой температуры, кДж;

$Q_{кп}$ – теплопроизводительность котла-парообразователя, кДж/ч.

Часовую теплопроизводительность котла-парообразователя можно выразить зависимостью [73]

$$Q_{кп} = D \cdot (i_п - i_{пв}), \text{ кДж/ч}, \qquad (3.18)$$

где D – количество пара, производимого котлом–парообразователем, кг/ч;

$i_п$ – энтальпия пара, кДж/кг;

$i_{пв}$ – энтальпия питательной воды, кДж/кг.

Количество теплоты для нагрева корма до требуемой температуры можно представить в виде баланса:

$$Q_{нк} = Q_к + Q_в + Q_ч + Q_{воз} + Q_{пот}, \qquad (3.19)$$

где $Q_к, Q_в, Q_ч, Q_{воз}$ – количество теплоты, необходимой для нагрева корма, воды, массы чана и воздуха в чане, кДж;

$Q_{пот}$ – потери теплоты в окружающую среду через стенки чана и теплопроводящей сетью, кДж.

Составляющие (3.19) можно представить в виде произведений их масс, массовых теплоемкостей и разность температур.

Потери теплоты в окружающую среду будут:

$$Q_{пот} = 0{,}12 Q_к, \text{ кДж} \qquad (3.20)$$

где 0,12 – коэффициент, учитывающий указанные потери [46].

Ввиду того, что эти потери пропорциональны росту температуры обрабатываемого корма, то можно записать

$$Q_{пот} = \frac{0{,}12}{75} Q_к (t_к - t_н) = 1{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot Q_к (t_к - t_н), \qquad (3.21)$$

где $1{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot Q_к$ – потери теплоты, приходящиеся на один градус повышения температуры корма в запарнике–смесителе, кДж/ ^{0}К;

75 –интервал изменения температуры нагрева корма в запарнике–смесителе, ^{0}К;

$t_н, t_к$ – начальная и конечная температуры нагрева корма, ^{0}К.

Подставляя (3.18) и (3.19) в (3.17), окончательно имеем:

$$\tau = \frac{G_к \cdot c_к + G_в \cdot c_в + G_ч \cdot c_ч + G_{воз} \cdot c_{воз} + 1{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot D (i_п - i_{пв}) \cdot (t_к - t_н)}{D \cdot (i_п - i_{пв})}, \text{ч} \qquad (3.22)$$

На рисунке 3.28 представлены графические зависимости продолжительности тепловой обработки корма в технологической машине от температуры, построенные по расчетным (3.22) и экспериментальным данным.

Опытные кривые нагрева корма 3 и 4 согласуются с теоретическими (расчетными) кривыми 5 и 6. Степень их сходимости составляет 91…95 %.

Выражение (3.22) позволяет определять продолжительность тепловой обработки корма в технологической машине периодического действия в зависимости от изменения параметров тепловых процессов в ТГУ и технологической машине.



1 – без озона; 2 – с использованием озона

Рисунок 3.30 – График технологических операций влаготермической обработки кормовой смеси в запарнике–смесителе С–7–II с учетом работы котла КВ–300Л.

По данным рисунка 3.30 видно, что чистое время работы технологической линии по обработке корма без применения озонированного воздуха составило 130,6 мин. (график 1), а при использовании озонированного воздуха – 121,5 мин (на 9,1 мин. меньше, график 2).

Таблица 3.17 Результаты производственного эксперимента по исследованию влияния озонированного воздуха на снижение расхода топлива и повышение производительности технологической линии

№ п/п	Наименование основных показателей	Исследуемые варианты		Изменения показателей	
		Без озона	С озоном	Натуральные един.	%
1	Количество обрабатываемой кормовой смеси в опыте, кг	3972	3972		
2	Чистое время работы технологической линии за опыт, мин.	130,6	121,5	9,1	7,0
3	Продолжительность работы ТГУ, мин.	90,6	81,5	9,1	10,1
4	Продолжительность нагрева кормовой смеси в запарнике–смесителе до 90 ^{0}С, мин.	61,8	57,9	3,9	6,3
5	Время выхода ТГУ на рабочий режим, мин.	28,8	23,6	5,2	18,1
6	Продолжительность тепловой обработки корма, мин.	91,8	87,9	3,9	4,3
7	Расход топлива за опыт, кг	40,951	36,838	4,113	10,04
8	Удельный расход топлива, кг/т	10,310	9,274	1,036	10,04
9	Производительность технологической линии за час чистой работы, кг/ч	1822	1962	140	7,7

Общая продолжительность работы котла КВ–300Л без применения озонированного воздуха составило 90,6 мин., а с применением озонированного воздуха – 81,5 мин. или на 9,1 мин (10,1 %) меньше, а расход топлива

соответственно составил 40,951 кг и 36,838 кг или на 4,113 кг (10,04 %) меньше (таблица 3.17).

Исходя из уравнения (2.53) следует, что сокращение времени работы технологической линии приводит к повышению ее производительности. Результаты производственного эксперимента (таблица 3.17) действительно показали, что производительность технологической линии при обработке 7945 кг кормовой смеси за одну смену составила 1962 кг/ч при использовании озонирования воздуха и 1822 кг/ч при отсутствии озонированного воздуха, что на 7,7 % больше.

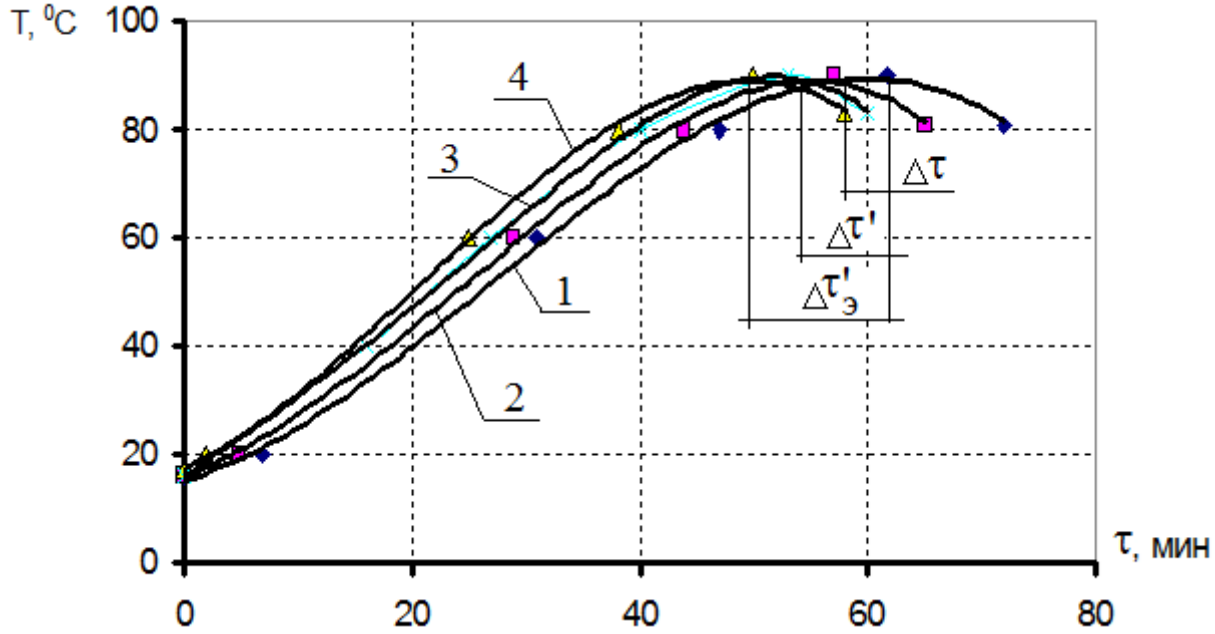
Таким образом, применение озонированного воздуха в качестве реагента при влаготермической обработке корма способствует повышению производительности технологической линии на 7,7 %, снижению удельного расхода топлива на 10,04 % и сокращению продолжительности тепловой обработки корма в технологической машине на 6,3 %.

Кроме того, как установлено теоретическими исследованиями (зависимость 2.22) существенно интенсифицировать процесс нагрева корма в технологической машине можно за счет дополнительной подачи пара через вращающиеся рабочие органы (мешалки).

Отсутствие возможности многофакторной оценки параметров процесса непосредственно в производственных условиях с использованием полученных характеристик котельной установки и пара, заставило нас ограничиться проведением детерминированных опытов по определению времени нагрева порции кормосмеси в смесителе–запарнике при параллельной подаче пара через вращающиеся рабочие органы.

Производственными опытами установлено, что дополнительная подача пара приводит к сокращению времени нагрева кормовой смеси ($\Delta\tau'$) с 61 мин. до 53 мин или на 13,1 % (рисунок 3.31, кривые 1 и 3). Это приводит к повышению производительности технологической машины с 4,6 т/ч для кормовой смеси влажностью 70 % до 5,16 т/ч при той же влажности или на 10,8 %, а совместное применение озонированного воздуха и дополнительной подачи

пара сокращает времея нагрева корма ($\Delta\tau'_э$) на 16,4 %, что также способствует повышению производительности на 17,4 % (рисунок 3.31, кривая 4).



1 – подача пара через паровые насадки; 2 – с использованием озона; 3 – подача пара через паровые насадки и рабочие лопасти; 4 – подача пара через паровые насадки, рабочие лопасти и с использованием озона

Рисунок 3.31 – Графики изменения температуры продукта при различных схемах подачи пара

3.5.5. Исследование влияния озонированного воздуха на снижение вредных выбросов в атмосферу

3.5.5.1. Влияние озонированного воздуха на снижение содержания окиси углерода в дымовых газах

Интенсификация производства, увеличение выработки электрической и тепловой энергии приводят к увеличению вредных выбросов в атмосферу.

Основными факторами, влияющими на содержание вредных выбросов в атмосферу, являются, прежде всего, состав, вид и количество сжигаемого топлива, конструктивные особенности ТГУ, а также коэффициент избытка воздуха [126-129].

Вредными выбросами в атмосферу являются окись углерода (CO), окись и двуокись азота (NO, NO_2), а также сернистый ангидрид (SO_2) [130, 131].

Для проведения исследований были выбраны только CO, NO и NO_2, что же касается сернистого ангидрида (SO_2), то, как установлено [126] единственным способом его снижения в условиях сельского хозяйства является использование топлив с незначительным содержанием серы. В используемом нами топливе содержание серы не превышало 0,5 % (таблица 3.1).

Для проведения исследований были отобраны только те факторы, которые независимы и значимы. Вид топлива и химический состав не учитывался, так как для проведения исследований использовали конкретное топливо – печное бытовое и конкретную ТГУ. Таким образом, для проведения исследований были выбраны такие факторы, как расход топлива, коэффициент избытка воздуха и концентрация озона, значения уровней варьирования которых представлены в таблице 3.18.

В качестве параметра оптимизации приняли концентрацию исследуемых вредных выбросов (CO и $NO+NO_2$). Исследования проводили по плану полного факторного эксперимента типа 2^3 на двух уровнях при двух значениях факторов, для чего составляли матрицы планирования эксперимента, которые определяли последовательность и порядок проведения опытов.

Отбор проб продуктов питания проводили спустя 10 минут после выхода ТГУ на рабочий режим из дымовой трубы на высоте двух метров от места выхода газа в трубу [127].

Определение концентрации окиси углерода (CO) в дымовых газах проводили с помощью химического переносного газоанализатора ГХП-100 с относительной погрешностью ±1…1,5 %.

Таблица 3.18 Значения выбранных уровней варьируемых факторов, влияющих на содержание окиси углерода (CO) и окислов азота ($NO+NO_2$) в дымовых газах

№ п/п	Факторы	Обозначения	Кодовые обозначения	Уровни факторов			Интервал варьирования
				верхний (+1)	нижний (-1)	основной (0)	
1	Расход топлива	B, кг/ч	X_1	27,0	16,2	21,6	5,4
2	Коэффициент избытка воздуха	α	X_2	1,15	0,80	0,98	0,18
3	Концентрация озона	O_3, мг/м^3	X_3	52	0	26	26

Определение концентрации окислов азота в дымовых газах производили универсальным переносным газоанализатором УГ-2. На практике получил широкое распространение экспресс-метод определения окислов азота в дымовых газах именно с помощью УГ-2 [127].

Результаты эксперимента [132] по исследованию влияния озонированного воздуха на снижение содержания окиси углерода в дымовых газах представлены в таблице 3.19.

Обработка полученных результатов позволила получить уравнение регрессии, описывающее зависимость объемного содержания CO от количества сжигаемого топлива, концентрации озона и значений коэффициента избытка воздуха:

$$Y = 2{,}48 + 0{,}09X_1 - 0{,}29X_2 - 0{,}18X_3 . \quad (3.23)$$

Или в натуральных значениях факторов получили выражение:

$$N_{co} = 3{,}8 + 0{,}017B_ч - 1{,}53\alpha - 0{,}007O_3 . \quad (3.24)$$

Из этих уравнений видно, что наибольшее влияние на снижение содержания CO в дымовых газах оказывает коэффициент избытка воздуха. При увеличении его с 0,8 до 1,15 (таблица 3.19, опыты 1, 3), при постоянном ча-

совом расходе топлива (27 кг/ч) и постоянной концентрации озона (52 мг/м^3), содержание СО снизилось с 2,63 до 2,12 % по объему, или на 19,4 %. В опытах 5 и 7 содержание СО снизилось на 20,2%.

Следующим по значимости фактором является концентрация озона. При концентрации 52 мг/м^3, полной загрузке котла и постоянном коэффициенте избытка воздуха, равном 1,15 (опыты 1 и 5), содержание СО снизилось с 2,45 до 2,12 % по объему или на 13,5 %, а при загрузке в 60 % (опыты 2 и 6) с 2,23 до 1,98 % по объему или на 11,2 %.

Увеличение часового расхода топлива способствует повышению содержания СО в дымовых газах. Так, с ростом расхода топлива с 16,2 до 27 кг/ч при концентрации озона 52 мг/м^3 и α = 1,15 (опыты 1 и 2) содержание СО увеличилось с 1,98 до 2,12 % или на 0,14 % по объему.

Эти данные показывают, что применение озонированного воздуха в качестве реагента при оптимальных значениях коэффициента избытка воздуха позволяет снизить содержание окиси углерода в дымовых газах котла-парообразователя КВ-300Л на 11…13,5 %.

5.5.5.2. Исследование влияния озонированного воздуха на снижение содержания окислов азота в дымовых газах

В результате реализации матрицы планирования эксперимента (таблица 3.20), обработки их и исключения незначимых коэффициентов получено уравнение регрессии, описывающее зависимость содержания оксидов азота NO_x от количества сжигаемого топлива, концентрации озона и значений коэффициента избытка воздуха:

$$У = 272 + 81{,}5X_1 + 49{,}5X_2 + 24X_1X_2 + 13{,}5X_1X_3 , \qquad (3.25)$$

Наибольшее влияние на содержание NO_x в дымовых газах оказывают количество топлива, сжигаемого в единицу времени, и коэффициент избытка воздуха. Совсем незначительную роль играет озон.

Таким образом:

– использование озонированного воздуха в качестве реагента при сжигании печного бытового топлива в котле КВ-300Л при оптимальной концентрации озона, равной 52 мг/м^3, и оптимальном коэффициенте избытка воздуха, равном 1,15, способствует снижению содержания окиси углерода в дымовых газах на 11…13,5% по объему;

– озонированный воздух практически не оказывает влияния на изменение содержания окислов азота в дымовых газах котла КВ-300Л при использовании печного бытового топлива;

– полученная математическая модель объемного содержания окиси углерода в дымовых газах позволяет в реальных условиях при использовании печного бытового топлива контролировать содержание *CO* в дымовых газах котла, а, следовательно, и полноту сгорания топлива.

3.5.6. Методика расчета производительности топочного электроозонатора для котлов с паропроизводительностью до 400 кг пара в час

Параметрами топочного электроозонатора являются производительность по озону ($П_{эл}$) и мощность (P). Для котлов различной паропроизводительности требуются топочные электроозонаторы разной производительности.

Зная оптимальную концентрацию озона, обеспечивающую наиболее полное сгорание конкретного вида топлива, можно определить часовую потребность озона ($Q_{\text{оз}}$), необходимого для обеспечения экономичной работы котла-парообразователя:

$$Q_{оз} = O_{\text{з}} \cdot B_r \cdot V_{\text{д}}, \qquad \text{мг/м}^3$$

(3.26)

где $O_{\text{з}}$ – оптимальная концентрация озона, мг/м^3;

B_r – наибольший часовой расход топлива котлом-парообразователем, кг/ч;

$V_{д}$ – действительный расход воздуха котлом-парообразователем, м^3/кг.

Таблица 3.19 Расчетная матрица и результаты эксперимента по исследованию влияния озонированного воздуха на снижение содержания окислов углерода (CO) в дымовых газах котла-парообразователя КВ-300Л

№ опыта	Случайный порядок опытов	Матрица планирования эксперимента								Результаты эксперимента				Проверка адекватности	
		X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Y_1	Y_2	$\overline{Y}_i$	Дисперсия ошибки опыта $S^2_{\{\}}$	$\widehat{Y}_i$	$(\overline{Y}_i - \widehat{Y}_i)^2$
1	2	+	+	+	+	+	+	+	+	2,02	2,22	2,12	0,0100	2,10	0,0004
2	6	+	-	+	+	-	-	+	-	1,89	2,07	1,98	0,0081	1,95	0,0009
3	1	+	+	-	+	-	+	-	-	2,72	2,54	2,63	0,0081	2,68	0,0025
4	7	+	-	-	+	+	-	-	+	2,36	2,62	2,49	0,0169	2,50	0,0001
5	3	+	+	+	-	+	-	-	-	2,56	2,34	2,45	0,0121	2,46	0,0001
6	8	+	-	+	-	-	+	-	+	2,14	2,32	2,23	0,0081	2,25	0,0004
7	4	+	+	-	-	-	-	+	+	3,19	2,95	3,07	0,0144	3,05	0,0004
8	5	+	-	-	-	+	+	+	-	3,02	2,76	2,89	0,0169	2,86	0,0009
$\sum X_{ig}\overline{Y}_i$		19,86	0,68	-2,3	-1,42	0,04	-0,12	0,10	-0,04			19,86	0,0946	0,0057	
$в_i$		2,48	0,09	-0,29	-0,18	0,005	-0,015	0,013	-0,005	$S^2_{\{\}}$=0,012				$S^2_{ад}$=0,0525	

Таблица 3.20 Расчетная матрица и результаты эксперимента по исследованию влияния озонированного воздуха на снижение содержания окислов азота (NO_2) в дымовых газах котла-парообразователя КВ-300Л ($NO_x = NO + NO_2$)

№ опыта	Случайный порядок опытов	Матрица планирования эксперимента								Результаты эксперимента				Проверка адекватности	
		X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Y_1	Y_2	$\overline{Y}_i$	Дисперсия ошибки опыта $S^2_{(i)}$	$\widehat{Y}_i$	$(Y_i - \widehat{Y}_i)^2$
1	2	+	+	+	+	+	+	+	+	406	450	428	484	440.5	156.25
2	6	+	-	+	+	-	-	+	-	201	223	212	121	202.5	90.25
3	1	+	+	-	+	-	+	-	-	338	306	322	256	302.5	380.25
4	7	+	-	-	+	+	-	-	+	151	165	158	49	151.5	42.25
5	3	+	+	+	-	+	-	-	-	408	442	424	256	413.5	110.5
6	8	+	-	+	-	-	+	-	+	234	206	220	196	229.5	90.25
7	4	+	+	-	-	-	-	+	+	223	253	238	225	266.5	812.25
8	5	+	-	-	-	+	+	+	-	183	161	172	121	178.5	42.25
$\sum X_{ig}\overline{Y}_i$		2176	652	396	64	192	108	-76	-88			2176	1708	1724.25	
$в_i$		272	81.5	49.5	8	24	13.5	-8.03	-8.1	$S^2_{(i)}$=213.5					

Действительный расход воздуха на 1 кг сжигаемого топлива определяется индивидуально для каждого вида топлива по зависимости [80, 133]:

$$V_{д} = \alpha \cdot V_{т},\ м^3/кг \qquad (3.27)$$

где α – коэффициент избытка воздуха;

$V_{т}$ – теоретический расход воздуха, необходимого для полного сгорания 1 кг топлива, $м^3/кг$

Далее зная элементарный состав используемого топлива, а также, пользуясь формулами химических реакций горения, определяется теоретический расход воздуха [133]

$$V_{т} = 0{,}089C^{p} + 0{,}266H^{p} + 0{,}033S^{p} - 0{,}033O^{p},\ м^3/кг \qquad (3.28)$$

где $C^{p}, H^{p}, S^{p}, O^{p}$ – углерод, водород, сера, кислород – химические элементы рабочего состава топлива в %.

Если производительность топочного электроозонатора выразить зависимостью [115]:

$$П_{эл} = O_{З}' \cdot v \cdot F \qquad (3.29)$$

и приравнять к (3.26), то получим уравнение:

$$O_{З}' \cdot v \cdot F = O_{З} \cdot B_{r} \cdot V_{д}, \qquad (3.30)$$

где $O_{З}'$ – концентрация озона на выходе электроозонатора, $мг/м^3$;

v – скорость озоновоздушного потока на выходе, м/ч;

F – площадь озоновоздушного потока, $м^2$.

Принимая $O_{З}' = O_{З}$ получим:

$$v \cdot F = B_{r} \cdot V_{д}. \qquad (3.31)$$

Выражение (3.31) дает возможность определения параметров озоновоздушного потока, а зная производительность озонатора, можно определить

его мощность, которая пропорциональна количеству озона, получаемого в единицу времени [115].

$$Q_{\text{оз}} = P = \kappa \cdot J \cdot U_{\text{н}}, \text{ мг/ч} \qquad (3.32)$$

где P – мощность разрядного промежутка, Вт;

κ – коэффициент пропорциональности, мг/м^3 Вт;

J – общий ток короны, А;

$U_{\text{н}}$ – начальное напряжение на озонаторе, В.

Данная методика позволяет определить производительность топочных электроозонаторов для котлов-парообразователей, используемых в животноводстве с паропроизводительностью до 400 кг пара в час, а также рассчитать их основные геометрические параметры и мощность.

ВЫВОДЫ

1. Применение озонированного воздуха в качестве реагента с концентрацией озона 52 мг/м^3 при влаготермической обработке концентрированного корма в запарнике-смесителе С-7-II и использовании котла-парообразователя КВ-300Л обеспечивает повышение производительности технологической линии на 7,7 % при одновременном снижении удельного расхода топлива на 10,04 % за счет интенсификации процессов горения топлива.

2. Применение озонированного воздуха с концентрацией озона 52 мг/м^3 интенсифицирует процесс сгорания печного бытового топлива в топке котла-парообразователя КВ-300Л, что подтверждается повышением температуры смеси (пар-вода) в котле на 8,1^{o}С и повышением температуры дымовых газов на 18^{o}С. При этом сокращается длительность выхода котла-парообразователя на рабочий режим (120^{o}С) на 18,1 % и интенсифицируется процесс нагрева корма в технологической машине, что снижает продолжительность его тепловой обработки на 6,3 %. Это сокращает продолжительность работы технологической линии на 7 %, что приводит к снижению всех видов тепловых потерь, а также к снижению расхода топлива и электроэнергии.

3. Работа котла-парообразователя КВ–300Л в наиболее экономичном режиме (α=1,15, $T_т$=40^{o}С) при концентрации озона 52 мг/м^3 на печном бытовом топливе способствует снижению содержания окиси углерода (СО) в дымовых газах на 13,5 % по объему. Озонированный воздух практически не оказывает влияния на снижение содержания окислов азота в дымовых газах.

4. Полученная математическая модель часового расхода топлива позволяет в реальных условиях работы технологической линии контролировать оптимальный часовой расход топлива котлом-парообразователем в зависимости от изменения коэффициента избытка воздуха, температуры топлива и

концентрации озона, а модель объемного содержания окиси углерода в дымовых газах при сжигании печного бытового топлива позволяет контролировать объемное содержание CO.

5. Применение озонированного воздуха в качестве реагента с концентрацией озона 52 мг/м^3 при сжигании ПБТ в котле КВ–300Л, работающего на полной нагрузке при α=1,15 и $T_т$=40^{o}C, снижает часовой расход топлива на 11,8%. 6. Результаты производственного эксперимента подтверждают справедливость принятых теоретических предпосылок, а также целесообразность использования озонированного воздуха в целях совершенствования процесса тепловой обработки кормов в аппаратах периодического действия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Менькин В.К. Кормление животных / В.К. Менькин. – 2-е издание, перераб. и доп. – Москва: Колос, 2006. – 360 с.
2. Толоконников Ю.А. Кормление сельскохозяйственных животных в промышленном животноводстве / Ю.А. Толоконников, В.А. Тищенко. – Ленинград, 1978. – 384 с.
3. Толстоухова Т.Н. Экологически чистый способ обработки грубых кормов перед скармливанием / Т.Н. Толстоухова, И.В. Назаров // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – №12. – 2015. – С.10-14.
4. Ревякин Е.Л. Опыт освоения современных технологий и оборудования для внутрихозяйственных комбикормовых предприятий / Е.Л. Ревякин, В.И. Пахомов. – Москва: ФГНУ Росинформагротех, 2007. – 128 с.
5. Кирсанов В.В. Механизация и технология животноводства: учебник / В.В. Кирсанов, Д.Н. Мурусидзе, В.Ф. Некрашевич и др. – Москва: ИНФРА-М, 2013. – 585 с.
6. Фаритов Т.А. Корма и кормовые добавки для животных: учебное пособие / Т.А. Фаратов. – Санкт-Петербург: Лань, 2010. – 304 с.
7. Фаритов Т.И. Использование кормовых добавок в животноводстве / Т.А. Фаритов. – Уфа: БГАУ, 2002. – 156 с.
8. Попов В.В. Качество кормов в решении проблемы растительного белка / В.В. Попов // Кормопроизводство. – 2002. – №1. – С.24–27.
9. Сыроватка В.И. Машинные технологии приготовления комбикормов в хозяйствах / В.И. Сыроватка. – Москва: ГНУ ВНИИМЖ, 2010. – 248 с.
10. Сыроватка В.И. Ресурсосбережение при производстве комбикормов в хозяйствах / В.И. Сыроватка // Техника и оборудование для села. – 2011. – №6. – С.22–25.

11. Афанасьев В.А. Теория и практика специальной обработки зерновых компонентов в технологии комбикормов / В.А. Афанасьев. – Воронеж: Воронежский гос. институт, 2009. – 296 с.
12. Акулиничев А.Ю. Эффективность различных способов обработки кормов / А.Ю. Акулиничев, Е.С. Кочегура, В.А. Михайлов // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: материалы 5 Международной научно-практической конференции. В рамках 15-й Международной агропромышленной выставки Интерагромаш. 2012. – Ростов-на-Дону, 2012. – С.126–128.
13. Смоленский А.В. Результаты исследований технологического модуля высокоинтенсивной тепловой обработки ингредиентов комбикормов / А.В. Смоленский, В.Д. Каун, В.А. Михайлов и др. // Инновационные процессы в технологии животноводства: исследования, испытания, внедрение. – Зерноград, 2011. – С.75–82.
14. Тимошишин М. Резервы комбикормового производства / М. Тимошишин // Комбикормовая промышленность. – 1988. – №2. – С.1–5.
15. Афанасьев В. Специальная обработка зерна и комбикормов / В. Афанасьев, А. Орлов // Комбикорма. – 1999. – №7. – С.15–17.
16. Шевцов А. Тепловая обработка ячменя перегретым паром / А. Шевцов, Е. Острикова, А. Ткачев // Комбикорма. – 2010. – №8. – С.43–44.
17. Технология производства комбикормов: справочник инженера-механика сельскохозяйственного производства. – Москва: ФГНУ Росинформагротех, 2011. – Ч. II. – 96 с.
18. Афанасьев В. Комплект оборудования для микронизации зерна с последующим плющением / В. Афанасьев, И. Мещеряков, Д. Кочанов // Комбикорма. – 2014. – №10. – С.52–54.
19. Брагинец Н. Микронизация зерна / Н. Брагинец, В. Рабштына // Комбикормовая промышленность. – 1989. – №4. – С. 20–21.
20. Клычев Е. Способы влаготепловой обработки кормовых продуктов / Е. Клычев // Комбикорма. – 2002. – №4. – С. 20–21.

21. Сытько А. Способ повысить эффективность гранулирования / А.Сытько // Комбикорма. – 2014. – №11. – С. 47–48.
22. Иванов С.В. Экструзионные корма для Агропрома / С.В. Иванов // Агропромышленный комплекс Ленинградской области. – 2004. – №1. – С. 19–20.
23. Соколов В. Экструдирование для обеззараживания кормов / В. Соколов, Т. Слащина // Комбикорма. – 2006.– №5. – С. 78–80.
24. Егоров Б.Б. Исследование биологической эффективности и санитарного качества экструдированной кормовой добавки для молодняка сельскохозяйственной птицы в процессе хранения / Б.Б. Егоров, Н.А. Ану, Н.В. Ворона //Зернові продукти і комбікорма. – 2011. – №2(42). – С. 29–31.
25. Сидоренко А. Переработка отходов методом сухой экстракции / А. Сидоренко // Комбикорма. – 2006. – №6. – С. 50–52.
26. Лухт Н. Экспандированный комбикорм для молочных коров / Н. Лухт // Комбикорма. – 2014. – № 11. – С.43–44.
27. Морозов Н.М. Развитие машинных технологий и систем технических средств для механизации и автоматизации процессов в животноводстве / Н.М. Морозов // Техника и оборудование для села. – 2013. – №7. – С. 2–7.
28. Морозов Н.М. Развитие машинных технологий и систем технических средств для механизации и автоматизации процессов в животноводстве / Н.М. Морозов // Техника и оборудование для села. – 2013. – №8. – С. 2–7.
29. Сыроватка В.И. Развитие машинных технологий приготовления кормов в хозяйствах / В.И. Сыроватка, Ю.А. Иванов, Н.Д. Обухов // Инновационные процессы и технологии в животноводстве: исследования, испытания, внедрение. – Зерноград. – 2011. – С. 174–191.
30. Парамонова Т. Проблемы решать сообща / Т. Парамонова // Животноводство России. – 2009. – №2. – С. 12–14.
31. Кормановский Л.П. Машинные технологии – основа повышения производительности труда и снижения затрат / Л.П. Кормановский // Техника в сельском хозяйстве. – 1997. – №1. – С.3–5.

32. Коршунов А.П. Роль автоматизации в экономике сельскохозяйственного производства / А.П. Коршунов // Техника в сельском хозяйстве. – 1997. – №1. – С.5–8.
33. Иванов Ю.Н. Научное обеспечение инженерно-технической сферы животноводства / Ю.Н. Иванов // Разработка инновационных технологий и технических средств для АПК. – 2013. – С.13–27.
34. Курдюмов В.И. Тепловая обработка зерна при производстве кормов / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, И.Н. Зозуля и др. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2011. – №5. – С.17–18.
35. Каптура З.Ф. Интенсивные технологии приготовления кормов / З.Ф. Каптура, Ю.Д. Мороз, К.Ф. Терпиловский. – Минск: Ураджай, 1989. – 126 с.
36. Терпиловский К.Ф. Механизация процессов тепловой обработки кормов / К.Ф. Терпиловский. – Минск: Ураджай, 1973. – 127 с.
37. Кукта Г.М. Машины и оборудование для приготовления кормов / Г.М. Кукта. – Москва: Агропромиздат, 1987. – 302 с.
38. Венедиктов А.М. Кормление сельскохозяйственных животных: справочник / А.М. Венедиктов, П.И. Викторов, Н.В. Груздев и др. – Москва: Росагропромиздат, 1988. – 366 с.
39. Лобановский А.Г. Кормоцехи на фермах / Г.А. Лобановский. – Москва: Колос, 1971. – 310 с.
40. Севернев М.М. Энергосберегающие технологии в сельскохозяйственном производстве / М.М. Севернев. – Москва: Колос, 1992. – 198 с.
41. Резник Е.И. Кормоцехи на фермах / Е.И. Резник. – Москва: Россельхозиздат, 1980. – 179 с.
42. Троянов Н.Н. Механизация технологических процессов в животноводстве / Н.Н. Троянов. – Москва: Колос, 1992. – 139 с.
43. Klug, A. Energieeinsparung beim Dampfen von Futterkartoffeln. Wissz. Wilheim – Pleck – Universitat, Rostock, Math – naturwiss. Reihe. – 1979, Bd 28, – № 1. – S. 85-90.

44. Klug, A. Energieeinsparung bei der Aufbereitung von Futterkartoffeln / A. Klug, F. Haufe. – Tierzucht. – № 8, 1984. – S. 370-372.
45. Klug, A. Moglichkeiten zur Energieeinsparung und zur Steigerung der Arbeitsproduktivitat beim Dampfen von Futterkartoffeln / A. Klug, G. Gotzelt // Agrartechnik, 1981. – Bd 31, – № 11. – S. 502-503.
46. Bartosch, G. Neue Dampfmaschine F 407A / G. Bartosch // Agrartechnik (Berlin), 1986. – Bd 36, – № 3. – S. 122-123.
47. Яковлев А.И. Практическое руководство по применению интенсивных технологий производства свинины в Ростовской области / А.И. Яковлев, М.И. Лопатко, Ю.Г. Богомолов и др. – Ростов-на-Дону, 1991. – 76 с.
48. Егорченко М.И. Кормоцехи животноводческих ферм / М.И. Егорченко, Н.Г. Шамов. – Москва: Колос, 1983. – 175 с.
49. Рыженков В.Н. Перспективные технологии переработки вторичных сырьевых ресурсов для использования интенсивного производства продукции животноводства: сб. научн. трудов ВНИИМЖ. – Подольск, 1990. – С. 110–115.
50. Рыженков В.Н. Энергозатраты на обработку пищевых отходов / В.Н. Рыженков // Механизация приготовления и раздачи кормов на фермах: сб. науч. трудов ВНИИМЖ. – Подольск, 1987. – С. 71–77.
51. Найденко В.К. Модернизация кормоприготовительного цеха для переработки пищевых отходов / В.К. Найденко // Комплексная механизация животноводческих ферм: сб. науч. трудов ВНИИМЖ. – Подольск, 1985. – С. 79–85.
52. Денисов В.А. Энергоемкость процесса запаривания пищевых отходов / В.А. Денисов, М.П. Зыков // Исследование процессов комплексной механизации и автоматизации в свиноводстве: сб. науч. трудов ВНИИМЖ. – Подольск, 1988. – С. 17–19.
53. Роднов В.Ф. Рациональное технологическое решение кормоцехов с использованием пищевых отходов / В.Ф. Роднов, Н.И. Хамелин // Ком-

плексная механизация свиноферм: сб. науч. трудов ВНИИМЖ. – Подольск, 1985. – С. 14–27.

54. Шуть Ю.Е. О возможности применения СВЧ-поля для стерилизации пищевых отходов / Ю.Е. Шусь, Н.В. Синцов, В.Н. Удалов // Комплексная механизация свиноферм: сб. науч. трудов ВНИИМЖ. – Подольск, 1985. – С. 62–64.
55. http://www.par-ma.ru/parkotl.php.
56. http://propar.ru/catalog/sect/115.
57. http://www.par-ma.ru/trans-boiler.php.
58. Касумов Н.Э. Анализ структуры затрат на производство сельскохозяйственной продукции / Н.Э. Касумов, И.И. Светницкий // Техника и оборудование для села. – 2013. № 10. – С. 21-23.
59. Корольков В.Н. Повышение эффективности использования топливо-энергетических ресурсов в тепловых процессах / В.Н. Корольков и др. // Обзорная информация. – Москва: АгроНИИТЭИИТО, 1988. – 30 с.
60. Технологическое оборудование животноводческих ферм и комплексов // Каталог. – Москва, 1989. – 60 с.
61. Балашова Т.К. Экономия топливно-энергетических ресурсов на предприятиях АПК / Т.К. Балашова, Т.А. Казинникова // Обзорная информация. – Москва: Информагротех, 1990. – 32 с.
62. Горин Г.С. Экономия энергетических ресурсов в сельскохозяйственном производстве. Рекомендации. / Г.С. Горин. – Москва: Росагропромиздат, 1988. – 55 с.
63. Рыжов С.В. Экономия топливно-энергетических ресурсов на животноводческих фермах / С.В. Рыжов // Обзорная информация. – Москва: АгроНИИТЭИИТО, 1987. – 27 с.
64. Чепель В.М. Сжигание газов в топках котлов и печей и обслуживание газового хозяйства предприятий / В.М. Чепель, И.д. Шур. – Ленинград: Недра, 1989. – 591 с.

65. Делягин Г.Н. Теплогенерирующие установки / Г.Н. Делягин, В.Н. Лебедев, Б.А. Пермяков. – Москва: Стройиздат, 1986. – 559 с.
66. Швец И.Т. Общая теплотехника / И.Т. Швец. – Киев, 1963. – 563 с.
67. Марочкин В.К. Экономия топливно-энергетических ресурсов в сельском хозяйстве / В.К. Марочкин. – Минск: Ураджай, 1987.
68. Кнорре Г.Ф. Теория опочных процессов / Г.Ф. Кнорре, К.м. Арефьев, А.Г. Блох и др. – Москва: Энергия, 1966. – 491 с.
69. Гольдман В.П. Эффективная эксплуатация котельных установок – путь к сокращению затрат / В.П. Гольдман, Ф.А. Кривицкая // Сб. науч. трудов ВИЭСХ. – Москва, 1985. – т. 64. – С. 93-98.
70. Солдатов В.В. Микропроцессорная система оптимизации горения газов / В.В. Солдатов // Сб. науч. трудов ВИЭСХ. – Москва, 1989. – т. 73. – С. 95-101.
71. Горбачев В.С. Способы сбережения энергии в тепловых процессах животноводства / В.С. Горбачев // Сб. науч. тр. ВИЭСХ. – Москва, 1985. – т. 64. – С. 87-92.
72. Морозов Н.М. Технический прогресс и направления исследований по комплексной механизации и автоматизации животноводства / Н.М. Морозов // Механизация приготовления и раздачи кормов на фермах / Сб. науч. тр. – Подольск, 1987. – С. 4-16.
73. Левин Р.Е. Теплотехника / Р.Е. Левин. – Москва: Металлургиздат, 1951. – 434 с.
74. Вороной Н.С. Анализ тепловых потерь при влаготермической обработке кормов и пути их снижения / Н.С. Вороной, Н.В. Ксенз, А.М. Семенихин, Т.Н. Толстоухова // Научно-технический прогресс в инженерной сфере АПК: Матер. науч. конф. РФ РИАМА. – Зерноград, 1999. – С.83-85.
75. Белехов И.П. Механизация и электрификация животноводства / И.П. Белехов, А.С. Четкин. – Москва: Колос, 1984. – 400 с.
76. Халюткин В.А. Энергосберегающая технология подготовки грубых кормов к скармливанию / В.А. Халюткин, А.К. Болотова // Энергосберегаю-

щая технология в кормоприготовлении. Сб. науч. тр. – Ставрополь, 1988. – С.24-28.

77. Рыженков В.Н. Энергоемкость обработки пищевых отходов паром / В.Н. Рыженков // Исследование процессов комплексной механизации и автоматизации в свиноводстве. Сб. науч. тр. – Подольск, 1988. – С.71-78.
78. Денисов В.А. Ресурсо- и энергосберегающая технологическая линия тепловой обработки кормов / В.А. Денисов // Средства механизации и автоматизации процессов свиноводческих ферм. Сб. науч. тр. – Подольск, 1990. – С.82-90.
79. Кулагин П.В. Сжигание жидких и тяжелых топлив / П.В. Кулагин, С.С. Охотников. – Москва: Недра, 1967. – 280 с.
80. Канторович Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива / Б.В. Канторович. – Москва: Академия наук СССР, 1958. – 598 с.
81. Щетинков Е.С. Физика горения газов / Е.С. Щетинков. – Москва: Наука, 1965. – 740 с.
82. Степанов Е.М. Ионизация в пламени и электрическое поле / Е.М. Степанов, В.Г. Дьячков. – Москва: Металлургия, 1968. – 310 с.
83. Ревзин И.С. Влияние электрического поля на пленкообразование при распылении топлив в воздушном потоке / И.С. Ревзин // Электронная обработка материалов, 1978. – № 5. – с. 38-41.
84. Ревзин И.С. Основные предпосылки использования электростатических полей в двигателях внутреннего сгорания / И.С. Ревзин // Электронная обработка материалов, 1978. – № 6. – с. 22-25.
85. Пурмал М.Я. Горение пропана в электрическом поле / М.Я. Пурмал // Электронная обработка материалов, 1981. – № 2. – с. 53-54.
86. Пурмал М.Я. Обработка подводимого для горения воздуха коронным разрядом / М.Я. Пурмал // Электронная обработка материалов, 1988. – № 4. – с. 32-34.
87. Пурмал М.Я. Применение ионизированного воздуха для интенсификации горения / М.Я. Пурмал // Энергетика, 1981. – № 4. – с. 110-112.

88. Пурмал М.Я. Применение электрических полей для интенсификации горения / М.Я. Пурмал // Электронная обработка материалов, 1983. – № 6. – с. 42-43.
89. Асакава У. Физические методы интенсификации процессов горения / У. Асакава // Вопросы горения: Материалы VI и VII международных симпозиумов по горению. – Москва: Металлургиздат, 1963. – С. 419-427.
90. Asakava Y. Advance Copy of Research Meeting / Y. Asakava // Soc. Mech. Eng., June, November, 1954.
91. Максимов Ю.Я. Горение модельного состава топлива в электрическом поле / Ю.Я. Максимов, А.В. Христофоров, В.И. Качушкин и др. // Материалы IV Всероссийского семинара по электрофизике горения. – Караганда, 1981. – с. 68-71.
92. Ксенз Н.В. Теоретические и экспериментальные исследования сжигания топлива в неоднородных электрических полях / Н.В. Ксенз, Н.С. Вороной, Т.Н. Толстоухова // Новые технологии и технические средства для комплексной механизации животноводства. Сб. науч. тр. ВНИПТИМЭСХ. – Зерноград, 1998. – С. 187-189.
93. Карпов В.П. основы технической термодинамики / В.П. Карпов. – Москва: Машгиз, 1984. – 316 с.
94. Морозов Н.М. Методические положения определения эффективности механизации животноводства / Н.М. Морозов // Техника в сельском хозяйстве. – 1997. – № 6. – С. 3-7.
95. Нащекин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача / В.В. Нащекин. – Москва: Высшая школа, 1980. – 470 с.
96. Лунин О.Г. Теплообменные аппараты пищевых производств / О.Г. Лунин, В.Н. Вельтищев. – Москва: Агропромиздат, 1987. – 260 с.
97. Аминов М.С. Технологическое оборудование консервных и овощесушильных заводов / М.С. Аминов, М.С. Мурадов, Э.М. Аминова. – Москва: Колос, 1996. – 346 с.

98. Гусева Л.Г. Тепловое и электрическое оборудование предприятий общественного питания / Л.Г. Гусева. – Москва: Экономика, 1996. – 272 с.

99. Ахмедов Р.Б. Технология сжигания горючих газов и жидких топлив / Р.Б. Ахмедов, Л.М. Цирульников. – Ленинград: Недра, 1984. – 386 с.

100. Капцов Н.А. Электрические явления в газах и вакууме / Н.А. Капцов. – Москва-Ленинград: Издательство технико-теоретической литературы, 1951. – 586 с.

101. Салимов А.У. Вопросы теории электростатического распыливания и интенсификации процессов сгорания жидких топлив / А.У. Салимов, М.Т. Балабеков, А.М. Багдасаров. – Ташкент: Издательство ФАН, 1968. – 112 с.

102. Долгинов А.И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике / А.И. Долгинов. – Москва: Энергия, 1968. – 464 с.

103. Верещагин И.П. Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии / И.П. Верещагин. – Москва: Энергоатомиздат, 1985. – 159 с.

104. Семенов Н.Н. О цепных реакциях и теории горения / Н.Н. Семенов. – Москва: Знание, 1957. – 242 с.

105. Кондратьев В.Н. Химические процессы в газах / В.Н. Кондратьев, Е.Е. Никитин. – Москва: Наука, 1981. – 286 с.

106. Gallo C.F. Parametrie Study of Ozone Generation by Coronas JAS′75 Annual Mecting / C.F.Gallo. – Proceedings, 1975. – 589 p.

107. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Марков, Ю.В. Грановский. – Москва: Наука, 1976. – 176 с.

108. Сычевская И.Д. Планирование научного эксперимента. Обзорная информация / И.Д. Сычевская. – Москва: ЦНИИТЭИприборостроение, 1976. – 73 с.

109. Евдокимов Ю.А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю.А. Евдокимов, В.И. Колесников, А.И. Тетерин. – Москва: Наука, 1980. – 228 с.

110. Воробьев М.А. Нефтепродукты и оборудование нефтехозяйств / М.А. Воробьев, Ю.П. Серов, Е.М. Мещерин // Каталог ЦНИИТЭТ. – Москва, 1982. – 182 с.

111. Линчевский В.П. Топливо и его сжигание / В.П. Линчевский. – Москва: Металлургиздат, 1959. – 400 с.

112. Горбачев В.С. Использование жидкого топлива утяжеленного фракционного состава / В.С. Горбачев, Н.Е. Колобов, И.Г. Бондарева // Научно-технический бюллетень по электрификации сельского хозяйства / ВИЭСХ. Вып. 1 (56). – Москва, 1986.

113. Морозов А.И. Новый котел-парообразователь КВ-300У / А.И. Морозов, В.С. Хаблов // Техника в сельском хозяйстве. – 1987. – №5. – С.34-35.

114. Разумовский С.Д. Озон и его реакции с органическими соединениями / С.д. Разумовский, Г.Е. Замков. – Москва: Наука, 1974. – 322 с.

115. Ксенз Н.В. Электроозонирование воздушной среды / Н.В. Ксенз. – Зерноград: ПМГ ВНИПТИМЭСХ, 1991. – 172 с.

116. Шабанов Н.И. Разработка и создание электроозонированного оборудования для топочных устройств низкотемпературных сушилок / Н.И. Шабанов, Н.В. Ксенз, В.И. Пахомов и др. // Отчет о НИР 05.01. ОЗИ / ВНИПТИМЭСХ. – Зерноград, 1995. – 76 с.

117. Озонатор электрический топочный // Техническое описание и инструкция по эксплуатации / ВНИПТИМЭСХ. – Зерноград, 1994. – 28 с.

118. Вороной Н.С. Исследование влияния электроактивированного воздуха на интенсификацию процессов горения жидкого топлива /Н.С. Вороной, Н.В. Ксенз, Т.Н. Толстоухова // Механизация и электрификация производственных процессов в животноводстве. Сб. науч. тр. / ВНИПТИМЭСХ. – Зерноград, 1996. – С.131-136.

119. Драгин В.А. Разработка и исследование электроозонатора для повышения эффективности сжигания печного топлива в котельных АПК: диссертация на соискание ученой степени к.т.н. / В.А. Драгин. – Краснодар, 2000. – 144 с.

120. Толстой А.Ф. Микропроцессорная система оптимизации надежности и качества сжигания газа в котельных установках / А.Ф. Толстой, А.Н. Мамаев, Е.С. Алешина // Повышение надежности электрооборудования в сельском хозяйсьтве. – Москва, 1987. – С.41-47.

121. Большев Л.Н. Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – Москва: Наука, 1965. – 474 с.

122. Абрамов А.С. Топливо, топки и котельные установки / А.С. Абрамов, Б.И. Шайнин. – Москва: Министерство коммунального хозяйства РСФСР, 1953. – 248 с.

123. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработка опытных данных / Г.В. Веденяпин. – Москва: Колос, 1967. – 158 с.

124. Шищенко Р.И. Гидравлика промышленных жидкостей / Р.И. Шищенко, Б.И. Есьман, П.И. Кондратенко. – Москва: Недра, 1976. – 294 с.

125. Толстоухова Т.Н. Исследование влияния озонированного воздуха на интенсификацию нагрева корма в технологической машине и повышение производительности технологической линии / Т.Н. Толстоухова, Н.В. Ксенз, Н.С. Вороной // Энергоснабжение и энергосберегающие технологии в АПК. – Зерноград, 2003. – С.165-171.

126. Уваров В.В. Сельскохозяйственная теплоэнергетика и окружающая среда / В.В. Уваров, В.В. Жабо, М.П. Роганков. – Москва: Колос, 1984. – 128 с.

127. Борщов Д.Я. Защита окружающей среды при эксплуатации котлов малой мощности / Д.Я. Борщов, А.Н. Воликов. – Москва: Стройиздат, 1987. – 156 с.

128. Лавров Н.В. Процессы горения топлива и защита окружающей среды / Н.В. Лавров, Э.И. Розенфельд, Г.П. Хаустович. – Москва: Металлургиздат, 1981. – 240 с.

129. Скалкин Ф.В. Энергетика и окружающая среда / Ф.В. Скалкин, А.А. Канаев, И.З. Кропп. – Ленинград: Энергоиздат, 1981. – 280 с.

130. Бокач Тибор. Охрана окружающей среды / Бокач Тибор. – Москва: Медицина, 1980. – 516 с.

131. Сигал И.Я. Образование окислов азота при сжигании топлива / И.Я. Сигал // Окислы азота в продуктах сгорания топлива. – Киев: Наукова думка, 1981. – С.3-16.

132. Толстоухова Т.Н. Исследование влияния озонированного воздуха на снижение вредных выбросов в атмосферу / Т.Н. Толстоухова // Энергоснабжение и энергосберегающие технологии в АПК. – Зерноград, 2003. – С.69-72.

133. Карабин А.И. Сжигание жидкого топлива в промышленных установках / А.И. Карабин. – Москва: Металлургиздат, 1957. – 260 с.

134. Толстоухова Т.Н. Совершенствование процесса тепловой обработки кормов в аппаратах периодического действия за счет использования озонированного воздуха: диссертация / Т.Н. Толстоухова. – Зерноград, 2001. – 211 с.