

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ:
ЗАДАЧИ, ПРОБЛЕМЫ, РЕШЕНИЯ**

**СБОРНИК ТРУДОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ
(С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ)
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
НАУЧНЫХ, НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ,
АСПИРАНТОВ И СТУДЕНТОВ**

Челябинск
2017

УДК 62

ББК 31.2

С 56

Современные технологии в электроэнергетике и электротехнике: задачи, проблемы, решения: сборник трудов Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов / [науч. ред. А.Г. Савиновских]. – Челябинск: Полиграф-Мастер, 2017 – 101 с.

Научный редактор – заведующий кафедрой «Транспорт и электроэнергетика» ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики», кандидат технических наук, доцент, Савиновских А.Г.

Редактор-корректор – специалист редакционно-издательского отдела ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики» Фролова К.М.

В сборник включены статьи участников Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов, состоявшейся в г. Челябинске 22 ноября 2017 г.

ISBN 978-5-9909865-8-9

© ОУ ВО «Южно-Уральский институт
управления и экономики», 2017

© Коллектив авторов, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

М.М. Лукьянов, Н.В. Куркула. Информационная модель изоляции силовых трансформаторов для цифровых подстанций	4
М.М. Лукьянов, В.В. Козионов. Анализ показателей качества трансформаторного масла	7
В.Е. Репников, И.Д. Загустина. «Птичьи» загрязнения изоляции воздушных линий	11
В.В. Скутарь, И.Д. Загустина. Ограничение воздействия воздушных линий электропередачи на окружающую среду	13
А.В. Трофимов, И.Д. Загустина. Использование неизолированных проводов ВЛ с нестандартными формами проволок в токоведущей части. провод AERO-Z	15
А.В. Дробов. Применение имитационного моделирования систем электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта	19
К.В. Киреев. Особенности реализации инвестиционных проектов в электроэнергетике	27
А.Г. Савиновских, Ю.П. Ильин, Н.Ю. Кузьмина, Д.А. Новикова, Н.В. Рудных. Уточнение математической модели влияния температуры на устойчивость режима переработки субстрата в БГУ	33
Т.Е. Гаранина, И.Д. Загустина. Мониторинг линий электропередач	59
В.Ю. Авдеева, И.Д. Загустина. Проблемы и оптимизации потерь электроэнергии в системах электропотребления	61
Р.В. Банин, В.В. Селунский, М.Р. Атабаев. Применение электростатической копильной установки в полевых условиях	63
Р.В. Банин, В.В. Селунский, А.В. Тихонов. Исследование электростатического процесса копчения продуктов	70
В.А. Афонькина, К.Д. Долгополов. Разработка технологии инфракрасной сушки жидких биологически активных добавок и оценка ее прикладной значимости для Челябинской области	76
Е.Н. Епишков. Теоретическая оптимизация параметров плёночного лучистого электронагревателя как источника равномерного потока излучения	86
В.Е. Юрин. Вероятностный анализ системы резервирования собственных нужд АЭС на основе ГТУ с учетом нестационарных процессов	94

ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

*М.М. Лукьянов – к.т.н., доцент ОУ ВО «Южно-Уральский институт
управления и экономики»*

Н.В. Куркула - студент ОУ ВО «ЮУИУиЭ»

Аннотация

В статье проведен краткий анализ видов, последствий и критичности отказов главной изоляции маслонаполненного высоковольтного электрооборудования. Разработана информационная модель видов, последствий и критичности отказов и неисправности главной изоляции силовых трансформаторов на основе современных представлений о надежности в технике.

Эффективность использования маслонаполненного высоковольтного электрооборудования (МВВЭО) зависит от сочетания готовности и возможности, т.е. способности электрооборудования при функционировании соответствовать своему назначению (удовлетворять запросам) с заданными количественными характеристиками при данном внутреннем состоянии. В то же время внутреннее состояние может быть сочетанием работоспособных и неработоспособных составных частей.

С этой целью необходимо провести анализ видов, последствий и критичности отказов и неисправности главной изоляции, основанный на качественном методе исследования возможных видов отказов и неисправностей и их влияния на техническое состояние МВВЭО на основе¹.

В производственной эксплуатации МВВЭО в общем случае все составные его части находятся в состоянии выполнения требуемых функций, т. е. функционируют, и идет наработка ресурса. С течением календарного времени накапливаются ухудшения функционирования изоляции. Происходит ее старение, а также ухудшения, накапливающиеся с течением времени под воздействием прилагаемых нагрузок – изнашивание, которые могут привести при определенных (причинах) обстоятельствах к физическим процессам (механизму), которые приведут к потере или частичной потере способности изоляции выполнять свои функции – к (событию) отказу или частичному отказу, который выразится в неполной способности выполнять функцию диэлектрика – в повреждении. Однако изоляция будет

¹ ГОСТ Р 27.002-2009. Надёжность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2010.

функционировать частично, т. е. останется работоспособной. Такое состояние определяется по заранее оговоренному признаку, критерию, нарушения исправного состояния, по которому принимается решение об отказе.

Дальнейшие, необратимые изменения, ухудшающие способность изоляции выполнять требуемую функцию, развивающиеся с течением времени - деградация приводит к предельному состоянию, когда дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна по причине опасности или критическому состоянию, когда состояние изоляции может привести к тяжелым последствиям: травмированию людей или значительному материальному ущербу.

Информационная модель видов, последствий и критичности отказов и неисправности главной изоляции представлена на рисунке 1.

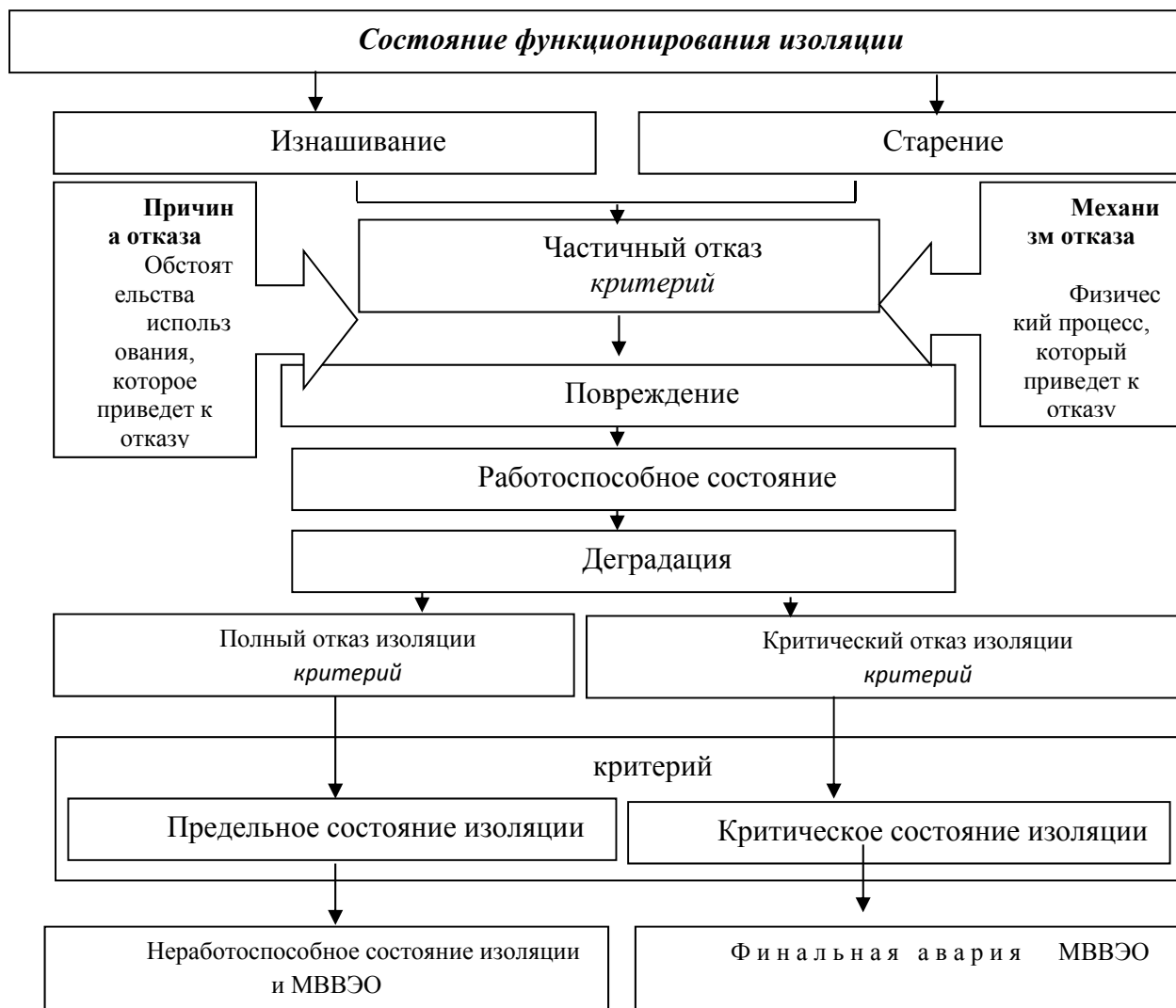


Рисунок 1. Информационная модель видов, последствий и критичности отказов и неисправности главной изоляции

Информационная модель изоляции описывает процесс контроля и анализ ее состояния, она служит каркасом для описания того, когда и где необходимы те или иные данные и информация.

Возможные функциональные режимы отказов, представленные в информационной модели жидкой изоляции силовых трансформаторов высоковольтных электрических сетей, позволяют определять потребности и решения в области контроля, которые можно легко интегрировать и в существующие, и в будущие системы контроля цифровых подстанций.

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

М.М. Лукьянов – к.т.н., доцент ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

В.В. Козионов – студент ОУ ВО «ЮУИУиЭ»

Аннотация

В статье рассматривается качество трансформаторной жидкости и вариант систематизации, номенклатуры показателей качества трансформаторного масла. Делается вывод о том, что в процессе эксплуатации в действующем электрооборудовании жидкая изоляция изнашивается, и ее свойства меняются, существующие признаки не всегда адекватно отражают ее техническое состояние.

В целях квалиметрического подхода к измерению качества изоляции силового маслонаполненного электрооборудования, необходимо систематизировать категории и понятия, связанные со свойством, признаком, параметром и показателем качества, как показано на рисунке 1.

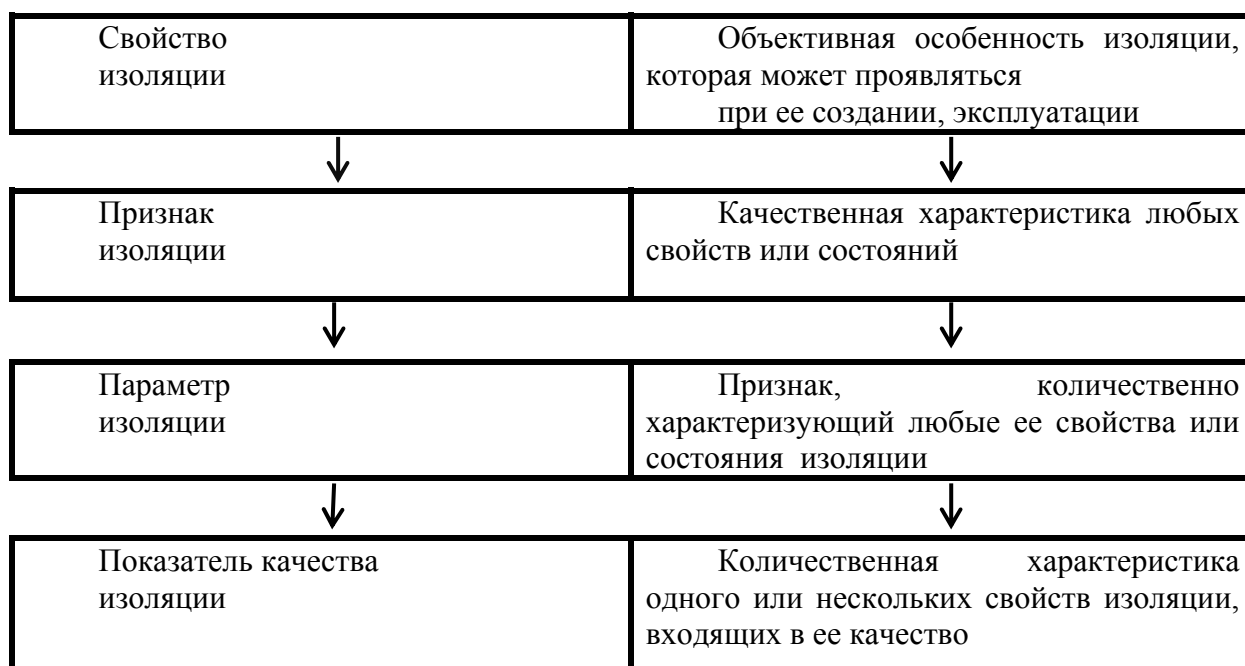


Рисунок 1. Структурная схема свойств и показателей качества изоляции

Свойства трансформаторного масла описываются показателями качества, которые делятся на группы:

1. Показатели назначения – характеризуют те свойства, ради которых материалы (изделия) и создаются, а именно конструкцию объекта, его техническое совершенство, состав, структуру.

2. Показатели безопасности – характеризуют особенность продукции обеспечивать безопасность обслуживающего персонала при эксплуатации, хранении, транспортировании.

3. Показатели надежности – характеризуют свойства объекта выполнять заданные функции, сохраняя свои показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени.

4. Показатели технологичности – характеризуют эффективность конструкторско-технологических решений для обеспечения высокой производительности труда при создании и восстановлении объекта.

5. Показатели транспортабельности – характеризуют приспособленность продукции к транспортированию без ее использования и потребления.

6. Эргономические показатели – характеризует общую степень удобства объекта.

7. Эстетические показатели – характеризуют художественность, выразительность и оригинальность формы объекта, соответствие формы среде и стилю, цветовое и декоративное решение, художественное решение упаковки.

8. Экономические показатели – себестоимость, рентабельность производства.

Таким образом, трансформаторное масло обладает свойствами, которые позволяют ему выполнять функции диэлектрика и охлаждения основных узлов силового высоковольтного маслонаполненного электрооборудования. Эти свойства описываются показателями его качества, приведенными в таблице.

Вариант, систематизации номенклатуры показателей качества трансформаторного масла из¹ предложен в таблице.

Однако во время работы силового высоковольтного масляного трансформатора его изоляция подвергается длительному воздействию электрического поля, высокой температуры и механическому воздействию.

¹ РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. – Департамента научно-технической политики и развития РАО «ЕЭС России», 1997. – 152 с.

Одной из причин изменения состояния изоляции вплоть до непригодной для предусмотренных условий эксплуатации сегодня считается кавитационный механизм износа

Таблица 1 – Вариант систематизации показателей качества трансформаторного масла

Наименование показателя качества	Наименование характеризующего свойства
1. Показатели назначения	
1.1 Электрическая изоляция	
1.1.1 Электрическая прочность (пробивное напряжение), кВ	Изоляция
1.1.2 Тангенс угла диэлектрических потерь %	Изоляция
1.2 Теплопроводность	
1.2.1 Кинематическая вязкость, мм ² /с	Теплообмен, сопротивление внутреннему трению
1.2.2 Плотность, кг/м ³	То же
2 Показатели безопасности	
2.1 Температура вспышки, °С	Пожаро-, взрывоопасность
2.2 Температура самовоспламенения, °С	То же
2.3 Класс токсичности	Безопасность
2.4 Предельно-допустимая концентрация паров масла в воздухе, %	Воздействие на организм человека
3 Показатели надежности*	
3.1 Показатели долговечности и сохраняемости	
3.1.1 Газосодержание, (% до наступления восстановительных работ)	Срок службы
3.1.2 Водорастворимые кислоты и щелочи, (% до наступления предельного состояния)	То же
3.1.3 Массовая доля воды, (% до наступления предельного состояния)	То же
3.1.4 Зольность, (% до наступления предельного состояния)	То же
3.1.5 Цвет на калориметре ЦНТ, единицы ЦНТ	То же
3.1.6 Содержание серы, %	То же
3.1.7 Массовая доля механических примесей, (% до наступления предельного состояния)	То же
3.1.8 Стабильность против окисления, мг КОН на 1г масла,	То же
3.1.9 Прозрачность, при 5 °С	То же
3.1.10 Натровая проба, оптическая плотность, баллы	То же
3.1.11 Содержание ионола (АГИДОЛ-1), %	То же

Продолжение таблицы 1

3.1.12 Испытание коррозионного воздействия на пластинки меди	То же
4 Показатели технологичности	
4.1 Смешивание	Допустимость смешивания
4.2 Температура застывания, °С	Изменение агрегатного состояния
5 Показатели транспортабельности	
5.1 Объем средств транспортирования и тары	Приспособлено к транспортированию, транспортируется партиями
6 Эргономические показатели	
6.1 Дозирование по весу, кг	Возможность разливать в любую тару
7 Экономические показатели	
7.1 Лимитная цена, руб.	-

В последнее время отечественными учеными выявлены, и показаны в научных работах¹²³⁴⁵ эти механизмы износа изоляции в маслonaполненном электрооборудовании.

Трансформаторное масло с микронеоднородностями изменяет свои свойства, в том числе и диэлектрические. Для измерения такого технического состояния жидкой изоляции необходимо разрабатывать и измерять новые показатели ее качества. Исследовать свойства трансформаторной изолирующей жидкости и изучать признаки, описывать их достоверными параметрами.

¹ Дарьян Л.А. Исследование механизма повреждения внутренней изоляции трансформаторов тока с «газовой подушкой» // Электрические станции – 2008. – № 5. – С. 42–49.

² Дарьян Л.А. Кавитационный механизм старения маслопропитанной изоляции конденсаторного типа при переменном напряжении // Научный вестник НГТУ. – 2007. – № 2.

³ Маргулис М.А. Электрические явления в многопузырьковых кавитационных полях // Физическая химия. – 2007. – Т.81. – № 7. – С. 1334–1338.

⁴ Коробейников С.М. Электрофизические процессы в газообразных жидких и твердых диэлектриках. Процессы в жидкостях. – Новосибирск: Изд. НГТУ, 2010. 116 с.

⁵ Коробейников С.М. Поведение пузырьков в жидкостях под действием сильных электрических полей и зажигание разряда с их помощью. // Теплофизика высоких температур. – 2002. – Т. 40. – № 5.

«ПТИЧЬИ» ЗАГРЯЗНЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

В.Е. Репников – ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет», Институт электроэнергетики и электроники

И.Д. Загустина – старший преподаватель ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет»

Аннотация

В данной статье рассматриваются основные причины загрязнения птицами изоляции воздушных линий электропередач, а также предлагаются способы защиты ВЛ.

В использовании воздушных линий электропередачи имеются проблемы природного и техногенного характера. Прежде всего, это грозовые отключения воздушных линий и перекрытия изолирующих подвесок проводов при загрязнении поверхности изоляторов. Еще одной нестандартной проблемой отключений ВЛ является загрязнение изоляции птичьим помётом.

Птицы оказывают влияние на стабильность работы оборудования электрических сетей и нередко становятся причинами отключений, главными из которых являются: загрязнение изоляции пометом, набросы проволоки и других предметов. Птицы загрязняют электрооборудование, что снижает изоляционную прочность и вызывает перекрытия при повышении влажности (при мороси, тумане, росе). На деревянных опорах загрязнения экскрементами часто приводят к возгоранию от токов утечки траверс и самих опор. Из-за всевозрастающих требований к качеству электроэнергии даже небольшие перебои приводят к ощутимым потерям – экономическим (недополучение прибыли), социальным и моральным (социальное недовольство).

Для защиты изоляций высоковольтных линий от птичьего помёта могут быть использованы следующие меры:

1. Установка специального устройства, которое исключают возможность перекрытий, а также отпугивает птиц и не в коем случае не угрожает их жизни¹.

2. Конструкции разъемных «зонтиков», которые устанавливаются над верхним изолятором гирлянды. Они должны защищать гирлянду от птичьих

¹ Пименов П.В. Исследование работы высоковольтной изоляции в условиях атмосферных увлажнений. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Новосибирск, 1989. 168 с

загрязнений, так же они эффективны для предотвращения перекрытия по струе помета. Сочетание «мягких ежей» и «зонтиков» над гирляндой считается одним из наиболее эффективных способов для предотвращения «птичьих» отключений ВЛ. Кроме того, одна из китайских компаний начала производить полимерные изоляторы с диаметром верхнего ребра 450 мм. Верхнее ребро выполняет функции «зонтика», защищающего оболочку изолятора от дождя и птичьих загрязнений².

3. Установка на балках макетов хищных птиц, световых, звуковых отпугивателей, различных металлических ежей.

Наиболее эффективными против гнездования оказались устройства, создающие в ночное время яркие световые вспышки: птицы к ним не могут привыкнуть³.

В Великобритании был сконструирован робот, способный перемещаться по проводам с помощью электромагнитной индукции и оснащенный стробоскопическими лампами и шумовыми приспособлениями, созданными специально для отпугивания птиц.

В настоящее время проблема загрязнения изоляции высоковольтных линий электропередач птичьим помётом бесспорно значима. Существует множество способов борьбы с этой проблемой, создаются новые различные приборы и приспособления, с помощью которых, осуществляется гарантируемая защита ВЛ от птичьего фактора, причем жизни птиц ничего не угрожает.

² Мелюхов В.А. Опыт эксплуатации воздушных линий электропередачи на железобетонных опорах // Энергетик. – 1983. – № 10. – С. 21–23.

³ Там же.

ОГРАНИЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

В.В. Скутарь – студент ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет», Институт электроэнергетики и электроники

И.Д. Загустина – старший преподаватель ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет»

Аннотация

В данной статье рассматриваются основные виды воздействия воздушных высоковольтных линий электропередачи на окружающую среду, а также предлагаются способы ограничения негативного влияния на экологию и окружающую среду.

Развитие электроэнергетики влечет за собой увеличение длины высоковольтных воздушных линий электропередачи, тем самым увеличивается антропогенное влияние на окружающую среду. Воздействие линий электропередач на окружающую среду является актуальной проблемой на сегодняшнем этапе развития электроэнергетического комплекса.

Влияние высоковольтных ВЛЭП можно разделить на механическое и электромагнитное, также учитывают: повышение концентрации озона и окислов азота, радио и телевизионные помехи, акустический шум, эстетическое воздействие.

Для ограничения механического влияния линий (отчуждение земель под трассами линий) могут быть использованы следующие меры:

Совершенствование конструкций опор линий электропередачи с целью уменьшения площади отчуждения под опорами и трассами воздушных линий. Для этого возможно применение компактных линий, взамен классических (сокращение расстояния между фазами проводов до минимально необходимых для ограничения межфазных перенапряжений и электромагнитных влияний проводников)¹.

Применение многоцепных линий электропередачи, с целью ограничения числа опор и трасс, а как следствие и площади, занимаемых ими.

¹ Поспелова Т. Г. Некоторые результаты исследования экологического воздействия линии электропередачи сверхвысокого напряжения / Энергетика и транспорт. – 1988 – № 4 – С 149–157

Одним из способов ограничения электромагнитного влияния на человека является применение растительного массива. Экспериментально доказано, что при расстоянии между деревьями 8 м и высоте деревьев 4–5 м напряженность электрического поля в промежутке между деревьями на уровне роста человека для воздушных линий более 1000 кВ составляет 5–8 кВ/м, что значительно уменьшает напряженность электрического поля².

Для снижения акустического шума, вызываемого коронированием проводов высоковольтных линий электропередачи требуется корректировка параметров проводов фазы и их расположения относительно друг друга. Также необходимо уменьшить степень повреждения проводов при монтаже и транспортировке, которая влияет на эффект короны и радиопомехиз.

Визуально-эстетическое восприятие ВЛЭП в густонаселенных районах, национальных парках, курортах и районах с высокой ценностью ландшафта можно улучшить с помощью: окраски опор светопоглощающими красками (избавление от нежелательного металлического блеска), применения новых оригинальных и эстетически приятных форм конструкций опор.

Влияние высоковольтных воздушных линий электропередачи на окружающую среду и экологию многопланово. Существует множество способов ограничения негативного воздействия на экологию в целом, так и на человека в частности. Проектирование новых электроэнергетических сетей, линий в частности, должно основываться на принципах экологической безопасности, с целью уменьшения негативного влияния на окружающую среду.

² В.И. Чехов Экологические аспекты передачи электроэнергии.. – М.: Изд-во МЭИ, 1991. 44 с.

³ Дикань В.Л., Дейнека А.Г., Позднякова Л.А., Михайлов И.Д., Каграманян А.А. Основы экологии и природопользования. Учебное пособие –Харьков: ООО «Олант», 2002. 384 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕИЗОЛИРОВАННЫХ ПРОВОДОВ ВЛ С НЕСТАНДАРТНЫМИ ФОРМАМИ ПРОВОЛОК В ТОКОВЕДУЩЕЙ ЧАСТИ. ПРОВОД AERO-Z

А.В. Трофимов – ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет», Институт электроэнергетики и электроники

И.Д. Загустина – старший преподаватель ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет»

Аннотация

В данной статье рассматриваются особенности использования неизолированных проводов ВЛ с нестандартными формами проволок в токоведущей части провода и их преимущества

Технология сооружения современных высоковольтных линий электропередач (ЛЭП). Энерго-эксплуатирующие компании применяют новые идеи, с целью обеспечения постоянно растущего потребления электроэнергии. Увеличение передающей способности уже имеющихся линий, увеличение срока службы проводов при климатических воздействиях, с помощью применения неизолированных проводов с нестандартными формами проволок в токоведущей части провода.

Существует несколько проблем в Российских ЛЭП которые можно решить за счет использования новых конструкций фазных проводов. Это увеличение пропускной способности уже сооруженных, но относительно старых и сильно переплетенных ЛЭП при сложности получения разрешений на возведения новых воздушных линий (ВЛ), необходимых для удовлетворения растущих потребностей в электроэнергии. Другая проблема: Увеличения срока службы проводов при воздействии на них климатический условий таких как ветер (качание, пляска), обледенения проводов, следствием которых, при использования марки АС, является необратимая деформация (вытяжка), часть жил рвется, а сталь, выполняющая армирующую функцию, перегревается и может перегореть¹.

¹ Алексеев Б.А. Повышение пропускной способности воздушных линий электропередачи и применение проводов новых марок // ЭЛЕКТРО. – 2009. – №3. – С.45 –50.

Все преимущества провода AERO-Z вытекают из особой конструкции жил провода и использования специального алюминиевого сплава. Если в проводе марки АС жилы имеют круглое сечение (рис 1 а), то в проводе AERO-Z они имеют Z-образное или прямоугольное строение (рис 2 б).

Рассмотрим подробнее строение данного провода. Конструкция провода подобна обычному проводу типа АС, отличие в том, что проволоки могут быть изготовлены не только из стали, но и из алюминиевых сплавов. Внутри нескольких проводников помещают оптические волокна.

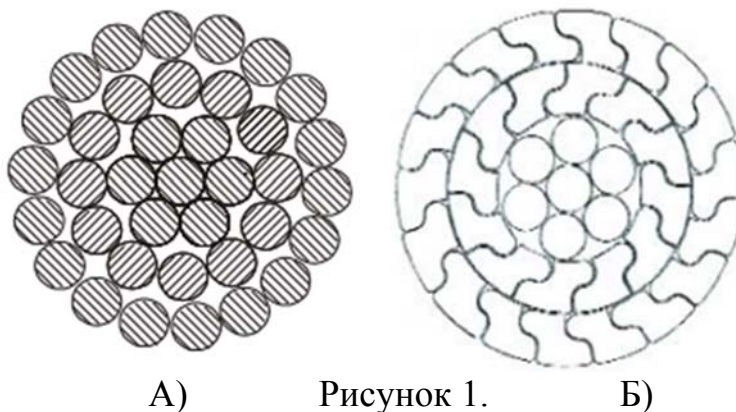


Рисунок 1.
Провод AERO-Z

Это строение дает проводу следующие преимущества:

Использование проводов с большим сечением при том же удельном весе позволяет решить проблемы перегрузок ВЛ и снижению тепловых потерь при передаче электроэнергии.

Снижение пляски проводов.

Снижение аэродинамического коэффициента.

Предотвращение внутренней коррозии провода.

Снижение вероятности обрыва провода при нанесении ему повреждений в результате климатических воздействий.

Снижение уровня шума, следовательно, улучшение эксплуатационных показателей в населенных районах.

Снижение уровня усталости металла в проводе и, следовательно, увеличение жизненного цикла за счет самогашения колебаний².

² Тимашова Л.В., Мерзляков А.С., Назаров И.А. Повышение пропускной способности и надежности передачи электроэнергии при использовании на ВЛ проводов нового поколения // Энергоэксперт. – 2013. – №3. – С. 64–68.

За счет более высокой жесткостью при кручении чем традиционные провода, AERO-Z лучше противостоит наледи и налипанию снега. Образование наледи становится затруднительным, средняя масса ледяных наростов в два раза меньше. Наросты отделяются в два раза быстрее. Характер налипания снега на разные конструкции проводов изображены на рисунках 2 и 3.

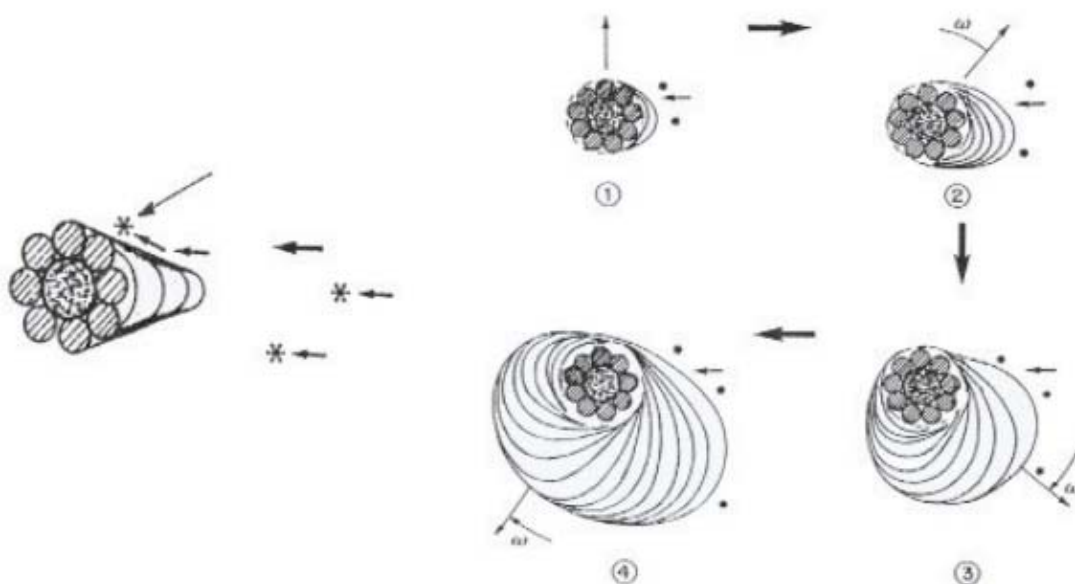


Рисунок 2. Провод типа АС

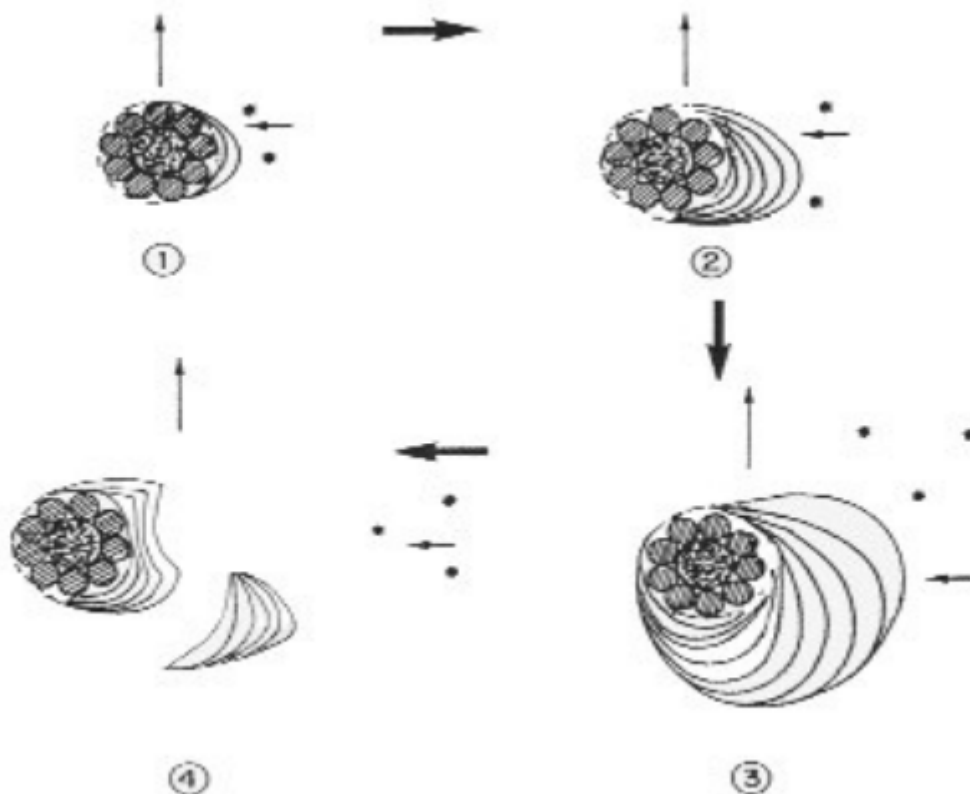


Рисунок 3. Провод AERO-Z

Стоимость провода AERO-Z в пять-шесть раз дороже обычного провода марки АС. Чувствительность к перегреву, не допускается эксплуатировать свыше 85°C.

Неизолированные провода ВЛ нестандартного формами сечения проволок в токоведущей части провода имеют превосходящие или эквивалентные рабочие характеристики по сравнению с традиционными проводами с круглыми проволоками в отношении электрических и тепловых параметров³.

При одинаковой скорости ветра по сравнению с традиционными проводами коэффициент аэродинамического сопротивления снижается.

Механическая прочность выше, стойкость к ветровым нагрузкам выше, в худшем эквивалента. Усталостная прочность и удлинение эквиваленты.

Провода менее подвержены обледенению. Основное препятствие в использовании проводов AERO-Z - высокая стоимость.

³ Непомнящий В.А. Оценка эффективности использования в электрических сетях проводов с повышенной пропускной способностью // Энергоэксперт. – 2011. – №3, – С. 38–44.

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НЕТЯГОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

А.В. Дробов – УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель

Аннотация

Для электрических сетей железнодорожных узлов дистанций электроснабжения разработан метод автоматического поиска рационального варианта электрических связей между трансформаторными подстанциями и распределительными устройствами с наименьшими приведенными затратами. Изменение схем питания узлов с целью их оптимизации позволяет снизить потери энергии без дополнительных затрат на модернизацию сети.

Любая система электроснабжения представляет собой совокупность из m источников питания и n потребителей, произвольно соединенных между собой. Чаще всего для схемы соединения потребителей с источниками не характерна наивысшая из возможных вероятность безотказной работы и минимальное время восстановления повреждения. Поэтому при проектировании новых систем электроснабжения актуальна задача выбора такой схемы соединения, параметры которой минимизируют экономические потери от неплановых отказов, отличаются наивысшей вероятностью безотказной работы электроснабжения и обеспечивают требуемое техническими параметрами качество энергии.

Поставленная таким образом задача является типичной задачей математического программирования и может быть решена одним из методов поиска экстремальных значений целевой функции. В качестве такого метода можно предложить метод случайного поиска.

Для определения наиболее эффективных вариантов схем электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта разработаны имитационные модели (ИМ), учитывающие приведенные затраты, надежность и качество электроэнергии.

Целью создания ИМ для электрических сетей железнодорожных узлов дистанций электроснабжения с помощью метода статистических испытаний или метода Монте-Карло на основании матрицы возможных электрических связей между трансформаторными подстанциями является определение

рационального варианта электрических связей между трансформаторными подстанциями и распределительными устройствами (источниками питания и потребителями).

Имитационная модель системы электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта

Имитационное моделирование электрических сетей железнодорожных узлов реализовано в виде web-приложения, которое не требует установки на компьютер заказчика объемного программного обеспечения. Его обновление происходит автоматически, при этом обеспечивается высокая мобильность приложения везде, где есть доступ в интернет. Алгоритм ИМ предписывает последовательно выполнить ряд действий:

Внесение исходных данных. На этом этапе вносятся три параметра:

– координаты точек расположения источника питания (ИП), распределительных устройств трансформаторных подстанций (РУ) и трансформаторных подстанций (ТП) ($x_i, y_i, i = \overline{1, n}$);

– сведения о всех ТП: номер или название ТП; P_p – расчетная активная нагрузка потребителя; $\cos\varphi_p$ – расчетный коэффициент мощности; категории потребителей; T_M – число часов использования максимума нагрузки в год; $U_{ном}$ – напряжение первичной обмотки трансформаторов; k_ϕ – коэффициент формы графика нагрузки участка сети. По умолчанию программа продолжает названия ТП, присваивая подстанции номер $i+1$, при этом возможно редактирование.

В приложении также реализован расчет для существующей сети, не предполагающий капитальные затраты на сооружение сети ($K = 0$).

Имитационное моделирование позволяет осуществить визуализацию расположения всех объектов с нанесением координатной сетки, масштабирование координатной сетки до размера окна, также выполняется масштабирование изображения ИП, РУ и ТП.

На рисунке 1 представлена реализация однолинейной упрощенной схемы электросети для фидера № 502 от ПС «Мясокомбинат» Витебской дистанции электроснабжения¹.

¹ Дробов, А.В. Результаты программы имитационного моделирования нетяговой системы электроснабжения витебской и барановичской дистанции электроснабжения // Агротехника и энергообеспечение. 2016. – № 4 (13) том 1. – С. 76–83.

Внесите исходные данные

Число генерируемых результатов	Число лучших результатов
1000	1

☒ Учитывать капитальные затраты на строительство

Координаты источника питания

X	Y
0	0

Параметры потребителей

№	Название P _p , кВт	T _м , ч cos φ _p	К-во T-ов U _{ном} , кВ	X Y	
1	Витебск-Заболотинка	6178,956	1 ▼	145	
	42,29	0,833958	10 ▼	214	
2	ГКТП-19	5425,727	1 ▼	154	
	4,658	0,9496	10 ▼	203	
3	ТП-17(СШ1)	5426,286	1 ▼	208	
	99,244	0,9496	10 ▼	158	

Рисунок 1. Пример внесения исходных данных и визуализации в программе ИМ УЗЛОВ

Отображение и заполнение матрицы связи между ТП и РУ. Данная процедура позволяет сформировать матрицу всех возможных соединений между ТП и РУ с учетом ограничений (рисунок 2) для генерирования различных вариантов методом статистических испытаний. Главная диагональ не используется, а выбор ТП или РУ разыгрывается с помощью генератора

случайных чисел. Данную матрицу легко редактировать, активируя или убирая соответствующие символы связей между ТП или РУ.

Web-приложение дает возможность рассчитать кратчайшие расстояния между всеми объектами по формуле $l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$, а также с помощью редактора изменять расстояния в соответствии с существующими ограничениями. При необходимости определения кратчайшего расстояния между объектами с учетом ограничений на местности используется дополнительная программа *LOGR*.

ТП	Витебск-Заболотинка	ГКТП-19	ТП-17(СШ1)	ГКТП-22	ТП-16	ТП-11	ТП-10(Т1)	ТП-10(Т2)	ТП-6(СШ2)
ИП	258,5	254,8	261,2	247,42	117,46	120,28	310,34	316,74	366,9
Витебск-Заболотинка									
	0	14,21	84,29	11,18	146,41	143,78	88,46	93,13	175,76
ГКТП-19									
	14,21	0	70,29	14,04	140,55	137,83	79,03	84,21	165,22
ТП-17(СШ1)									
	84,29	70,29	0	82,1	144,8	142,04	53,24	59,17	112,81

Рисунок 2. Пример заполнения матрицы связи между ТП

Следующий шаг – выбор трансформаторов ТП и нагрузки на высокой стороне. В первую очередь осуществляется выбор номинальной мощности трансформаторов на основании следующих условий:

- для однотрансформаторных подстанций: $S_{нт} \geq S_p, S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}$
- для двухтрансформаторных подстанций: $2S_{нт} \geq S_p, 1,4S_{нт} = S_p - S_{откл}$,

($S_{откл}$ – мощность потребителей III категории, которые могут быть отключены при возникновении аварийного режима).

Таблицы стандартных полных мощностей трансформаторов соответствуют номенклатуре выпускаемых и имеющихся в технологическом запасе отделений дистанций электроснабжения. При необходимости можно изменить значение номинальной мощности трансформатора в таблице текущих результатов расчетов (рисунок 3) или пополнить/изменить

содержание таблиц стандартных полных мощностей выбираемых трансформаторов.

Затем рассчитываются коэффициенты загрузки трансформаторов в нормальном и аварийном режимах, а также определяются нагрузки $(P_p^{вн}, Q_p^{вн}, S_p^{вн})$ на высокой стороне за счет потерь в трансформаторах ТП.

Мощности трансформаторов

№	ИП	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВт*А	S_{HT} , кВт*А	$k^{норм}_3$	$k^{ав}_3$
0	Витебск-Заболотинка	42.29	27.98	50.71	63.00	0.80	0.00
1	ГКТП-19	4.66	1.54	4.91	25.00	0.20	0.00
2	ТП-17(СШ1)	99.24	32.76	104.51	160.00	0.65	0.00
3	ГКТП-22	2.10	0.69	2.21	25.00	0.09	0.00
4	ТП-16	34.93	11.52	36.78	40.00	0.92	0.00
5	ТП-11	1.23	0.41	1.30	25.00	0.05	0.00
6	ТП-10(Т1)	45.08	14.87	47.47	63.00	0.75	0.00
7	ТП-10(Т2)	63.07	20.80	66.41	100.00	0.66	0.00
8	ТП-6(СШ2)	111.28	36.73	117.18	160.00	0.73	0.00

Нагрузка на стороне 10 кВ

№	ИП	P_p , кВт	Q_p , квар	P_T , кВт	Q_T , квар	$P^{вн}_p$, кВт	$Q^{вн}_p$, квар	$S^{вн}_p$, кВт*А
0	Витебск-Заболотинка	42.29	27.98	0.35	3.60	42.64	31.58	53.06
1	ГКТП-19	4.66	1.54	0.16	0.84	4.82	2.38	5.37
2	ТП-17(СШ1)	99.24	32.76	1.70	6.91	100.94	39.67	108.46
3	ГКТП-22	2.10	0.69	0.14	0.81	2.24	1.50	2.69
4	ТП-16	34.93	11.52	0.93	2.72	35.87	14.24	38.59
5	ТП-11	1.23	0.41	0.14	0.80	1.37	1.21	1.83
6	ТП-10(Т1)	45.08	14.87	0.34	3.37	45.42	18.24	48.94
7	ТП-10(Т2)	63.07	20.80	1.23	4.58	64.30	25.38	69.13
8	ТП-6(СШ2)	111.28	36.73	1.99	7.70	113.26	44.43	121.67

№	ЛЭП	Марка и сечение	I_p, A	$I_{доп}, A$	$j, A/mm^2$	$F_э, mm^2$
0	ИП - Витебск-Заболотинка	АСБ - 3 x 16	3.06	75.00	1.20	2.55
1	ИП - ГКТП-19	АСБ - 3 x 16	0.31	75.00	1.20	0.26
2	ИП - ТП-17(СШ1)	АСБ - 3 x 16	6.26	75.00	1.20	5.22
3	ИП - ГКТП-22	АСБ - 3 x 16	0.16	75.00	1.20	0.13
4	ТП-16 - ТП-11	АСБ - 3 x 16	0.11	75.00	1.20	0.09
5	ИП - ТП-16	АСБ - 3 x 16	2.33	75.00	1.20	1.94
6	ТП-10(Т1) - ТП-6(СШ2)	АСБ - 3 x 16	7.02	75.00	1.20	5.85
7	ТП-10(Т1) - ТП-10(Т2)	ААШВ - 3 x 16	3.99	75.00	1.20	3.33
8	ИП - ТП-10(Т1)	АСБ - 3 x 16	13.84	75.00	1.20	11.53

Рисунок 3. Пример выбора номинальной мощности, коэффициентов загрузки и расчета потерь в трансформаторах, а также сечения проводов кабелей

Определение наиболее эффективных вариантов электроснабжения. На этом этапе указывается число реализаций N (разыгрываемых вариантов организации электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта), определяемое заранее на основании заданной точности имитации результатов моделирования по известным формулам². По умолчанию предлагается $N!$ разыгрываемых вариантов.

Уточняется число наиболее эффективных вариантов (N') организации электроснабжения с наименьшими приведенными затратами, которые будут приводиться с полной детализацией расчетов и схем.

Запуск имитационного эксперимента. На основании равномерного закона распределения с помощью web-приложения генерируется первый вариант организации электроснабжения. Данный этап предполагает построение сети электроснабжения с использованием процедур определения конечных, промежуточных и узловых подстанций, визуализацию реализованного варианта сети с цветовой индикацией соединительных линий между объектами.

Программа автоматически рассчитывает и выбирает сечения проводов кабелей по критерию допустимого нагрева с учетом коэффициентов, учитывающих фактическую температуру земли и воздуха, отличие удельной

² Айвазян, С.А. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. – Минск: Финансы и статистика, 1983. 547 с.

проводимости земли от принятой в таблицах ПУЭ и количество работающих кабелей, лежащих рядом в земле. Также определяется программой экономическая плотность тока и экономическая площадь поперечного сечения жил кабеля (рис. 3).

Таблицы стандартных марок и сечений кабелей соответствуют номенклатуре выпускаемых промышленностью и имеющихся в технологическом запасе отделений дистанции электроснабжения. При необходимости можно изменить предложенную программой марку и сечение кабеля или пополнить/изменить содержание таблиц стандартных марок и сечений кабелей.

Технико-экономический расчет первого варианта организации электроснабжения. Технико-экономический расчет и сохранение результатов первого варианта организации электроснабжения осуществляется по критерию приведенных затрат $З_1 = p_n K_1 + I_1$ с учетом капитальных затрат на сооружение сети и издержек на эксплуатацию.

Реализация следующих вариантов организации электроснабжения осуществляется с последующим повторением пунктов 6 и 7, сравнение их результатов по критерию приведенных затрат. Если $З_r < З_{\min}$, то $З_r \equiv З_{\min}$, а если $З_r > З_{\min}$, то значение $З_r$ ранжируется по возрастанию со всеми результатами, из которых сохраняются детализированные результаты только наиболее эффективных вариантов – N' . При выполнении условия $N_r \leq N$ результаты представляются в виде N' наиболее эффективных вариантов в порядке возрастания приведенных затрат.

Программа ИМ УЗЛОВ может быть использована для разработки наиболее эффективных схем электроснабжения как проектируемых предприятий железнодорожной отрасли, так и существующих, не предполагающих капитальные затраты на сооружение сети ($K = 0$).

Выводы

1. С помощью разработанной программы ИМ УЗЛОВ (все верно так названа программа) определяется N' наиболее эффективных вариантов схем электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта с наименьшими приведенными затратами на основании матрицы возможных электрических связей между трансформаторными подстанциями.

2. Универсальность базовой программы ИМ УЗЛОВ заключается в возможности определения наиболее эффективной схемы электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта даже специалистами невысокой квалификации.

3. Предложенным способом для Витебской дистанции электроснабжения была определена схема питания потребителей, которая обеспечивает значимое снижение мощности потерь в линиях 6–10 кВ.

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

К.В. Киреев - ведущий специалист ПАО «МРСК Центра»

Аннотация

В данной статье рассмотрен процесс реализации крупных проектов в электроэнергетике, который должен включать разработку и создание инструментов экспертизы и контроля, позволяющие контролировать как каждый из аспектов проекта в отдельности (технологический, организационный, экономический, социальный, экологический и т. д.), так и связи между разными аспектами и процесс реализации проекта в целом.

В современном мире электроэнергетика является базовой инфраструктурной отраслью, которая лежит в основе развития других отраслей промышленности: транспортной промышленности, черной и цветной металлургии, отрасли тяжелого машиностроения, химической и нефтехимической промышленности и т. д. На сегодняшний день электроэнергетика является фундаментом жизнедеятельности человека. Уровень развития электроэнергетики как отрасли напрямую определяет степень развития и состояние производительных сил общества, перспективы научно-технического прогресса, а также качество жизнь общества в целом и человека в частности.

Одна из основных проблем электроэнергетической отрасли в России заключается в высокой степени износа электротехнического и электроэнергетического оборудования. По оценкам экспертов степень износа мощностей в электроэнергетическом комплексе составляет около 65%. В наихудшем состоянии на сегодняшний день находится распределительный сетевой сегмент, степень износа мощностей которого составляет 70%¹.

Для решения указанной проблемы необходима активизация инвестиционной деятельности в электроэнергетическую отрасль, которая должна быть направлена на обновление и модернизацию основных фондов и мощностей, а также внедрение инновационных, энергосберегающих и экологически безопасных технологий. При этом осуществление

¹ Федяков И.В. Износ оборудования – системная проблема всей электроэнергетической отрасли // Электротехнический рынок. – 2011. – № 3 (39). – С. 3.

инвестиционной деятельности и реализация инвестиционных проектов (ИП) в электроэнергетике имеют несколько отличительных особенностей.

Электроэнергетика является базовой инфраструктурной отраслью, определяющей качество и уровень жизни населения, а также перспективы и темпы развития экономики страны. По этой причине с позиции инвесторов электроэнергетика не рассматривается исключительно как механизм получения прибыли, а инвестирование в проекты отрасли направлено на удовлетворение социальных потребностей населения и повышение конкурентоспособности национальной экономики. Указанная особенность делает электроэнергетику менее привлекательным объектом инвестиций по сравнению с другими отраслями².

Инвестиционные проекты в электроэнергетике имеют длительные сроки разработки, реализации и, как следствие, окупаемости. Как правило, срок сооружения энергообъекта превышает срок сооружения потребителя энергии. Поэтому существует необходимость заблаговременного строительства энергообъектов под ожидаемые (прогнозируемые) объемы потребления электрической энергии или необходимость наличия резервных связей в электрических сетях и резервов пропускной способности для многостороннего питания потребителей.

Проекты электроэнергетической отрасли характеризуются масштабностью финансирования и высокой стоимостью возведения и эксплуатации энергообъектов по причине высокой стоимости используемого оборудования, необходимости прохождения большого числа предварительных согласований, длительности подготовительных работ и т. п. В связи с этим отдельные компании зачастую не могут выступать в роли единственного инвестора электроэнергетических проектов. Единственным инвестором крупных проектов в сфере энергетики может быть либо государство, либо национальная энергетическая монополия, а привлечение отдельных частных инвесторов, как правило, возможно по программам государственно-частного партнерства или в соответствии с механизмом специального инвестиционного контракта.

² Новиков А.А., Эльбакян А.М. Повышение инвестиционной привлекательности электроэнергетической отрасли Российской Федерации / Экономика и управление народным хозяйством // Экономические науки. – 2016. – № 10 (143). – С. 29–34.

Инвестиционные проекты, связанные с генерацией, передачей, распределением и сбытом электрической энергии, осложнены финансовыми расчетами, прогнозированием выручки и планированием возврата инвестиций, ввиду того что тарифы на электроэнергию регулярно пересматриваются и изменяются.

При реализации стратегических инфраструктурных проектов в электроэнергетической отрасли существуют особые социально-экономические и инженерно-технологические требования, которые предъявляются к потенциальным инвесторам. В частности, к финансированию крупных стратегически важных проектов в электроэнергетике зачастую не могут быть привлечены иностранные инвесторы. Кроме того, ко всем реализуемым в электроэнергетической отрасли проектам предъявляются высокие требования к обеспечению качества и надежности электроснабжения, а также требования, связанные с обеспечением экологической безопасности.

Кроме того, при реализации инвестиционных проектов в электроэнергетике отсутствует возможность применения шаблонных решений или стандартных проектов и схем их реализации. Это связано с многообразием климатических и географических условий, являющихся существенным ограничением не только при выборе технического и технологического оборудования, но и при его транспортировке, монтаже, эксплуатации, ремонте и замене. Поэтому реализация проектов связана с необходимостью использования уникальных решений или серьезной модификацией и адаптацией стандартных проектов и решений под конкретные условия в каждом отдельном случае³.

В таблице 1 представлены основные особенности реализации инвестиционных проектов в электроэнергетике и последствия, к которым приводит каждая особенность по причине уникальности и специфичности электроэнергетической отрасли, а также подтверждающие наличие каждой особенности факты.

³Сорокин А.Н. Специфика предприятий энергетической отрасли как объекта инвестиций // Российское предпринимательство – 2011. – № 11-2 (195). – С. 102–107; Александрова Э.П., Ильясов И.И. Специфика предприятий энергетической отрасли как объекта инвестиций // Символ науки. – 2016. – № 8-1 (20). – С. 68–71; Балакин А.П., Шарпаева Л.А. Разработка подхода к выбору перспективных инвестиционных проектов в российском электросетевом комплексе // Транспортное дело России. – 2012. – № 6-3. – С. 2

Таблица 1 – Основные особенности реализации ИП в электроэнергетике

№	Особенность	Последствия	Пример/Подтверждение
1	2	3	4
1	Электроэнергетика, как объект вложения инвестиций, не может рассматриваться исключительно как механизм получения прибыли	Снижение инвестиционной привлекательности электроэнергетики по сравнению с другими отраслями	Инвесторы получают только возврат собственных средств, вложенных в строительство новых объектов электроэнергетики. Увеличение тарифа на электроэнергию значительно ухудшает условия электроснабжения для потребителей (с финансовой точки зрения) и не рассматривается как механизм получения прибыли ⁴
2	Длительные сроки разработки, реализации и окупаемости ИП	Снижение объема инвестирования (особенно иностранного капитала) в электроэнергетическую отрасль	Инвестиции в развитие генерации и электросетевого комплекса на 2015 г. составили 656,8 млрд руб., что на 18,7% меньше по сравнению с 2014 г. и на 26,4% меньше, чем в 2011 г. ⁵
3	Значительный объем финансирования ИП	Незначительное количество частных инвесторов, заинтересованных в реализации ИП в электроэнергетике; В качестве инвестора выступает государство или крупные компании с государственным участием	Стоимость строительства крупнейшей солнечной электростанции в мире (Тораз, США) при суммарной мощности 550 МВт составила 2,5 млрд. долл. США.
4	Сложность расчетов финансовых показателей ИП по причине волатильности тарифов	Низкая точность расчетных значений показателей эффективности ИП	По данным РЭК г. Москвы за последние 10 лет одноставочный тариф на электроэнергию увеличился $\approx$ в 2,7 раз (на 167%) (среднее значение для групп потребителей)

⁴ Новиков А.А., Эльбакян А.М. Повышение инвестиционной привлекательности электроэнергетической отрасли Российской Федерации / Экономика и управление народным хозяйством // Экономические науки. – 2016. – № 10 (143). – С. 29–34.

⁵ Доклад Министра энергетики Российской Федерации Новака А.В. «Итоги работы Минэнерго России и основные результаты функционирования ТЭК в 2015 году». [Электронный ресурс]. – URL: <http://minenergo.gov.ru/node/4913>.

Продолжение таблицы 1

5	Наличие требований, предъявляемых к реализующим электроэнергетические проекты инвесторам	Ограниченный доступ инвесторов к реализации стратегических инфраструктурных проектов в электроэнергетической отрасли	В случае соответствия процесса сжигания топлива на крупных установках по производству электроэнергии принципам наилучших доступных технологий (НДТ) компания получит право на применение ряда льгот (обнуление ставки платы за загрязнение окружающей среды, ускоренная амортизация оборудования с использованием НДТ и иные льготы) ¹
6	Невозможность создания и применения шаблонных решений при реализации ИП в электроэнергетике	Уникальность ИП в электроэнергетике, необходимость адаптации типовых решений под особенности ИП	Проект восстановления и ремонта Саяно-Шушенской гидроэлектростанции; Проекты строительства АО «ВетроОГК» (дочернее общество ГК «Росатом») в 2018-2022 годах ветроэлектростанций общей мощностью 970 МВт

Отличительная особенность крупных инвестиционных проектов в электроэнергетике заключается в существовании высоких рисков при разработке и реализации проектов (технических, экономических, экологических, политических и т. д.), которые в большинстве случаев не являются управляемыми, а характеризуются серьезной или фатальной степенью влияния на проект. В этой связи с учетом длительного срока окупаемости финансовых вложений остро встает вопрос необходимости регулярного мониторинга и контроля состояния разработки и реализации инвестиционных проектов в электроэнергетике с целью своевременного выявления факторов и причин возникновения рисков ситуаций и формирования комплекса мер по их устранению.

Таким образом, залогом успешной реализации инвестиционных проектов в электроэнергетической отрасли является тщательная подготовка и глубокая проработка схемы реализации проекта на его начальных этапах (стадии инициации, концептуальной стадии). Процесс реализации крупных проектов в электроэнергетике должен включать разработку и создание

¹ О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации // Федеральный закон от 21.07.2014 – № 219-ФЗ; Сапаров М.И. Переход на наилучшие доступные технологии (ндт) в российской электроэнергетике в рамках выполнения 219-ФЗ / Международная научно-практическая конференция «УгольЭко-2016», 2016. 25 с.

инструментов экспертизы и контроля, которые позволят контролировать как каждый из аспектов проекта в отдельности (технологический, организационный, экономический, социальный, экологический и т. д.), так и связи между разными аспектами и процесс реализации проекта в целом.

УТОЧНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА УСТОЙЧИВОСТЬ РЕЖИМА ПЕРЕРАБОТКИ СУБСТРАТА В БГУ

А.Г. Савиновских – к.т.н., заведующий кафедрой транспорта и электроэнергетики ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

Ю.П. Ильин – к.т.н., доцент кафедры транспорта и электроэнергетики, ОУ ВО «ЮУИУиЭ»

Н.Ю. Кузьмина – соискатель кафедры энергообеспечения и автоматизации технологических процессов Южно-Уральского государственного аграрного университета

Д.А. Новикова – преподаватель кафедры транспорта и электроэнергетики ОУ ВО «ЮУИУиЭ»

Н.В. Рудных – соискатель кафедры энергообеспечения и автоматизации технологических процессов Южно-Уральского государственного аграрного университета

Аннотация

В работе конструируются численные методы решения уравнений теплопроводности в частных производных с эффектом запаздывания по временной составляющей. С позиции сеточных методов предлагается конструирование неявной схемы с простейшим видом интерполяции дискретной предыстории модели – кусочно - постоянной интерполяции и исследуется ее порядок сходимости.

Одним из направлений энергетики России является использование нетрадиционных источников энергии¹. Это потребует увеличения вклада биомассы в общий энергобаланс. Значительная часть производимого биогаза используется для получения электроэнергии с КПД 31%.

Ключевые слова: биогазовая установка, уравнение теплопроводности, сходимость модели, функционально-дифференциальные уравнения, метод прямых, неявная сеточная схема численного решения, счетная система треугольной формы, свойства решения уравнения устойчивости системы, эффект регулирования для метантенков, устойчивость системы при

¹ Синяк Ю.В., Авизов А.Х. Возможность экономии природных энергоресурсов за счет анаэробной ферментации органосодержащих веществ // Энергетика топлива. – 1984. – № 6. – С. 42–59.

переходных температурных процессах, однородная среда, заданный температурный режим на торцевых стенках реактора, оптимизация, управление температурным режимом, управляющие функции, ряд Фурье, кубический сплайн, начально-краевая задача для температуры, аналитическое решение, аппроксимация управляющего воздействия.

В настоящее время в мировой практике для утилизации навоза получают широкое распространение биогазовые установки горизонтального типа²³. Предлагаемая нами блочно-модульная установка в кассетной комплектации метантенков емкостью 75 м³ (рис. 1) обрабатывает навоз и навозные стоки в анаэробных условиях, а продуктами переработки являются биологический газ и высококачественные органические удобрения. Во время сбраживания в навозе развивается микрофлора, которая последовательно разрушает органические вещества до кислот, а последние под действием синтрофных и метанобразующих бактерий превращаются в газообразные продукты – метан и углекислоту. Одновременно (термофильный процесс), при сбраживании навоза обеспечивается его дезодорация и дегельминтизация.

² Ильин Ю.П., Кузьмина Н.Ю., Рудных Н.В. О возможности использования биогазовых установок горизонтального типа в условиях Челябинской области /сборник докладов НПК «Эффективность, надежность и безопасность энергетического оборудования». – Челябинск: ПЭИПК Энерго, ЧФ ФГАОУ ДПО, 2014, С 55-58.

³ Белов А.В., Ильин Ю.П., Кузьмина Н. Ю., Рудных Н.В. Энергетический потенциал животноводства / Материалы ЛII международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству» часть V, Челябинск, ЧГАА, 2013, С. 104–113.

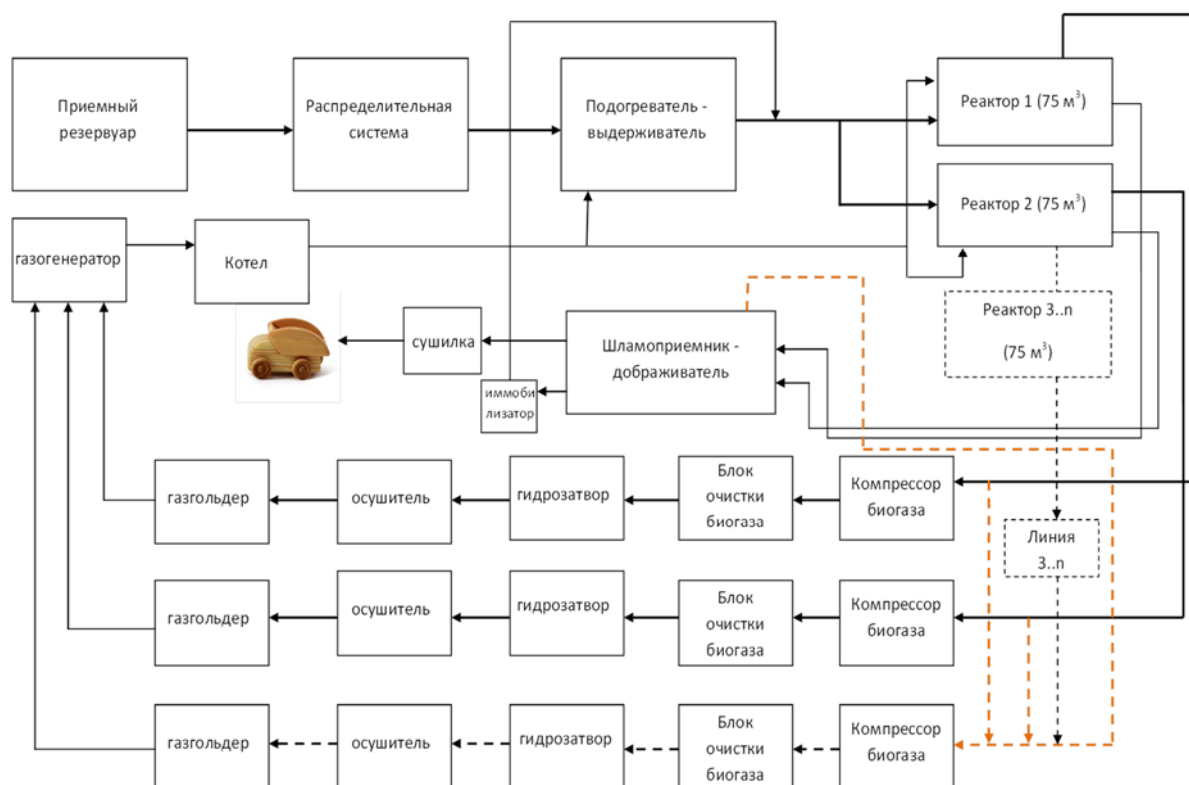


Рисунок 1. Блочно-модульная схема биогазовой установки

Учитывая уровни удельного выхода биогаза, при различной загрузке⁴, для термофильного, термотолерантного и мезофильного брожения (навозов КРС и свиного) можно определять действительные затраты энергии на выработку биогаза в условиях зоны Урала и решать вопросы замещения традиционных источников энергии.

Микробиологическое образование метана из различного рода органических материалов является широко распространенным сложным многоступенчатым процессом, протекающим в анаэробных условиях, на разных стадиях которого принимают участие микроорганизмы различной природы⁵. Этап биodeградации связан с гидролизом высокомолекулярных соединений (полисахаридов, белков, жиров и т.д.) до соответствующих олиго- и мономеров, которые на последующих этапах конвертируются в

⁴ Ильин Ю.П., Кузьмина Н.Ю., Рудных Н.В. О возможности использования биогазовых установок горизонтального типа в условиях Челябинской области /сборник докладов НПК «Эффективность, надежность и безопасность энергетического оборудования». - Челябинск.: ПЭИПК Энерго, ЧФ ФГАОУ ДПО, 2014, С 55-58; Белов А.В., Ильин Ю.П., Кузьмина Н. Ю., Рудных Н.В. Энергетический потенциал животноводства / Материалы ЛП международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству» часть V, Челябинск, ЧГАА, 2013, С. 104–113.

⁵ Ильин Ю.П., Хохлов А.В., Царев И.Б., Кузьмина Н. Ю., Рудных Н.В. Оценка выхода биогаза при мезофильной переработке сенажа топинамбура в биогазовом кластере // Вестник ЧГАА. – 2014. – т.68. – С.39-50.

органические кислоты и спирты, молекулярный водород и диоксид углерода. Органические кислоты и спирты превращаются в уксусную кислоту, водород и CO_2 , из которых образуется метан. Экспериментальные исследования кинетики генерации в закрытой системе: CO_2 , метана, органических интермедиантов, при широком наборе индивидуальных соединений и их смесей (углеводов, аминокислот, ароматических соединений, органических кислот и спиртов) показывают, что конверсия всех органических соединений протекает через промежуточное образование уксусной, пропионовой и масляной кислот, при трансформации исходных молекул в конечные продукты⁶. Эти химические трансформации протекают под действием микроорганизмов $X_1, X_2, \dots, X_n$, при соответствующих скоростях реакций $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$. Возможность термодинамически запрещенного процесса окисления водой масляной кислоты с образованием уксусной кислоты и водорода, в микробиологических консорциумах обеспечивают микроорганизмы, активно потребляющие молекулярный водород⁷. Для активного протекания метаногенеза, необходимо, чтобы парциальное давление водорода было ниже критического (0,002 атм.) и соблюдались регуляторные эффекты. Предполагаемые модели позволяют описывать динамику метаногенизирующего консорциума достаточно адекватно и предсказывать поведение системы при различных начальных условиях, различных режимах и времени⁸.

Количественная картина метаногенеза (рис.2) реконструировалась на основе динамики образования и расходования исходных промежуточных соединений и конечных продуктов процесса с использованием биокинетического подхода⁹ [8,9].

Выход биогаза из единицы объема субстрата зависит не только от перерабатываемого субстрата, но также от рабочих параметров биоэнергетической установки (температуры в реакторах, времени брожения, дозы загрузки, состава установки, конструктивного исполнения метантенков

⁶ В.С. Дубровский, У.Э. Виестур. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов. – Рига: Зинатне, 1988. 204с.

⁷ Варфоломеев С.Д., Гуревич К.Г. Биокинетика: Практический курс. – М.: ФАИР-ПРЕСС, 1999. 720 с.

⁸ Там же.

⁹ В.С. Дубровский, У.Э. Виестур. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов. – Рига: Зинатне, 1988. 204с.; Варфоломеев С.Д., Гуревич К.Г. Биокинетика: Практический курс. – М.: ФАИР-ПРЕСС, 1999. 720 с.

и т.д.) Это объясняет тот факт, что при использовании одинаковых субстратов возможна различная производительность установок.

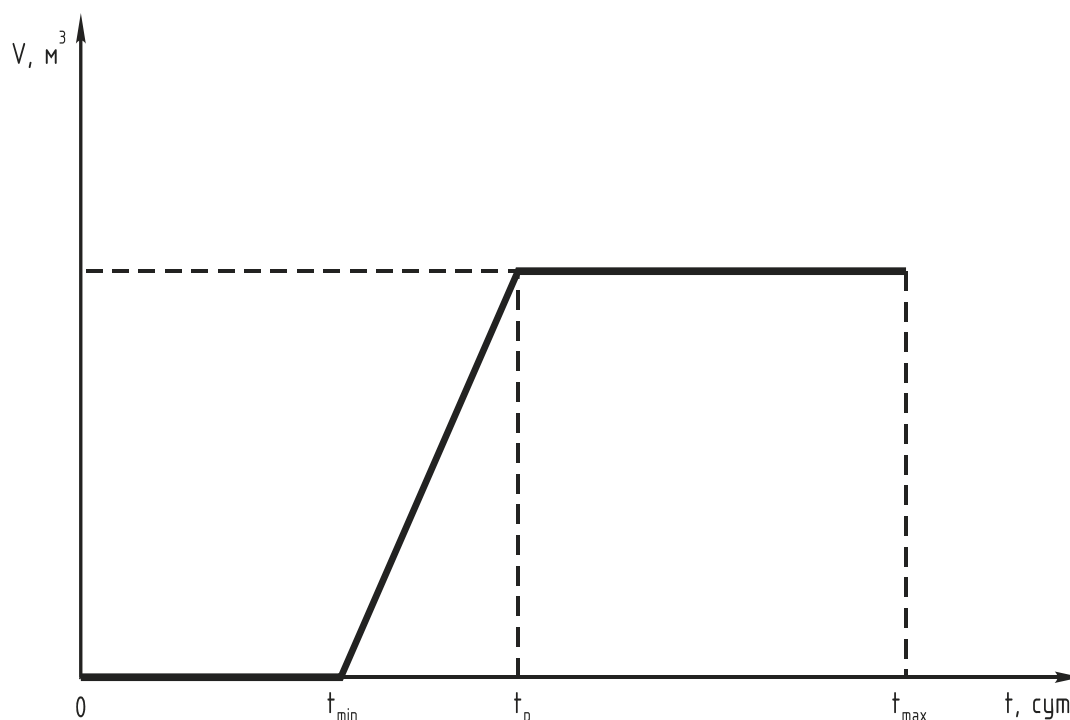


Рисунок 2. Зависимость выхода биогаза от длительности процесса:

$t_{\min}$ -минимальное время, при котором происходит запуск БГУ;
 t_p - время, при котором происходит выход БГУ на расчетный режим;
 $t_{\max}$ -максимальное время работы БГУ

Если обозначить все постоянные составляющие коэффициентами K_1 , K_2 , то удельный объем получаемого биогаза в БГУ можно определить следующим образом:

$$V_{\text{уд}} = \begin{cases} 0 & \text{при } t < t_{\min} \\ k_1 \cdot t & \text{при } t_{\min} \leq t \leq t_p \\ k_2 \cdot t & \text{при } t_p \leq t \leq t_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

Предполагаемая зависимость $k_1 \cdot t$ при $t_{\min} \leq t \leq t_p$ различными исследователями определяется разными формулами [6,8,9]. В диапазоне $t < t_{\min}$ протекают реакции гидролизной, кислотообразующей и ацетогенной фаз разложения субстратов. Во время протекания гидролизной фазы, в результате жизнедеятельности бактерий, устойчивые субстанции (протеины, жиры и углеводы) разлагаются на простые составляющие (аминокислоты, глюкозу и жировые кислоты). Образованные во время гидролизной фазы простые составляющие разлагаются на органические кислоты (уксусная, пропионовая,

масляная), спирт, альдегиды, водород, диоксид углерода, а также газы аммиак и сероводород. Этот процесс протекает до тех пор, пока развитие бактерий не замедляется под воздействием образованных кислот. Под воздействием ацетогенных бактерий из образованных во время кислотообразующей фазы кислот, вырабатывается уксусная кислота.

В диапазонах $t_{\min} \leq t \leq t_p$ и $t_p < t \leq t_{\max}$ происходят реакции метаногенеза. При этом уксусная кислота разлагается на метан, углекислый газ и воду. Водород и углекислый газ преобразуется в метан и воду.

Согласно второму началу термодинамики физическая система (1), не обменивающаяся энергией с другими системами стремится к вероятному равновесному состоянию с максимумом энтропии.

Многие исследователи конструируют численные методы решения уравнений теплопроводности в частных производных с эффектом запаздывания по временной составляющей, применяя метод прямых и неявную сеточную схему с кусочно-постоянной интерполяцией, решая задачу о сходимости¹⁰. Математические аспекты таких объектов изучались, в частности, в монографии Ву. Численные алгоритмы решения задач с запаздыванием, как непрерывный метод, строятся и исследуются по аналогии с неявным методом трапеций¹¹, описываются алгоритмы решения функционально-дифференциальных уравнений (ФДУ) большой размерности, которые хорошо разработаны с позиции подхода¹², основанном на идее разделения конечной и бесконечной фазовых составляющих и применения интерполяции с заданными свойствами дискретной предыстории модели. Однако при дискретизации по двум переменным возникают жесткие задачи¹³, которые при использовании явных методов дают ограничение на временной шаг. В этом случае, частично, проблема преодолевается применением специальных методов. В работе¹⁴ с позиции сеточных методов предлагается конструирование неявной схемы с простейшим видом интерполяции

¹⁰ В.С. Дубровский, У.Э. Виестур. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов. – Рига: Зинатне, 1988, 204 с.

¹¹ Tavernini L. Finite Difference Approximations for a Class of Semilinear Volterra Evolution Problems // SIAM J. Numer. Anal. 1977. – Vol. 14. – №5. – P 931–949.

¹² Ким А.В., Пименов В.Г. i -гладкий анализ и численные методы решения функционально-дифференциальных уравнений. Москва; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2004.

¹³ Хайрер Э. Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. М.: Мир, 1999.

¹⁴ Пименов В.Г. Численные методы решения уравнения теплопроводности с запаздыванием. – Вестник Удмуртского университета / Математика. – 2008. – вып.2. – С.113–116.

дискретной предыстории модели - кусочно-постоянной интерполяции и исследуется ее порядок сходимости.

Рассмотрим задачу оценки устойчивости системы элементов БГУ при переходных температурных процессах и изложим основные предположения.

Исходим из уравнения теплопроводности вида (2):

$$\frac{du}{dt} = a^2 \frac{d^2 u}{dx^2} + f(x, t, u_t(x, t), u(x, \cdot)), \quad (2)$$

где $x \in [0, x]$ – пространственная и $t \in [0, x]$ -временная независимые переменные;

$u(x, t)$ – искомая функция;

$u_t(x, \cdot) = \{u(x, t+s), -\tau \leq s < 0\}$ – функция – предыстория искомой функции к моменту t ;

τ – величина запаздывания.

Пусть заданы начальные условия:

$$u(x, t) = \varphi(x, t), \quad x \in [0, x], \quad t \in [0, x] \quad (3)$$

и граничные условия:

$$u(0, t) = g_0(t), \quad u[x, t] = g_1(t), \quad t \in [0, T] \quad (4)$$

Задача (2-4) представляет собой простейшую краевую задачу для уравнения теплопроводности с эффектом запаздывания общего вида. Предположим, что функции φ , g_0 , g_1 и функционал f таковы, что задача имеет единственное решение $u(x, t)$, понимаемое в классическом смысле. Вопрос существования и единственности подобной задачи рассматривается в работе¹⁵.

Обозначим через $Q = Q[-\tau, 0)$ множество функций $u(s)$, кусочно – непрерывных на $[-\tau, 0)$ с конечным числом точек разрыва первого рода, в точках разрыва непрерывных справа. Определим норму функций на Q соотношением $\|u(\cdot)\|_Q = \sup_{s \in [-\tau, 0)} |u(s)|$. Дополнительно будем предполагать, что функционал $f(x, t, u, v(\cdot))$ определен на $[0, X] \times [0, T] \times R \times Q$ и липшицев по двум последним аргументам, то есть найдется такая константа L , что для всех $x \in [0, x]$, $t \in [0, x]$, $u^1 \in R$, $u^2 \in R$, $v^1(\cdot) \in Q$, $v^2(\cdot) \in Q$ выполняется

$$|f(x, t, u^1, v^1(\cdot)) - f(x, t, u^2, v^2(\cdot))| \leq L(|u^1 - u^2| + \|v^1(\cdot) - v^2(\cdot)\|_Q) \quad (5)$$

Приведем алгоритм решения методом прямых.

¹⁵ Wu J. Theory and Applications of Partial Functional Differential Equations. N.Y.: Springer-Verlag, 1996.

Разобьем отрезок изменения пространственной переменной $[0, x]$ на части с шагом $h = X / N$, введя точки $x_i = I h$, $I = 0, \dots, N$.

Приближения функций $u(x_i, t)$ обозначим через $u^i(t)$, предыстории этих функций к моменту t обозначим $u_t^i(\cdot) = \{u^i(t+s), -\tau \leq s < 0\}$. Обозначим также $f^i(t, u^i(t), u_t^i(\cdot)) = f(x_i, t, u^i(t), u_t^i(\cdot))$.

Используя формулу аппроксимации по трем узлам на середину для второй производной по x при $i = 1, \dots, N-1$, получаем систему функционально – дифференциальных уравнений:

$$u^i(t) = \frac{a^2}{h^2} (u^{i-1}(t) - 2u^i(t) + u^{i+1}(t)) + f^i(t, u^i(t), u_t^i(\cdot)) \quad (6)$$

с функциональными начальными условиями:

$$u^i(t) = \varphi(t) = \varphi(x_i, t), \quad t \in [-\tau, 0]. \quad (7)$$

Задача 6-7 представляет собой задачу Коши для системы ФДУ, численные методы которой (основанные на дискретизации по времени) достаточно хорошо разработаны¹⁶.

Как показывает практика, возникающая проблема жесткости при применении явных методов, приводит к ограничению на шаг Δ дискретизации по времени, а слишком мелкий шаг по времени ведет к накоплению вычислительной погрешности, возникает неустойчивость метода. Этого избегают решая задачу (6-7) специальными методами для жестких систем, например, методом Розенброка, относящихся к числу полуявных или чисто неявных. Рассмотрим в качестве примера модификацию простейшего неявного метода Эйлера с кусочно – постоянной интерполяцией предыстории, что соответствует неявной сеточной схеме для численного решения задачи (2-4).

Для этого разобьем отрезок изменения пространственной переменной $[0, x]$ на части с шагом $h = X/N$, введя точки $x_i = ih$, $i=0, \dots, N$. Отрезок изменения временной переменной $[0, T]$ разобьем на части с шагом $\Delta = T/M$ введя точки $t_j = j \Delta$, $j = 0, \dots, M$. Допустим, что величина $\tau / \Delta = K$ – целое число.

Приближения функций $u(x_i, t_j)$ в узлах обозначим через u^{ij} . При всяком фиксированном $i = 0, \dots, N$ введем дискретную предысторию к моменту t_j ,

$$j = 0, \dots, M; \quad u_j^i = \{u^{i,k}, j-K \leq k \leq j\}.$$

¹⁶ Ким А.В., Пименов В.Г. i -гладкий анализ и численные методы решения функционально-дифференциальных уравнений. Москва; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2004.

Оператором интерполяции дискретной предыстории является отображение

$$I : u_j^i \rightarrow v^i(.) \in Q.$$

В дальнейшем будем использовать только простейший способ интерполяции- кусочно – постоянную интерполяцию:

$$v^i(t_j + s) = u^{i,k}, \quad t_k \leq t_j + s < t_{k+1}.$$

Неявной схемой с кусочно – постоянной интерполяцией назовем систему (8):

$$\frac{u^{i,j+1} - u^{i,j}}{\Delta} = a^2 \frac{u^{i-1,j+1} - 2u^{i,j+1} + u^{i+1,j+1}}{h^2} + f(x_i, t_j, u^{i,j}, v_{tj}^i(.)),$$

$$i=1, \dots, N-1, \quad J=0, \dots, M-1, \quad (8)$$

с начальными условиями:

$$u^{i,0} = \varphi(x_i, 0), \quad i=0, \dots, N \quad (9)$$

$$v^i(t) = \varphi(x_i, t), \quad t < 0, \quad i=0, \dots, N. \quad (10)$$

и граничными условиями:

$$u^{0,j} = g_0(t_j), \quad u^{N,j} = g_1(t_j), \quad j=0, \dots, M \quad (11)$$

Система (8) при каждом фиксированном j представляет собой линейную трехдиагональную систему относительно $u^{i,j+1}$ с диагональным преобладанием, которая может быть эффективно решена методом прогонки.

Обозначим через $e^{i,j}$ величину погрешности метода:

$$e^{i,j} = u(x_i, t_j) - u^{i,j}, \quad i=0, \dots, N, \quad j=0, \dots, M$$

Метод отвечает условию сходимости, если $e^{i,j} \rightarrow 0$ при $h \rightarrow 0$ и $\Delta \rightarrow 0$ для всех $i=0, \dots, N$ и $j=0, \dots, M$. Утверждать о сходимости порядка $h^p + \Delta^q$ можно в случае, если найдена константа C , при которой выполняется условие:

$$|e^{i,j}| \leq C(h^p + \Delta^q) \text{ для всех } i=0, \dots, N \text{ и } j=0, \dots, M$$

Система (8 - 11) сходится с порядком $h^2 + \Delta$.

Исследования переходных температурных процессов, возникающих в реакторах, дображивателях – иммобилизаторах или подогревателях - выдерживателях биогазовой установки (рис.1), при добавлении очередной порции свежей фракции навозного субстрата, показывают, что при этом

нарушается установившийся режим (рис.2) анаэробного сбраживания¹⁷. Природа физического процесса нагревания до требуемой температуры сопровождается последствием и может быть описана дифференциальным уравнением с запаздывающим аргументом¹⁸:

$$\frac{dT(x,t)}{dt} = \alpha^2 \frac{d^2 T(x,t)}{dx^2} + k(t)T(x,t-\tau), T(x,t) = \varphi(x,t); t < t_0, \quad (12)$$

где $k(t)$ - коэффициент, характеризующий запаздывание системы;

τ – время запаздывания;

T – температура загружаемого субстрата;

α^2 – коэффициент теплопроводности;

t – время замера;

x – координаты точки, в которой измеряется температура.

Решение уравнения (12) получим, используя ряд Фурье¹⁹:

$$T(x,t) = \sum_{k=1}^{\infty} X_k(t) \cdot \sin K_x. \quad (13)$$

Определение неизвестных функций $X_k(t)$ для зависимости (13) выполним посредством бесконечной системы дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом. Решать такую систему уравнений достаточно непросто, да и в нашем случае решение в замкнутом виде не требуется. Поставим задачу получения свойства решения уравнения устойчивости системы. Для этого определим: устойчива ли система по виду диагональных коэффициентов. Оценку произведем для бесконечной системы дифференциальных уравнений, имеющей треугольную форму, при постоянном запаздывании аргумента. Счетная система треугольной формы опишется зависимостью (14):

$$\frac{dx_s}{dt} = \sum_{k=1}^s P_{sk}(t) \cdot X_k(t-h_k), \quad (14)$$

где параметры зависимости удовлетворяют условиям.

$s=1,2,\dots; h_k > 0; X_k(t) = \varphi_k(t); t \in [-h_k, 0]$.

¹⁷ Ильин Ю.П., Самаров А.Б., Кузьмина Н.Ю. Об устойчивости системы БГУ при переходных температурных процессах/ Материалы XLIII научно-технической конференции ЧГАУ, ч.2, Челябинск: ЧГАУ, 2004. С. 248–250.

¹⁸ Там же.

¹⁹ Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов.-М.: Наука, 1981. 720с.

Учитываем непрерывность комплекснозначных функций $P_{sk}(t)$ на $[0, \infty]$ при $\sum_{k=1}^{\infty} |P_{sk}(t)| \leq P(t)$ для $s=1, 2, \dots$ и непрерывном $P(t)$ на $[0, \infty]$.

Определяем верхнюю грань $\sup h_k = h < +\infty$. Положим $\varphi_s(t)$ – непрерывные комплекснозначные функции, равномерно ограниченные на $E = [-h_1, 0]$; $|\varphi_s(t)| \leq m < +\infty$, а $\int_{-h_s}^0 |p_{ss}(\tau + h_s)| d\tau < k < +\infty$.

Определим норму в пространстве решений:

$$\|X\| = \{\sup |X_1(t)|, |X_2(t)|, \dots\}. \quad (15)$$

$$\text{если } \int_0^t |p(\tau)| d\tau < A u \left| \exp \int_0^t |p_{ss}(\tau + h_s)| d\tau \right| < N, \quad (16)$$

где N и A – некоторые положительные числа, удовлетворяющие условию $AN \leq 0 < 1$. Покажем, что решение $X_s(t) \equiv 0$, при $s=1, 2, \dots$ – устойчиво.

Для этого рассмотрим первое уравнение системы:

$$\frac{dx_1}{dt} = P_{11}(t) \cdot X_1(t-h_1); \quad X_1(t) = \varphi_1(t); \quad t \in [E_1] \quad (17)$$

Проинтегрировав выражение (17) по промежутку $[0; t]$, получим зависимость:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= x_1(0) + \int_0^t p_{11}(\tau) x_1(\tau - h_1) d\tau = | \tau - h_1 = y | = x_1(0) + \int_{-h_1}^{t-h_1} p_{11}(y + h_1) x_1(y) dy = \\ &= x_1(0) + \int_{-h_1}^0 p_{11}(y + h_1) x_1(y) dy + \int_0^{t-h_1} p_{11}(y + h_1) x_1(y) dy. \end{aligned} \quad (18)$$

$$\text{откуда } |X_1(t)| \leq (m+km) + \int_0^t |P_{11}(y+h_1)| |X_1(y)| dy \quad (19)$$

Применив лемму Гронуолла – Беллмана [17], получим:

$$|X_1(t)| \leq (m+km) \exp \int_0^t |P_{11}(y+h_1)| dy \quad (20)$$

Следовательно $|X_1(t)| \leq m(1+k)N$.

Рассмотрим второе уравнение:

$$\frac{dx_2}{dt} = P_{21}(t) \cdot X_1(t) + P_{22}(t-h); \quad X_2(t) = \varphi_2(t); \quad t \in [E_2] \quad (21)$$

Аналогично предыдущему случаю:

$$|X_2(t)| \leq m(1+k)N[1+AN]. \quad (22)$$

Свойства решения уравнений устойчивости системы реализованы по виду диагональных коэффициентов для бесконечной системы дифференциальных уравнений треугольной формы при постоянном запаздывании аргумента.

Продолжив рассмотрение процесса на r -ом шаге, получим зависимость:

$$\left| x_r(t) \right| \leq m \cdot (1+k) \cdot N \left[AN + (AN)^2 + \dots + (AN)^{r-1} \right], \quad (23)$$

где A и N - некоторые положительные числа, удовлетворяющие условию:
 $AN_0 < 1$.

Из выражения (23) следует, что $\|x\| \leq \frac{m(1+k)N\Theta}{1-\Theta}$ для всех $t < 0$. (24)

В случае $\varepsilon > 0$ и $m < \frac{\varepsilon(1-\Theta)}{(1+k)N}$, $\|x\| \leq \varepsilon$, что и является доказательством

устойчивости системы при переходных температурных процессах в рассматриваемых элементах БГУ горизонтального типа.

Развитие и усложнение структуры производства переработки сырья в биогаз и другие компоненты (рис.3) приводит к тому, что необходимо стремиться минимизировать затраты сырья, временных и человеческих ресурсов, одновременно с этим повышая качество производимой продукции, приближая ее показатели к установленным стандартам, полностью используя все возможности повышения производительности применяемого оборудования.

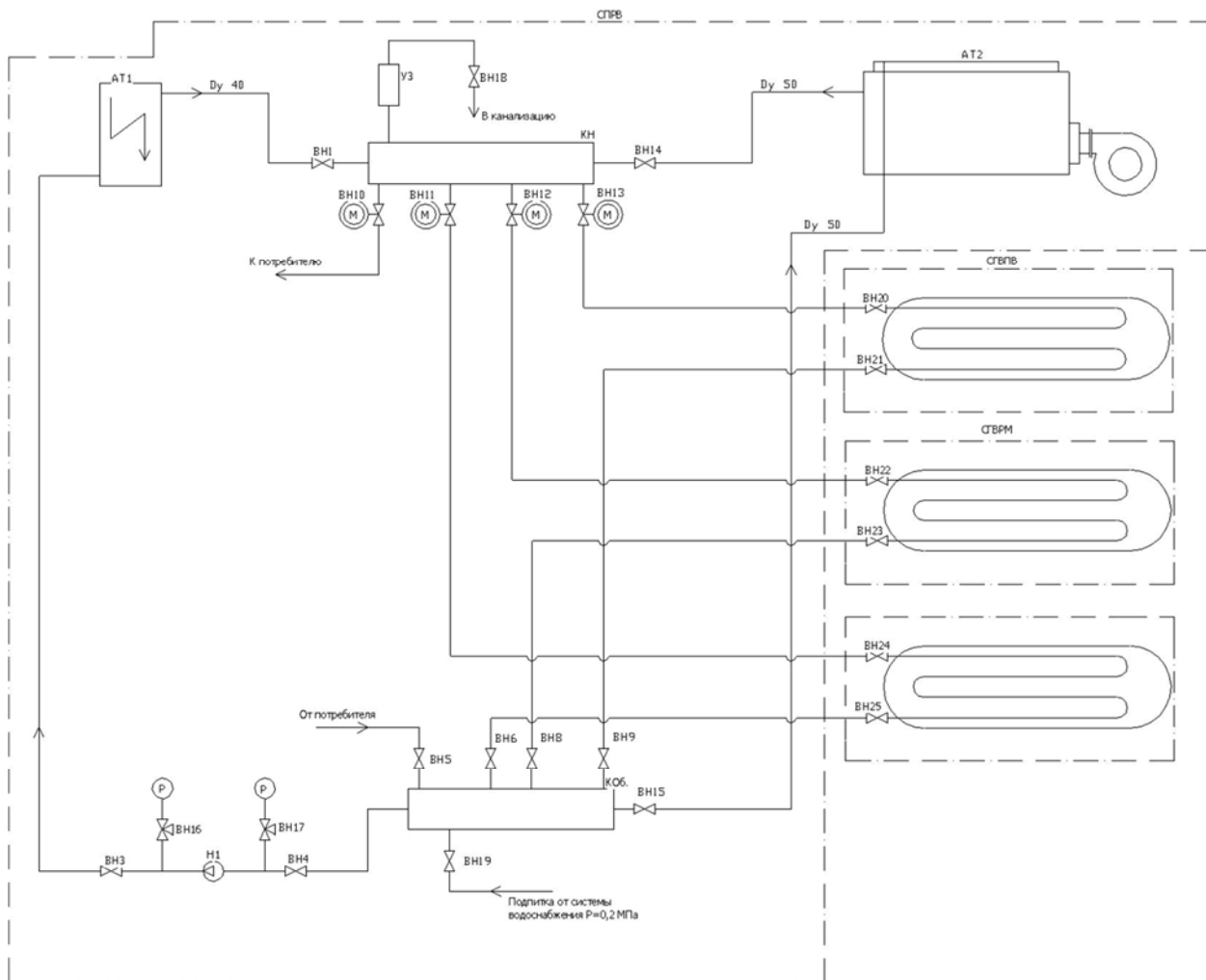


Рисунок 3. Технологическая схема подогрева элементов БГУ

Вследствие влияния различных факторов, снижается качество выпускаемой продукции и увеличивается количество переработанного сырья, что приводит к необходимости разработки методов управления, обеспечивающих наилучшее протекание технологических процессов.

Данное обстоятельство особенно актуально в сложных системах, состояние которых характеризуется одним или несколькими параметрами, распределенными в пространстве и времени. Особенности биотехнологий и физических процессов распространения тепла, возникающих в ходе производства, требуют создания математических моделей, использующих краевые задачи математической физики, в которых управление зависит от целей управления и определяется функционалом специального вида.

В ряде случаев управляемую систему принято считать одномерной. Теория оптимального управления позволяет подбирать параметры, которые обеспечат оптимальное функционирование исследуемого процесса.

Для решения задач оптимального управления процессом распространения тепла в реакторе нами использовались сеточные методы, в сочетании с методами оптимизации (методы проекции градиента и условного градиента)²⁰, методы, основанные на разложении в ряды Фурье²¹, и другие²².

Процессы теплопроводности описываются параболическими уравнениями²³. Кроме того, параболическими уравнениями описываются нестационарные процессы диффузии, фильтрации.

Теоретическое исследование, а также постановка задач оптимального управления, описываемых параболическими уравнениями, приведено в работах²⁴. Каждый из перечисленных методов обладает рядом достоинств и недостатков. К недостатку сеточных методов²⁵ следует отнести то, что решение задачи получается в виде массива чисел, дающих значение температуры только в отдельных точках расчетной области. В настоящей работе решение уравнений теплопроводности в реакторах БГУ представляется

²⁰ Антонов Ю. М. Основные аспекты энергосбережения в сельском хозяйстве // Энергосбережение в сельском хозяйстве. – М., 1998. – ч.1. – с. 44–46; Дмитриев С.В. Разработка гибридных генетических алгоритмов для решения задач оптимального управления динамическими системами: Автореферат дис... канд.техн.наук. – Ижевск Дмитриев С.В. Разработка гибридных генетических алгоритмов для решения задач оптимального управления динамическими системами: Автореферат дис... канд.техн.наук. – Ижевск, 2007. 125 с.; Свалова М.В. Математическая модель процесса получения биогаза из отходов продукции птицеводства // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2008. – №3. – С.145–146 и др.

²¹ Антонов Ю. М. Основные аспекты энергосбережения в сельском хозяйстве // Энергосбережение в сельском хозяйстве. – М., 1998. – ч.1. – с. 44–46; Дмитриев С.В. Разработка гибридных генетических алгоритмов для решения задач оптимального управления динамическими системами: Автореферат дис... канд.техн.наук. – Ижевск Дмитриев С.В. Разработка гибридных генетических алгоритмов для решения задач оптимального управления динамическими системами: Автореферат дис... канд.техн.наук. – Ижевск, 2007. 125 с.; Budiyo I.N., Widiya S.J. Increasing Biogas Production Rate from Cattle Manure Using Rumen Fluid as Inoculum [Электронный ресурс] // International Journal of Basic & Applied Sciences IJBAS-IJENS. – 2010. – Vol. 10, №1. – P. 68–74. URL: <http://www.ijens.org/101501-8282%20IJBAS-IJENS.pdf>

²² Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука. 1965. 474 с.; Бутырин В.И., Фильштинский Л.А. Оптимальное управление температурным полем в стержне при программном изменении зоны управления // Прикладная механика. – 1976. – Т. 12. – №8. – С. 115–118.

²³ Чмиль А.И. Математическое моделирование и оптимизация процессов метанового сбраживания животноводческих отходов // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1996. – №2. – С. 20–24; Варфоломеев С.Д., Гуревич К.Г. Биокинетика: Практический курс. – М.: ФАИР-ПРЕСС, 1999. 720 с.

²⁴ Abdullahi I., Isma'il A., Galadima A. Effect of Kinetic Parameters on Biogas Production from Local Substrate using a Batch Feeding Digester [Электронный ресурс] // European Journal of Scientific Research. – 2011. Vol. 57, №4. – P. 626–634. URL: http://www.eurojournals.com/EJSR_57_4_13.pdf; Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука. 1965. 474 с.

²⁵ Бутырин В.И., Фильштинский Л.А. Оптимальное управление температурным полем в стержне при программном изменении зоны управления // Прикладная механика. – 1976. – Т. 12. – №8. – С. 115–118.

методом, основанным на решении непрерывной функции – линейной комбинации базисных функций.

Целью настоящего исследования являлось применение математических методов оптимального управления конечным температурным состоянием однородного поля, за счет управления температурным режимом на его концах.

Нами для достижения поставленной цели решались задачи:

- формулирования оптимального управления процессом теплопроводности в однородном поле;

- теплопроводности в однородном поле с теплоизолированной боковой поверхностью (без внутренних источников тепла) при заданных краевых и начальных условиях (с использованием метода Фурье;

- рассмотрения различных способов задания управляющих воздействий (в виде отрезков ряда Фурье и в виде кубического сплайна);

- проведения вычислительных экспериментов для разных параметров процесса оптимального управления конечным температурным состоянием однородного поля реактора.

Имеется однородное пространство реактора $0 \leq x \leq L$ с теплоизолированной боковой поверхностью (внутренние источники тепла отсутствуют) и с заданным температурным режимом на его концах. Через $u = u(x, t)$ обозначим температуру реактора в точке x в момент времени t .

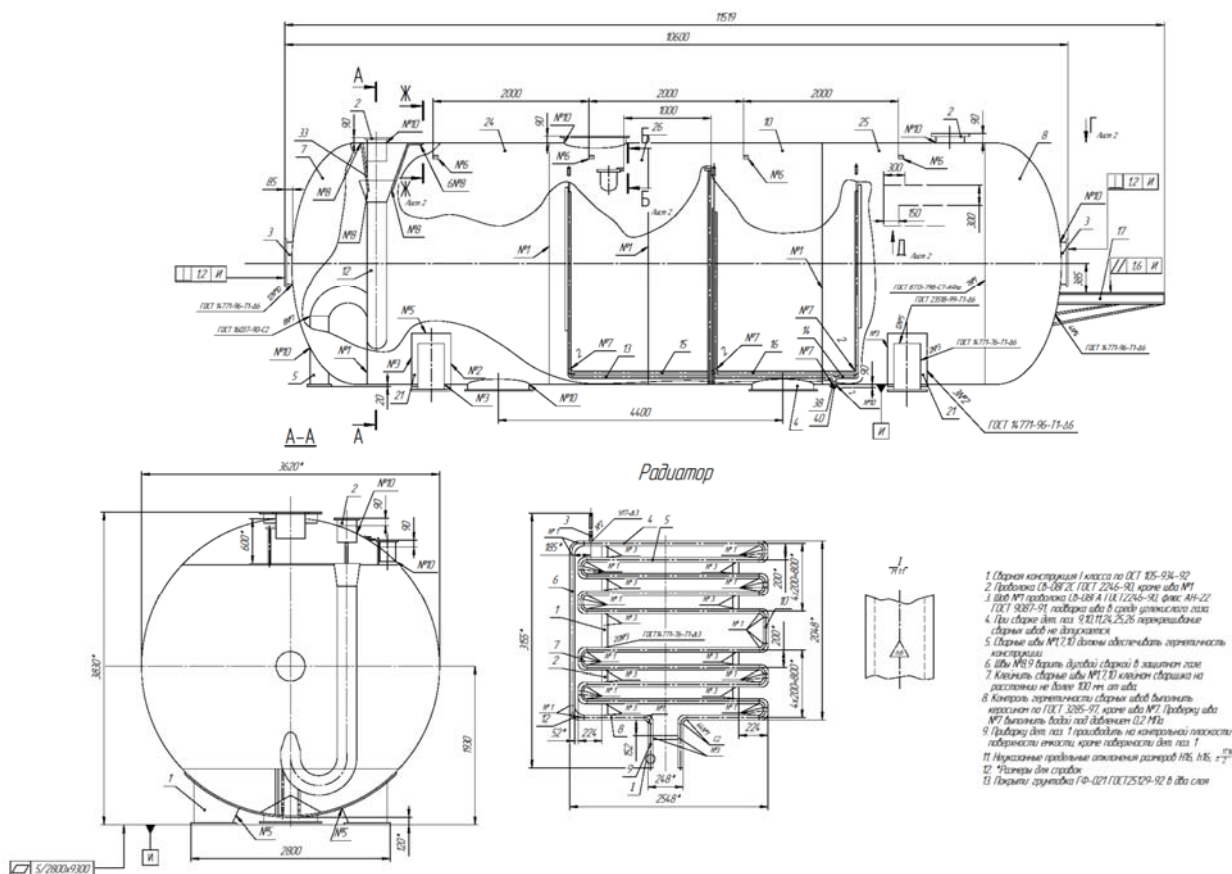


Рисунок 4. Емкость метантенка (сборочный чертеж)

При рассмотрении данного вопроса мы исходили из конструктивных параметров установки, которая включает несколько горизонтальных реакторов емкостью 75 м³, разделенных вертикальными перегородками на четыре секции. Перегородки смонтированы таким образом, что загружаемая масса от первой до четвертой секции проходит по синусоиде. Трубопроводы для подогрева сбраживаемой массы смонтированы на конечных перегородках с целью создания краевых и начальных условий. Боковые поверхности реактора теплоизолированы, внутренних источников подогрева нет.

Система ректора характеризуется несколькими параметрами, распределенными в пространстве и времени.

$U = U(t, x, y, z)$ – температура в точке с координатами (x, y, z) в момент времени t .

P – это температура, которой нужно добиться.

Температура в точке с координатами (x, y, z) принадлежит области от 0 до T : $U \in [0; T] \times R^3$.

Задана область объема $V \in R^3$ с границей Γ . Внутри объема V задана связная область, принадлежащая этому объему $\gamma \in V$.

Особенностью мезофильного, термотолерантного и термофильного процессов является распространение тепла в ходе брожения навозного субстрата. Для математического моделирования принято использовать краевые задачи математической физики, а уравнение определять функционалом специального вида, структура которого зависит от целей управления.

$$f(x, y, z) = \begin{cases} 1, & \text{если } (x, y, z) \in \gamma \\ 0, & \text{если } (x, y, z) \notin \gamma \end{cases} \quad (25)$$

Динамика системы задается параболическим уравнением вида:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) + c(t)f(x, y, z) \quad (26)$$

с начальными условиями (ζ начальное распределение температур)

$$U(0, x, y, z) = \varphi(x, y, z) \quad (27)$$

и граничными условиями третьего рода (теплообмен с окружающей средой).

Управление системой со временем (t) принадлежит к классу кусочно – постоянных в диапазоне $[0; T]$ функций.

$$Y(U) = \int_0^T \int_{\Gamma} (U(t, x, y, z) - P)^2 d\sigma \cdot dt \rightarrow \min, \quad (28)$$

где Γ – граница элементарного эллиптического объема.

$$x^2 + y^2 = R^2. \quad 0 < h \in h, \quad (29)$$

где h – расстояние между перегородками.

Решением интеграла является:

$$\begin{aligned} & \int_0^1 \int_{\Gamma} (U(t, x, y, z) - P)^2 d\sigma \cdot dt \rightarrow \\ & \rightarrow \int_0^1 \sigma \cdot (P\sigma) \cdot \int_{\Gamma} (P - U(t, x, y, z))^2 \cdot dt \rightarrow \\ & \rightarrow \sigma \cdot \left(P^2 t + \int U(t, x, y, z)^2 - 2 \cdot P \cdot U(t, x, y, z) dt \right) \rightarrow \\ & \rightarrow \int_0^1 \sigma U(P - U(t, x, y, z))^2 \cdot dt \rightarrow \int_0^1 \sigma U(P - U(t, x, y, z))^2 \cdot dt \end{aligned} \quad (30)$$

Пусть $u|_{t=0} = \varphi(x)$, $0 \leq x \leq L$ распределение температуры в реакторе в начальный момент времени - $t = 0$.

Требуется, управляя температурным режимом на торцах реактора, к заданному моменту времени $T > 0$ распределение температуры в реакторе сделать как можно более близким к заданному распределению температур $y(x)$, $0 \leq x \leq L$.

Формальная постановка задачи оптимального управления конечным температурным состоянием реактора имеет вид:

минимизировать функционал

$$J(\mu) = \|u(x, T; \mu) - y(x)\|_{L_2(0, L)}^2 = \int_0^L (u(x, T; \mu) - y(x))^2 dx \quad (31)$$

при условии, что $u = u(x, t) = u(x, t; \mu)$ является решением начально-краевой задачи :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq L, \quad t > 0 \quad (32)$$

$$u|_{t=0} = \varphi(x), \quad 0 \leq x \leq L. \quad (33)$$

$$\left(-\alpha_1 \frac{\partial u}{\partial x} + \beta_1 u \right) \Big|_{x=0} = \mu_1(t), \quad t \geq 0, \quad (34)$$

$$\left(\alpha_2 \frac{\partial u}{\partial x} + \beta_2 u \right) \Big|_{x=L} = \mu_2(t), \quad t \geq 0, \quad (35)$$

где a^2 , L , α_1 , α_2 , β_1 , β_2 – заданные положительные константы, $\varphi(x)$ – заданная функция из $L_2(0, L)$.

В уравнении (8) $a^2 = \frac{k}{\rho c}$ – коэффициент температуропроводности сбраживаемого материала в реакторе;

ρ – плотность материала; c – удельная массовая теплоемкость; k – коэффициент теплопроводности сбраживаемого материала.

Предполагается, что $\mu = (\mu_1(t), \mu_2(t))$ – управление, принадлежащее множеству

$$M = \{ \mu = (\mu_1(t), \mu_2(t)) \in L_2(0, T) \times L_2(0, T), \quad \mu_1^{\min} \leq \mu_1(t) \leq \mu_1^{\max}, \mu_2^{\min} \leq \mu_2(t) \leq \mu_2^{\max} \} \quad (36)$$

почти всюду на $[0, T]$, где $\mu_1^{\min} < \mu_1^{\max}, \mu_2^{\min} < \mu_2^{\max}$.

Возможны также и другие ограничения, накладываемые на управление μ ²⁶.

Исследование разрешимости задачи (32)-(36) проводится аналогично схеме, приведенной в работе²⁷.

Сначала получим решение задачи (32)-(35) методом Фурье. Сделаем замену

$$u(x, t) = w(x, t) + v(x, t), \quad (37)$$

где $v(x, t)$ новая неизвестная функция а:

$$w(x, t) = \frac{x^2}{2\alpha_2 L + \beta_2 L^2} \mu_2(t) + \frac{(x-L)^2}{2\alpha_1 L + \beta_1 L^2} \mu_1(t). \quad (38)$$

Функция $w(x, t)$ выбрана так, чтобы удовлетворять неоднородным краевым условиям (34)-(35)

Тогда для функции $v(x, t)$ получим начально-краевую задачу с однородными краевыми условиями²⁸:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = f(x, t), \quad 0 < x < L, \quad t > 0 \quad (39)$$

$$v_{t=0} = \psi(x), \quad 0 \leq x \leq L \quad (40)$$

$$\left(-\alpha_1 \frac{\partial v}{\partial x} + \beta_1 v \right) \Big|_{x=0} = 0, \quad t \geq 0, \quad (41)$$

$$\left(\alpha_2 \frac{\partial v}{\partial x} + \beta_2 v \right) \Big|_{x=L} = 0, \quad t \geq 0, \quad (42)$$

где

$$f(x, t) = a^2 \left(\frac{2}{2\alpha_2 L + \beta_2 L^2} \mu_2(t) + \frac{2}{2\alpha_1 L + \beta_1 L^2} \mu_1(t) \right) - \frac{x^2}{2\alpha_2 L + \beta_2 L^2} \mu_2'(t) - \frac{(x-L)^2}{2\alpha_1 L + \beta_1 L^2} \mu_1'(t), \quad (43)$$

²⁶ Антонов Ю. М. Основные аспекты энергосбережения в сельском хозяйстве// Энергосбережение в сельском хозяйстве. – М.,1998. – ч.1. – с. 44–46; Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука,1965. 474 с.

²⁷ Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1965. 474 с.

²⁸ Вабишевич П.Н. Вычислительные методы математической физики. Обратные задачи и задачи управления. М.: Вузовская книга, 2009. 268 с

$$\psi(x) = \varphi(x) - \frac{x^2}{2\alpha_2 L + \beta_2 L^2} \mu_2(0) - \frac{(x-L)^2}{2\alpha_1 L + \beta_1 L^2} \mu_1(0). \quad (44)$$

Собственные значения задачи (39)-(42) есть [34] $\lambda_n = \lambda_n = \left(\frac{\xi_i}{I} \right)^2, n = 1, 2,$

..., где ξ_i -n-й положительный корень трансцендентного уравнения

$$\operatorname{ctg} \xi = \frac{\alpha_1 \alpha_2 \xi^2 - \beta_1 \beta_2 L^2}{(\alpha_1 \beta_2 I + \alpha_2 \beta_1 L) \xi}, \quad (45)$$

а соответствующие им собственные функции $\Phi_n(x)$ имеют вид²⁹:

$$\Phi_n(x) = \sin(\sqrt{\lambda_i} x + \Theta_n),$$

$$\text{где } \Theta_n = \operatorname{arctg} \frac{\alpha_1 \sqrt{\lambda_i}}{\beta_1}.$$

$$\text{кроме того } \|\Phi_n\|_{L_2(0,L)}^2 = \frac{L}{2} \left\{ 1 + \frac{(\alpha_1 \alpha_2 \xi_i^2 + \beta_1 \beta_2 L^2)(\alpha_1 \beta_2 L + \alpha_2 \beta_1 L)}{(\alpha_1^2 \xi_i^2 + \beta_1^2 L^2)(\alpha_2^2 \xi_i^2 + \beta_2^2 L^2)} \right\}.$$

Тогда решение задачи(39)-(42) находится в виде ряда (46):

$$v(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(t) \Phi_n(x). \quad (46)$$

Подставив ряд (46) в уравнение (39) и начальное условие (40), получим, что функции $T_n(t), n = 1, 2, \dots$, являются уравнением задач Коши:

$$T'_n(t) + \lambda_n a^2 T_n(t) = f_n(t),$$

$$T_n(0) = \psi_n$$

где

$$\psi_n = \frac{(\psi, \Phi_i)_{L_2(0,L)}}{\|\Phi_n\|_{L_2(0,L)}^2}, \quad (47)$$

$$f_n(t) = \frac{(f, \Phi_i)_{L_2(0,L)}}{\|\Phi_n\|_{L_2(0,L)}^2} \quad (48)$$

и имеют вид:

$$T_n(t) = \psi_n e^{-\lambda_n a^2 t} + \int_0^t f_n(\tau) e^{-\lambda_n a^2 (t-\tau)} d\tau, n = 1, 2, \dots \quad (49)$$

²⁹ Там же.

С учетом (38), (44) и (49) решение задачи (32)-(35) имеет вид:

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n e^{-\lambda_n a^2 t} \Phi_n(x) + \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^t f_n(\tau) e^{-\lambda_n a^2 (t-\tau)} d\tau \cdot \Phi_n(x) + \frac{x^2}{2\alpha_2 L + \beta_2 L^2} \mu_2(t) + \frac{(x-L)^2}{2\alpha_1 L + \beta_1 L^2} \mu_1(t). \quad (50)$$

Аппроксимацию функций $\mu_1(t), \mu_2(t)$ находим в виде

$$\mu_1(t) = \sum_{k=1}^{m_1} q_k Q_k(t), \mu_2(t) = \sum_{j=1}^{m_2} r_j R_j(t), \quad (51)$$

где $\{Q_k\}, \{R_j\}$ - системы базисных функций в $L_2(0, T)$.

В этом случае

$$\begin{aligned} \psi(x) &= \varphi(x) - \frac{x^2}{2\alpha_2 L + \beta_2 L^2} \sum_{j=1}^{m_2} r_j R_j(0) - \frac{(x-L)^2}{2\alpha_1 L + \beta_1 L^2} \sum_{k=1}^{m_1} q_k Q_k(0) \\ f(x, t) &= a^2 \left(\frac{2}{2\alpha_2 L + \beta_2 L^2} \sum_{j=1}^{m_2} r_j R_j(t) + \frac{2}{2\alpha_1 L + \beta_1 L^2} \sum_{k=1}^{m_1} q_k Q_k(t) \right) - \\ &- \frac{x^2}{2\alpha_2 L + \beta_2 L^2} \sum_{j=1}^{m_2} r_j R'_j(t) - \frac{(x-L)^2}{2\alpha_1 L + \beta_1 L^2} \sum_{k=1}^{m_1} q_k Q'_k(t) \end{aligned}$$

Тогда

$$\psi_n = \frac{1}{\|\Phi_n\|_{L_2(0, L)}^2} \left(\int_0^L \varphi(\xi) \Phi_n(\xi) d\xi - \sum_{j=1}^{m_2} r_j \frac{R_j(0)}{2\alpha_2 L + \beta_2 L^2} \int_0^L \xi^2 \Phi_n(\xi) d\xi - \sum_{k=1}^{m_1} q_k \frac{Q_k(0)}{2\alpha_1 L + \beta_1 L^2} \int_0^L (\xi-L)^2 \Phi_n(\xi) d\xi \right), n=1, 2, \dots, \quad (52)$$

$$f_n(t) = \frac{1}{\|\Phi_n\|_{L_2(0, L)}^2} \left(\sum_{j=1}^{m_2} r_j R_j(t) \frac{2a^2}{2\alpha_2 L + \beta_2 L^2} \int_0^L \Phi_n(\xi) d\xi + \sum_{k=1}^{m_1} q_k Q_k(t) \frac{2a^2}{2\alpha_1 L + \beta_1 L^2} \int_0^L \Phi_n(\xi) d\xi - \sum_{j=1}^{m_2} r_j R'_j(t) \frac{1}{2\alpha_2 L + \beta_2 L^2} \int_0^L \xi^2 \Phi_n(\xi) d\xi - \sum_{k=1}^{m_1} q_k Q'_k(t) \frac{1}{2\alpha_1 L + \beta_1 L^2} \int_0^L (\xi-L)^2 \Phi_n(\xi) d\xi \right), n=1, 2, \dots \quad (53)$$

Подставив (27)-(29) в (26) и вычислив полученную функцию при $t=T$, получим

$$u(x, T) = \sum_{k=1}^{m_1} q_k A_k(\tilde{o}) + \sum_{j=1}^{m_2} r_j B_j(x) + C(x), \quad (54)$$

где

$$A_k(x) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\Phi_n(x)}{\|\Phi_n\|_{L_2(0,L)}^2} \times \frac{1}{2\alpha_1 L + \beta_1 L^2} \times$$

$$\times \left[-Q_k(0) \int_0^L (\xi - L)^2 \Phi_n(\xi) d\xi \cdot e^{-\lambda_n a^2 T} + \right.$$

$$\left. + 2a^2 \int_0^L \Phi_n(\xi) d\xi \int_0^T Q_k(\tau) e^{-\lambda_n a^2 (T-\tau)} d\tau - \right.$$

$$\left. - \int_0^L (\xi - L)^2 \Phi_n(\xi) d\xi \int_0^T Q'_k(\tau) e^{-\lambda_n a^2 (T-\tau)} d\tau \right] +$$

$$+ (x - L)^2 Q_k(T), k = \overline{1, m_1}, \quad (55)$$

$$B_j(x) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\Phi_n(x)}{\|\Phi_n\|_{L_2(0,L)}^2} \times \frac{1}{2\alpha_2 L + \beta_2 L^2} \times$$

$$\times \left[-R_j(0) \int_0^L \xi^2 \Phi_n(\xi) d\xi \cdot e^{-\lambda_n a^2 T} + \right.$$

$$\left. + 2a^2 \int_0^L \Phi_n(\xi) d\xi \int_0^T R_j(\tau) e^{-\lambda_n a^2 (T-\tau)} d\tau - \right.$$

$$\left. - \int_0^L \xi^2 \Phi_n(\xi) d\xi \int_0^T R'_j(\tau) e^{-\lambda_n a^2 (T-\tau)} d\tau \right] + x^2 R_j(T), j = \overline{1, m_2}, \quad (56)$$

$$C(x) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\Phi_n(x)}{\|\Phi_n\|_{L_2(0,L)}^2} \int_0^L \varphi(\xi) \Phi_n(\xi) d\xi \cdot e^{-\lambda_n a^2 T}. \quad (57)$$

Таким образом, задача оптимального управления конечным температурным режимом нагревания однородной среды (31)-(36) сводится к задаче оптимизации:

$$J(\mu) = \int_0^L \left(\sum_{k=1}^{m_1} q_k A_k(x) + \sum_{j=1}^{m_2} r_j B_j(x) + C(x) - y(x) \right)^2 dx =$$

$$\sum_{k=1}^{m_1} q_k^2 \delta_k^{(1)} + \sum_{j=1}^{m_2} r_j^2 \delta_j^{(2)} + 2 \sum_{k=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{m_2} q_k r_j \gamma_{kj} + 2 \sum_{k=1}^{m_1} q_k \sigma_k^{(1)} + 2 \sum_{j=1}^{m_2} r_j \sigma_j^{(2)} + \eta \rightarrow \min_{q_k, k=1, m_1, r_j, j=1, m_2} \quad (58)$$

где

$$\gamma_{kj} = \int_0^L A_k(x) B_j(x) dx, \quad k = \overline{1, m_1}, \quad j = \overline{1, m_2},$$

$$\delta_k^{(1)} = \int_0^L A_k^2(x) dx, \quad k = \overline{1, m_1},$$

$$\delta_j^{(2)} = \int_0^L B_j^2(x) dx, \quad j = \overline{1, m_2},$$

$$\sigma_k^{(1)} = \int_0^L A_k(x) (C(x) - y(x)) dx, \quad k = \overline{1, m_1},$$

$$\sigma_j^{(2)} = \int_0^L B_j(x) (C(x) - y(x)) dx, \quad j = \overline{1, m_2},$$

$$\eta = \int_0^L (C(x) - y(x))^2 dx.$$

Задачу оптимизации (58) нужно дополнить ограничениями на управление (36) или другими³⁰.

Для проведения вычислительного эксперимента в задаче (31)-(36) при разных значениях m были выбраны следующие значения параметров: $L=1$; $a=1$; $T=1$.

Начальное значение температуры в реакторе $\varphi(X) = 0$.

Функция $\mu_1(t)$ считается заданной, поэтому управление μ заключается в определении функции $\mu_2(t)$

Управление $\mu_2(t)$ определяется в виде отрезка ряда Фурье:

$$\mu_2(t) = v_{20} + \sum_{k=1}^m \mu_{2k} \sin \frac{\pi k t}{T} + \sum_{k=1}^m v_{2k} \cos \frac{\pi k t}{T}; \quad (59)$$

или кубического сплайна:

³⁰ Антонов Ю. М. Основные аспекты энергосбережения в сельском хозяйстве // Энергосбережение в сельском хозяйстве. – М., 1998. – ч.1. – с. 44–46; Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1965. 474 с.

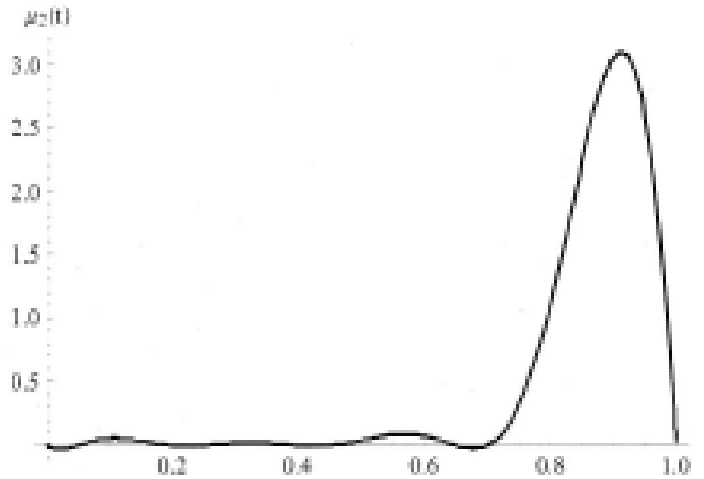


Рисунок 5. График функции $\mu_2(t)$ оптимального управления тепловым потоком в правой части секции реактора

$$\mu_2(t) = \sum_{k=1}^{m+1} r_k B_3 \left(\frac{t}{\tau} - \kappa \right), \quad (60)$$

где

$$B_3(Z) = \frac{1}{4} \left[(Z+2)_+^3 - 4(Z+1)_+^3 + 6(Z)_+^3 - 4(Z-1)_+^3 + (Z-2)_+^3 \right],$$

$$\begin{cases} (f(z))_+ = \begin{cases} f(z) \geq 0, \\ 0, f(z) < 0, \end{cases} & \tau = \frac{T}{m}. \end{cases}$$

На управление $\mu_2(t)$ накладываются следующие ограничения: $\mu_2(0) = 0$.

$$0 \leq \mu_2(t) \leq 10, \quad t \in (0, T].$$

Пусть левая часть выбранного сектора реактора (метантенка) теплоизолирована, а управление заключается в задании при $t \in (0, T]$ теплового потока в правой части сектора.

Этот случай соответствует следующим значениям параметров в краевых условиях (34)-(35): $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 1, \beta_1 = 0, \beta_2 = 0$.

Функция $\mu_1(t)$ известна: $\mu_1(t) = 0$.

В этом случае собственные значения $\lambda_0 = 0, \lambda_n = \left(\frac{\pi n}{L} \right)^2, \quad n = 1, 2, \dots$, а

собственные функции $\Phi_0(x) = 1, \quad \Phi_n(x) = \cos \frac{\pi n x}{L}, \quad n = 1, 2, \dots$

На рисунке 5 приведен график функции $\mu_2(t)$ оптимального управления тепловым потоком в правой части секции реактора вида (59) для $m=5$, а на

рисунке 6 соответствующий этому случаю модуль разности желаемой $y(x) = x$ и фактической $u(x, T)$ температур в конечный момент времени $T=1$.

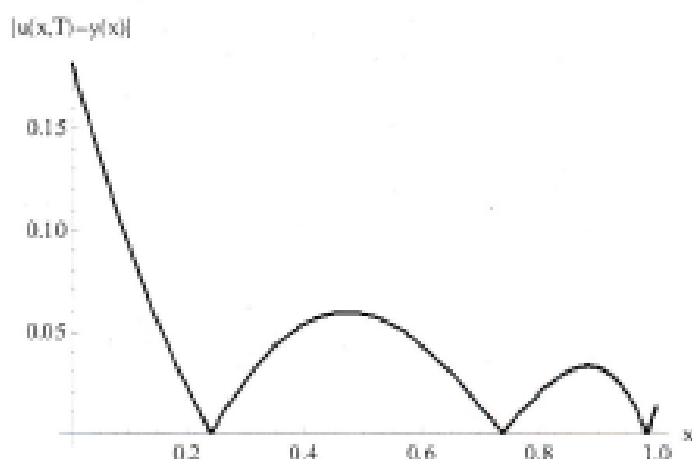


Рисунок 6. График модуля разности желаемой и фактической температур

При этом $\|u(x, T) - y(x)\|_{L_2(0, L)} = 0.57 \cdot 10^{-1}$.

На рисунке 5 приведен график функции $\mu_2(t)$ оптимального управления тепловым потоком в правой части выбранного сектора реактора вида (60) для $m=10$, а на рисунке 6 – соответствующий этому случаю модуль разности желаемой $y(x)=x$ и фактической $u(x, T)$ температур в конечный момент времени $T=1$.

При этом $\|u(x, T) - y(x)\|_{L_2(0, L)} = 0.48 \cdot 10^{-1}$.

Выводы

1. Биогазовые установки промышленного типа должны соответствовать условию оптимального баланса между производимым и потребляемым теплом (рисунок 3).

2. С позиции сеточных методов предлагается конструирование неявной схемы с простейшим видом интерполяции дискретной предыстории модели – кусочно - постоянной интерполяции и исследуется ее порядок сходимости.

3. Свойства решения уравнений устойчивости системы реализуются по виду диагональных коэффициентов для бесконечной системы дифференциальных уравнений треугольной формы при постоянном запаздывании аргумента.

4. Для метантенков (рисунок 3) следует учесть эффект регулирования. Неучет этого эффекта может вызвать значительную погрешность в тепловых расчетах режимов работы установок БГУ.

5. Предложен метод построения оптимального управления конечным температурным состоянием однородной среды реактора БГУ. При этом аппроксимируются управляющие функции отрезком ряда Фурье или кубическим сплайном. При использовании различных типов аппроксимации сохраняется структура управления оптимальным нагревом однородной среды $\mu_2(t)$. В предложенном методе начальная краевая задача для температуры решается аналитически и оптимальное управление находится в аналитическом виде.

6. Для выбора типа аппроксимации управляющего воздействия используются технические возможности процесса переработки субстрата сырья в реакторе БГУ. В этом состоят полученные научная и практическая значимости результатов оптимального управления конечным температурным состоянием перерабатываемой среды.

МОНИТОРИНГ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Т.Е. Гаранина – ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет», Институт электроэнергетики и электроники

И.Д. Загустина – старший преподаватель ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет»

Аннотация

В данной статье рассматриваются методы мониторинга линий электропередачи, рассматриваются проблемы, связанные с мониторингом ЛЭП и предлагаются пути их решения.

Мониторинг ЛЭП необходим для получения своевременной информации о техническом состоянии линий, для того чтобы выявлять неисправности оборудования. В обследование линий входят: осмотр опор и их фундамента, проводов, грозозащитных тросов, линейной арматуры, заземляющих устройств, изоляции¹.

Мониторинг ЛЭП можно проводить дистанционно с помощью беспилотных летательных аппаратов (далее БПЛА), а также традиционным способом, который включает в себя визуальный осмотр с подъёмом на опоры и без него. Однако этот метод имеет ряд недостатков, таких как:

- 1) сложность обследования труднодоступных и протяженных участков;
- 2) большие затраты времени;
- 3) риски для рабочего персонала во время полевых работ.

Решить все эти проблемы можно используя БПЛА. Например, осмотр труднодоступного участка ЛЭП в лесной местности по земле может занять несколько суток, в то время как БПЛА справится с этой задачей всего за пару часов. Также с помощью БПЛА можно решить ряд других задач:

- 1) БПЛА проводят аэрофотосъёмку опор и линий электропередачи, что позволяет в кратчайшие сроки определить нарушения в работе технического оборудования;

¹ Валиев А.В. Дистанционная диагностика воздушных линий при помощи беспилотных летательных аппаратов // Сб. докл. на VII науч.-практич. семинаре Общественного совета специалистов по диагностике электрических установок. – Хабаровск, 2012. С. 33–38.

2) С помощью БПЛА можно провести съёмку новых маршрутов на которых предполагается строительство ЛЭП, а также съёмку близлежащих территорий и земель;

3) С помощью БПЛА можно создать цифровую модель рельефа местности, где предполагается строительство ЛЭП;

4) Используя БПЛА можно спрогнозировать и смоделировать влияние природных и климатических воздействий на техническое оборудование линий электропередач².

Сейчас проблема ранней диагностики нарушений в работе ЛЭП стоит очень остро. Специалистам нужно на ранней стадии узнавать о проблеме, чтобы своевременно решить её не приводя к отключению линии от работы. Это кроме всего прочего будет нести и положительный экономический эффект, ведь не нужно будет тратиться на замену сломанного оборудования, а также на заработную плату рабочего персонала. Из всего этого следует, что мониторинг линий электропередач является основным элементом при эксплуатации ЛЭП.

Кроме всего прочего нельзя не отметить тот факт, что современные технологии в этой области развиваются с невероятной скоростью, а, значит, использование беспилотников с каждым годом будет всё выгоднее и информация, которую будут получать специалисты, будет всё более точной и информативной.

Применение БПЛА в мониторинге ЛЭП позволяет получить фото- и видеоматериалы высокого качества в краткие сроки и быстро провести анализ электрической сети, а в будущем и спрогнозировать возможные проблемы. Эта технология будет продолжать развиваться и совершенствоваться, что будет приводить к всё более точным результатам исследования.

² Попов Н.И., Емельянова О.В. Динамические особенности мониторинга воздушных линий электропередачи с помощью квадрокоптера // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2.

ПРОБЛЕМЫ И ОПТИМИЗАЦИИ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

В.Ю.Авдеева – ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет», Институт электроэнергетики и электроники

И.Д. Загустина – старший преподаватель ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет»

Аннотация

В данной статье рассматриваются проблемы потерь электроэнергии в системах электропотребления, а также рассматриваются мероприятия, направленным на экономию электроэнергии потребителей.

В условиях дефицита генерирующих мощностей весьма актуальной представляется проблема разработки различного рода мероприятий, направленных на экономию электроэнергии непосредственно у потребителей¹.

В электрических сетях при передаче электроэнергии от источников к потребителям часть ее расходуется на нагрев проводников, создание электромагнитных полей и прочие эффекты. Потери электроэнергии зависят от параметров режима и схемы электрической сети, определяются несовершенством системы учета, неравномерностью оплаты, хищениями и т.д.

С целью повышения эффективности электропотребления необходимо внедрять мероприятия как:

К таким мероприятиям можно отнести следующие:

1. Замена морально и физически устаревшего оборудования на современное, с более высокими техническими и экономическими параметрами, например, применение оборудования с более высокими КПД.
2. Максимальная разгрузка линий электропередачи от потоков реактивной мощности за счёт установки компенсирующих устройств непосредственно у потребителей².

¹ Положение о технической политике в распределительном электросетевом комплексе. –М.: ОАО «РОСЭП», 2006.

² Промышленная Энергетика. – 2013 – № 04. – С. 48–53

3. Применение гибких тарифов при оплате за потребляемую электроэнергию.

4. Оптимизация режимов работы электрооборудования у потребителей и режимов работы распределительных сетей, исходя из минимума потерь электроэнергии.

5. Ограничение времени работы недогруженного оборудования.

6. Снижение расхода электроэнергии на «собственные нужды» электроустановок.

7. Регулирование напряжения в линиях электропередачи.

8. Внедрение автоматизации и дистанционного управления электрическими распределительными сетями напряжением 6-20 кВ.

Все эти мероприятия достаточно известны и в разной степени используются в проектной и эксплуатационной практике. Однако при разработке и внедрении этих мероприятий далеко ещё не исчерпаны все возможности, позволяющие экономить электроэнергию.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ КОПТИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

Р.В. Банин – к.т.н., Южно-Уральский государственный аграрный университет

В.В. Селунский – к.т.н., Южно-Уральский государственный аграрный университет

М.Р. Атабаев – студент ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

Аннотация

В данной статье разработана частная технология производства пеляди холодного копчения весом 200...220 г из свежельовленного сырья с использованием электростатической коптильной установки и выбрано необходимое технологическое оборудование для сезонного коптильного пункта, произведены расчеты мощности, расхода электроэнергии и энергоемкости копчения рыбы.

Копченые рыбные продукты высокого качества получаютс при использовании для их производства свежего полуфабриката. В идеальном варианте при производстве копченой рыбы её обработку необходимо начинать сразу после вылова, точнее, после окончания стадии посмертного окоченения. Однако организация постоянно действующих рыбоперерабатывающих предприятий вблизи мест вылова рыбы нецелесообразна из-за сезонности вылова рыбы, а также из-за отсутствия в большинстве случаев на месте лова необходимых коммуникаций. Кроме того, при традиционном способе производства копченых продуктов, особенно при холодном копчении процесс значительно затягивается (до 2...3 суток), что также вызывает определенные трудности.

Задача по сокращению времени между выловом и переработкой рыбы может быть решена путем организации на месте её вылова сезонного пункта переработки рыбы с использованием технологии электростатического копчения. Изобретателями этого способа копчения являются М. И. Калитина и А. А. Калитин, которые предложили новую схему копчения в поле токов высокого напряжения³. Электростатическое копчение, как и традиционное копчение, может осуществляться как горячим, так и холодным способами.

³ Воскресенский Н.А., Логунов Л.Л. Технология рыбных продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1968. 424 с.

При горячем копчении температура коптильной среды превышает + 80 °С (80 – 170 °С). Белки при такой температуре полностью денатурируют (провариваются), а ферменты теряют свою активность. Продукция имеет невысокую соленость (1,5 – 4%) и прокопченость, относительно высокую влажность (60% и более). Готовность продукта при горячем копчении достигается за счет высоких температур процесса. Иногда горячее копчение называют «проваркой в дыму».

При холодном копчении температура коптильной среды не должна превышать + 40 °С для того, чтобы белки и ферменты в такой продукции не потеряли нативных свойств (не были денатурированы). Готовность продукта при холодном копчении достигается за счет комплексного действия следующих факторов:

- 1) действия на ткани продукта поваренной соли (при холодном копчении содержание соли составляет 3 – 8%);
- 2) действия на ткани продукта коптильных препаратов;
- 3) обезвоживания;
- 4) действия ферментов.

Рыбу лососевых пород, имеющих относительно высокую жирность мяса, коптить необходимо при температуре 18...20°С, так как копчение при более высокой температуре вызывает снижение качества рыбы. Частиковые рыбы (лещ, пелядь, сазан и др.) можно коптить при более высокой температуре – 28...30°С⁴.

Нами опробован и предлагается к применению способ холодного копчения рыбы в полевых условиях с использованием установки электростатического копчения УЭК-1 «ИДИЛЛИЯ», производства Северодвинского завода «Полярная звезда». Подобные установки позволяют значительно сокращать время производства копченых продуктов. Они имеют относительно небольшую электрическую мощность (максимальная потребляемая мощность установки УЭК-1 не превышает 540 Вт⁵), что позволяет, при необходимости, подключать их к автономным источникам электроэнергии, например, к переносным или передвижным электростанциям.

⁴ Там же.

⁵ Устройство электростатического копчения УЭК – 1 «ИДИЛЛИЯ». Руководство по эксплуатации. – Северодвинск, 2013. 64 с.

Нами была разработана частная технологическая схема производства копченой рыбы из свежевывловленного сырья с использованием установки электростатического копчения (в качестве сырья использовалась свежевывловленная пелядь, весом 200...220 г.). Выбор именно этого вида рыбы был обусловлен тем, что в местных водоемах региона Южного Урала вылавливается достаточное количество пеляди. Кроме этого данная рыба, в том числе и копченая, пользуется повышенным спросом на местном пищевом рынке⁶.



Рисунок 1. Частная технологическая схема производства рыбы холодного копчения (пеляди весом 200...220 г)

⁶ Абдрафиков С.Н., Селунский В.В. Производство рыбопродуктов. – Челябинск: ЧГАУ, 2002. 280 с.

После вылова поверхность рыбы покрыта слизью, которая выделяется еще некоторое время и после смерти рыбы. Для получения продукта лучшего качества желательно начинать обработку рыбы после окончания выделения слизи. Это время для пеляди можно принимать от 2 до 4 часов в зависимости от температуры окружающей среды.

Рыбу небольших и средних размеров нежелательно разделять при подготовке её к копчению, это увеличивает трудоемкость подготовки продукта и уменьшает выход продукта. Поэтому после окончания отделения слизи рыбу необходимо промыть и направить на посол. Для пеляди некрупных размеров целесообразней использовать смешанный способ посола, позволяющий получать одинаково и равномерно просоленные партии рыбы. В емкость для посола заливают насыщенный солевой раствор плотностью 1,18...1,20 г/см³ в количестве 20...30% к массе рыбы. После этого рыбу загружают в емкость небольшими порциями, равномерно распределяя ее по всей поверхности посольной емкости и посыпая по слоям солью. По мере заполнения посольной емкости количество насыпаемой на рыбу соли увеличивают. Поверх уложенной рыбы насыпают сплошной слой соли толщиной 1-2 см и помещают легкий груз. Расход соли составляет 18...25% к массе рыбы. Продолжительность посола неразделанной пеляди весом 200...220 г – 16...18 часов, после чего содержание соли в мясе рыбы достигает 6...7%. По окончании посола необходимо производить отмочку рыбы в течение 1,5...2,0 часов в непроточной воде с её 2-х кратной заменой. Отмачивают рыбу в чанах (ваннах) на дно которых укладывают ложное решетчатое дно, сделанное из деревянных реек, под которое собираются смыаемые с рыбы загрязнения. Затем рыба выдерживается 1,5...2,0 часа на решетках, для стекания воды и выравнивания концентрации соли в мясе. Содержание соли в рыбе при этом становится равным 4...5 %, что соответствует требованиям ГОСТ к готовому продукту⁷. Предварительный пересол рыбы выше нормы с последующей отмочкой позволяет уплотнить мясо рыбы, ускоряет её созревание при последующей обработке, улучшает вкус и повышает сохранность готового продукта⁸.

⁷ Рыба и рыбные продукты. Рыба копченая, вяленая и сушеная // Государственные стандарты. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1997. 154 с.

⁸ Воскресенский Н.А., Логунов Л.Л. Технология рыбных продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1968. 424 с.; Рыба и рыбные продукты. Рыба копченая, вяленая и сушеная // Государственные стандарты. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1997. 154 с.

Перед копчением рыбу необходимо подсушить (подвялить). Подсушивают рыбу для удаления из нее излишней воды и подготовки ее поверхности к осаждению дыма. На её поверхности не должно быть капельной влаги, однако она не должна быть пересушенной, а оставаться слегка влажной «на ощупь». Подсушка пеляди весом 200...220 г должна продолжаться в естественных условиях от 4 до 8 часов в зависимости от температуры окружающей среды. Подготовленная таким образом рыба помещается в коптильную камеру установки электростатического копчения.

В процессе проведенных экспериментальных исследований было установлено, что процесс дымовой обработки рыбы (пеляди, весом 200...220 г.) в установке электростатического копчения составлял 17...18 минут⁹. К моменту окончания копчения рыба еще не была готова к употреблению ее в пищу, так как в ней, из-за кратковременности дымовой обработки, не успевали произойти автолитические процессы созревания, приводящие к готовности продукта¹⁰. Кроме того, влажность рыбы при этом составляла 73...78 %, что больше нормативных требований к копченым рыбным продуктам¹¹.

Для получения высокого качества продукта необходимо выдержать рыбу в течение 2...3 суток в естественных условиях для обеспечения процесса внутреннего переноса коптильных веществ вглубь продукта, что целесообразно совмещать с процессом сушки. Сушка (созревание) пеляди производилась в наших опытах при температуре не выше +20°C. После сушки (созревания) продукт приобретал хороший товарный вид и высокие вкусовые качества. Рыбу холодного копчения, произведенную по представленной технологии, можно хранить в течение не более 2 месяцев при температуре 0...5°C и относительной влажности на уровне 75...80%¹².

Для организации сезонного пункта копчения рыбы требуется следующее основное технологическое оборудование.

1. Установка электростатического копчения УЭК-1 «ИДИЛЛИЯ» – 1 шт.

⁹ Селунский В. В., Чурин В. Ю. Повышение эффективности установки электростатического копчения // Вестник КрасГАУ. – 2012. – № 1. – С. 182–187.

¹⁰ Воскресенский Н. А., Логунов Л. Л. Технология рыбных продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1968. 424 с.; Селунский В. В., Чурин В. Ю. Повышение эффективности установки электростатического копчения // Вестник КрасГАУ. – 2012. – № 1. – С. 182–187.

¹¹ Рыба и рыбные продукты. Рыба копченая, вяленая и сушеная // Государственные стандарты. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1997. 154 с.

¹² Устройство электростатического копчения УЭК – 1 «ИДИЛЛИЯ». Руководство по эксплуатации. – Северодвинск, 2013. 64 с.

2. Морозильная камера для охлаждения рассола и воды – 1 шт.
3. Холодильная камера для хранения готового продукта – 1 шт.
4. Шкаф с вентиляцией для подсушки полуфабриката и созревания готового продукта (на 100...120 кг рыбы) – 2 шт.
5. Емкости для посола, отмочки и мойки рыбы на 200 л – 3 шт.
6. Газовая плита с баллоном – 1 шт.
7. Дежурное освещение – 3 светильника.
8. Дизельная или бензиновая электростанция, мощностью 3...4 кВт – 1 шт.

Холодильное оборудование использовалось в том случае, когда температура окружающей среды превышала 10...12 °С.

В случае использования автономного источника электрической энергии максимальная мощность, потребляемая копильным пунктом, может быть определена по формуле:

$$P_{\max} = P_{\text{э.к}} + P_{\text{х}} + P_{\text{ш.в}} + P_{\text{о}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{э.к}}$ – мощность, потребляемая установкой электростатического копчения, кВт; $P_{\text{х}}$ – мощность холодильного оборудования, кВт; $P_{\text{ш.в}}$ – мощность шкафа с вентиляцией, кВт; $P_{\text{о}}$ – мощность установки дежурного освещения, кВт.

Расход электроэнергии за сутки определится по формуле:

$$W_{\text{с}} = P_{\text{э.к}} \cdot t_{\text{к}} + P_{\text{х}} \cdot t_{\text{х}} + P_{\text{ш.в}} \cdot t_{\text{ш.в}} + P_{\text{о}} \cdot t_{\text{о}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{к}}$; $t_{\text{х}}$; $t_{\text{ш.в}}$; $t_{\text{о}}$ – суточное время работы копильной установки, холодильного оборудования, сушильного шкафа, нагревательной и осветительной установки соответственно.

Суточное количество продукта, направляемое на копчение, может быть рассчитано по формуле:

$$B_{\text{с}} = \Pi_{\text{ч}} \cdot t_{\text{р.с}}, \quad (3)$$

где $\Pi_{\text{ч}}$ – часовая производительность копильной установки кг / час;
 $t_{\text{р.с}}$ – время работы копильной установки в сутки, часов.

При копчении пеляди весом 200...220 г за 1 час работы коптильной камеры УЭК-1 «ИДИЛЛИЯ» производилось 7,5 кг копченного полуфабриката (за смену продолжительностью 8 часов – 60 кг)¹³.

Определим энергоемкость копчения $\mathcal{E}_k$:

$$\mathcal{E}_k = \frac{W_c}{B_c}, \quad (4)$$

где $\mathcal{E}_k$ – расход электроэнергии на копчение единицы веса продукта и доведения его до кулинарной готовности, кВт · час / кг; B_c – суточное количество продукта, направляемое на копчение, кг;

Энергоемкость процесса копчения $\mathcal{E}_k$, рассчитанная по формулам (1-4), составляет 0,325 кВт · час / кг при двухсменном режиме работы коптильного пункта и 0,243 кВт · час / кг при трехсменном.

Для увеличения производительности линии копчения рыбы целесообразно применять установки электростатического копчения большей мощности, выпускаемые отечественной промышленностью: ЭКМ – 50 (имеющую объем загрузки за один цикл копчения 50...60 кг), ЭКМ – 150 (125...150 кг), ЭКМ – 300 (250...350 кг), «ИЖИЦА – 1200» (емкость коптильного шкафа 1,2 м³)¹⁴.

Выводы:

1. Для получения копченых продуктов высокого качества из рыбы местных водоемов целесообразно организовывать на месте вылова сезонные пункты переработки рыбы с использованием технологии электростатического копчения.

2. Разработана частная технология производства пеляди холодного копчения весом 200...220 г из свежевывловленного сырья с использованием электростатической коптильной установки.

3. Выбрано необходимое технологическое оборудование для сезонного коптильного пункта, произведены расчеты мощности, расхода электроэнергии и энергоемкости копчения рыбы.

¹³ Чурин В. Ю. Повышение эффективности установки электростатического копчения // Вестник КрасГАУ. – 2012. – № 1. – С. 182–187.

¹⁴ Там же.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОПЧЕНИЯ ПРОДУКТОВ

Р.В. Банин – к.т.н., Южно-Уральский государственный аграрный университет

В.В. Селунский – к.т.н., доцент кафедры транспорта и электроэнергетики ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

А.В. Тихонов – ОУ ВО «ЮУИУиЭ»

Аннотация

В данной статье представлены результаты исследования электростатического процесса копчения продуктов и формулы, позволяющие производить расчеты процесса осаждения частиц коптильного препарата при электростатическом способе копчения пищевых продуктов.

При производстве продуктов питания и полуфабрикатов, в частности, рыбных и мясных, широко применяется копчение. В зависимости от температуры процесса различают холодное, горячее и полугорячее копчение. При холодном копчении температура коптильной среды не превышает $+40^{\circ}\text{C}$. Горячее копчение производится в диапазоне температур, равном $+80\dots+170^{\circ}\text{C}$. Полугорячее копчение происходит при температуре $+40\dots+80^{\circ}\text{C}$ ¹.

В зависимости от вида коптильной среды различают три способа копчения: дымовое, бездымное (мокрое), смешанное. Дымовое – копчение продуктами разложения древесины, используемыми в состоянии аэрозоля (дыма). Бездымное (мокрое) – копчение продуктами разложения древесины, используемыми в виде растворов. Такими растворами могут быть коптильная жидкость, дымовое масло, коптильный раствор и т. д.² Смешанное – копчение продуктами разложения древесины, используемыми в жидком и газообразном (дым) состоянии.

По особенностям проведения процесса копчение можно классифицировать как естественное, искусственное, комбинированное.

¹ Воскресенский Н. А., Логунов Л. Л. Технология рыбных продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1968. 424 с.; Мезенова О.Я., Ким И.Н., Бредихин С.А. Производство копченых пищевых продуктов. – М.: Колос, 2001. 208 с.

² Воскресенский Н. А., Логунов Л. Л. Технология рыбных продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1968. 424 с.

Естественное копчение – осаждение копильного препарата на поверхности продукта и проникновение внутрь его. Осуществляется без применения специальных технических приемов, активизирующих процесс. Искусственное копчение – осаждение копильного препарата на поверхность продукта и проникновение его внутрь с применением специальных технических приемов, ускоряющих процесс (электростатические поля, инфракрасные и ультрафиолетовые лучи).

В настоящее время в основном применяется естественное дымовое копчение. Недостаток этого способа заключается в длительности процесса копчения, продолжительность которого может достигать, для некоторых рыбных продуктов, нескольких суток³. Кроме того, полезное использование дыма при таком виде копчения составляет всего порядка 3%⁴.

Классификация способов копчения приведена на рисунке 1.

³ Мезенова О.Я., Ким И.Н., Бредихин С.А. Производство копченых пищевых продуктов. – М.: Колос, 2001. 208 с.

⁴ Там же.



Рисунок 1. Классификация способов копчения

Коптильный дым образуется при пиролизе древесины (сжигании при недостатке кислорода). Правильно выработанный коптильный дым содержит большое количество коптильных компонентов (более 10 тысяч, из них около 1000 участвуют в формировании свойств копченого продукта), за счет чего при дымовом копчении получаются продукты высокого качества⁵. Оптимальной температурой для пиролиза считается температура, равная 380...400 °С⁶.

Коптильный дым является многофазной коллоидной системой (аэрозолем). Он состоит из дисперсной фазы (твердые и жидкие частички размером 0,5 – 7,5 мкм) и дисперсионной среды (различные газы). Такая сложная система может длительно существовать благодаря тепловому броуновскому движению

⁵ Там же.

⁶ Воскресенский Н.А., Логунов Л.Л. Технология рыбных продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1968. 424 с.

частиц, а также за счет образования вокруг частиц ионной сферы и заряда. Коптильный дым в начале образования содержит небольшое количество заряженных частиц, которое быстро возрастает с 22% до 69% у жидких частиц и до 99% у твердых частиц⁷.

Скорость осаждения частиц дыма на продукт при естественном копчении определяется диффузионными и конвекционными процессами, происходящими в дыме и у поверхности продукта⁸. Эта скорость может быть определена по следующей формуле:

$$v = \frac{m \cdot g}{\delta \cdot \pi \cdot \eta \cdot r} \cdot \left(1 + A \cdot \frac{L}{r} \right), \quad (1)$$

где v – скорость осаждения частиц дыма;

m – масса частицы;

g – ускорение силы тяжести;

δ – толщина слоя дыма у поверхности рыбы, где осуществляется молекулярная диффузия («пристенный» слой);

η – вязкость среды;

r – радиус частицы;

L – средняя длина свободного пробега молекул; A – числовой коэффициент, зависящий от отражения молекул от поверхности частиц.

В коптильной камере при естественном копчении преобладает гравитационное осаждение дыма, обусловленное термофорезом.

Скорость осаждения незаряженных частиц дыма можно определить по формуле (2).

$$v_1 = \frac{D \cdot c}{\delta}, \quad (2)$$

где v_1 – скорость осаждения частиц молекулярного размера; D – коэффициент молекулярной диффузии частиц; c – концентрация частиц в коптильном дыме.

В коптильном дыме вещества находятся не только в молекулярном, но также в коллоидном состоянии⁹. Скорость осаждения коллоидных частиц дыма на поверхность продукта может быть найдена по формуле (3).

⁷ Там же.

⁸ Там же.

⁹ Там же.

$$v_2 = \frac{q \cdot B \cdot c_0}{4 \cdot x^2}, \quad (3)$$

где v_2 – скорость осаждения коллоидных (заряженных) частиц;

q – заряд частиц;

c_0 – начальная концентрация частиц;

x – толщина слоя дыма, состоящего из коллоидных частиц, у поверхности продукта, в котором происходит процесс осаждения («пристенный» слой);

B – подвижность частиц.

Величина заряда частицы q может быть определена по формуле (4).

$$q = n \cdot e, \quad (4)$$

где n – количество элементарных зарядов, для частиц с максимальным зарядом $n = 100^{10}$; e – величина элементарного заряда, $e = 4 \cdot 8 \cdot 10^{-10}$.

Если между продуктом, находящимся на одном электроде, и электродом противоположного знака, находящимся на некотором расстоянии от первого, создать разность потенциалов, то заряженные частицы дыма приобретут направленное движение. При этом осаждение частиц дыма на поверхность продукта ускорится. Процесс движения коллоидных частиц в электрическом поле называется электрофорезом¹¹.

Использование электрофореза не нашло широкого применения главным образом из-за того, что электрическое поле при этом методе копчения получается сравнительно слабым. Это приводит к тому, что значительное количество частиц копильного дыма не участвует в процессе копчения, а процесс осаждения частиц происходит недостаточно быстро.

Задача более эффективного использования копильного дыма и ускорения процесса осаждения частиц на поверхность копчения решается при применении электрического поля высокого напряжения. На этом принципе основан способ электростатического копчения.

¹⁰ Левитов В.И., Решидов И.К., Ткаченко В.М. Дымовые электрофилтры. – М.: Энергия, 1980. 448 с.

¹¹ Там же.

Скорость осаждения дыма на поверхности продукта в электрическом поле высокого напряжения (при электрокопчении) может быть определена по формуле (5).

$$v = \frac{\beta \cdot n \cdot e \cdot E}{\delta \cdot \pi \cdot \eta \cdot r} \cdot \left(1 + A \cdot \frac{L}{r} \right), \quad (5)$$

где β – доля отрицательно заряженных частиц в общем количестве частиц копильного дыма;

e – элементарный электрический заряд;

n – количество элементарных зарядов на коллоидной частице;

E – напряженность электрического поля.

Представленная зависимость скорости осаждения дыма от напряженности электрического поля представлена на рисунке 2.

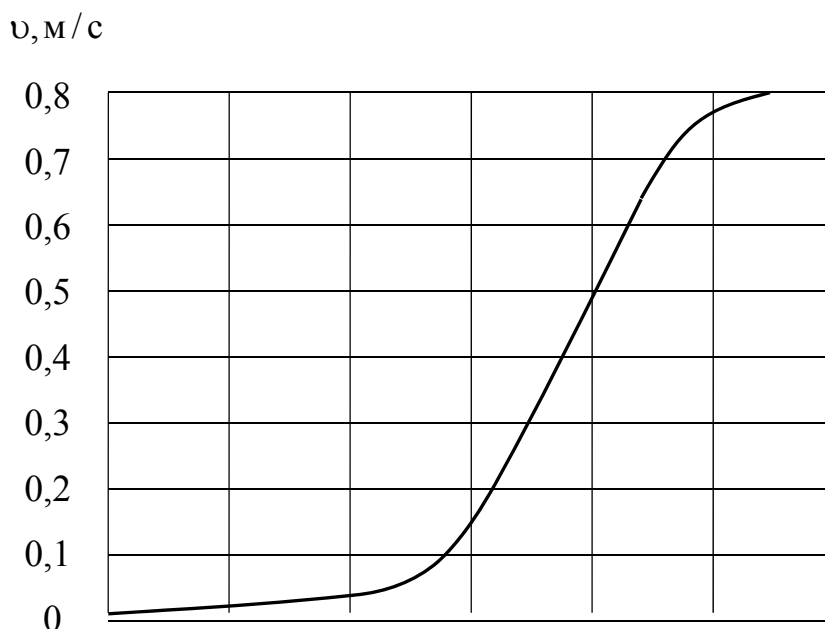


Рисунок 2. Зависимость скорости осаждения дыма от величины напряженности электрического поля

Как следует из приведенного графика, скорость осаждения дыма на поверхность продукта при повышении напряженности электрического поля (до определенного предела) увеличивается.

Выводы:

Представлены формулы, позволяющие производить расчеты процесса осаждения частиц копильного препарата при электростатическом способе копчения пищевых продуктов.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИНФРАКРАСНОЙ СУШКИ ЖИДКИХ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ДОБАВОК И ОЦЕНКА ЕЕ ПРИКЛАДНОЙ ЗНАЧИМОСТИ ДЛЯ ЧЕЛЯБИНСКОЙ ОБЛАСТИ

В.А. Афонькина - Южно-Уральский институт управления и экономики, доцент кафедры транспорта и электроэнергетики, кандидат технических наук

К.Д. Долгополов – ФГБ ОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет», студент кафедры Электрооборудование и автоматизация технологических процессов

Аннотация

В статье произведена оценка технологии инфракрасной сушки биологического сырья по критерию минимума энергозатрат на производство продукции обеспечивает повышение качества конечного продукта и снижение затрат ресурсного потенциала за счет совершенствования и автоматизации технологических процессов сушки биологически активных добавок (БАД).

Назначение и область применения технологии инфракрасной сушки жидких биологически активных добавок

Рацион питания любого человека, по утверждению ученых, должен содержать большое количество различных веществ. Ведь полноценное питание является залогом сильного иммунитета, а также хорошей работоспособности и бодрости организма человека. Но не у каждого есть возможность получать все эти вещества в силу тех или иных обстоятельств. Здесь и нашли свое применение биологически активные добавки к пище (БАДы).

БАДы получают из сыпучего, жидкого или твердого исходного сырья растительного или животного происхождения. Они устраняют дефицит питательных веществ, необходимых для хорошего функционирования организма, снижают риск некоторых заболеваний, нормализуют микрофлору кишечника, выводят шлаки и токсины.

Помимо фармацевтики, биологически активные добавки широко применяются в птицеводстве и животноводстве, как дополнительный источник пищевых веществ.

Повышение эффективности воздействия на сырье биологического происхождения с целью получения в них целесообразных изменений является

следствием применения различных видов электротехнологий. Электротехнологию стремятся применять там, где она способна повысить качество или улучшить характеристики целевых компонентов, где технология приводит к увеличению количества продукции, производительности труда и экономически себя оправдывает. Сушка биологического сырья с применением инфракрасного излучения не является исключением.

Эффективность процесса обезвоживания сырья зависит от диапазона начальной и конечной влажности и ряда физико-механических, химических и других свойств продукта, способа сушки, технологии и технических характеристик оборудования.

Лебедевым П.Д. предложено дифференциальное уравнение теплового баланса¹, которое действительно для расчета технологического регламента сушки сырья и тел любой конфигурации. Его используют для решения задачи создания эффективных установок для сушки растительного сырья.

Уравнение теплового баланса для условий равномерного прогрева по толщине облучаемого тела, в котором энергия, поглощаемая облучаемым сырьем за время $d\tau$, будет затрачиваться на его нагрев, отдачу тепла нагреваемым телом в окружающее пространство конвекцией и излучением и на испарение из него влаги имеет вид:

$$0,86AES_0d = Gcd\tau + \alpha_K(t - t_B)Sd\tau + 4,9\varepsilon_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] * Sd\tau + q'rl^{-x_l}d\tau,$$

где A – коэффициент поглощения излучения облучаемым сырьем;

E – плотность облучения – плотность лучистого потока по облучаемой поверхности, Вт/м²;

S_0 и S – площадь облучаемой и полной поверхностей сырья, м²;

τ – время от начала облучения, ч;

G – вес облучаемого сырья, кг;

t и t_B – температуры сырья и окружающего воздуха, °С;

c – теплоемкость облучаемого сырья, ккал/кг*град;

$\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты облучаемого сырья и внутренних ограждений сушильной установки;

¹ Лебедев П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок / Учебное пособие для студентов высших учебных заведений – М – Л: ГЭИ, 1962. С. 320

α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией, ккал/м²*ч*град;

T и T_0 – температура сырья и окружающих поверхностей, К;

q' – скорость испарения вещества (начальная интенсивность), кг/м²*ч;

x – показатель поглощения излучения растительным сырьем, 1/м;

l – глубина проницаемости сырья инфракрасным потоком от его наружной поверхности, м.

Уникальность и высокая эффективность процесса удаления избыточной влаги связана со структурой используемых лучей. Проникая вглубь изделия, ИК-лучи поглощаются водой, увеличивая тепловое движение молекул и вызывая нагревание жидкости. При этом сам высушиваемый продукт и конструкционные материалы оборудования для сушки не насыщаются инфракрасным излучением за счет эффекта отражения. Такая особенность обуславливает невысокие температуры ведения процесса: 40-60°C вполне достаточно для достижения требуемой степени влажности. А низкие тепловые воздействия, в свою очередь, благосклонно сказываются на качестве подвергающихся сушке продуктов. Такая технология позволяет сохранить все полезные свойства продуктов.

Из высушенного биологического сырья получают пищевые добавки, гранулы, таблетки, порошки и другие натуральные продукты².

В процессе обезвоживания необходимо обеспечить высокое качество высушиваемого продукта и сохранить его полезные вещества, что накладывает дополнительные ограничения на режимы сушки. В этом случае менее эффективными становятся не только существующие конвекционные и кондуктивные установки с поверхностным подводом тепла, но и современные микроволновые и комбинированные установки, предназначенные для сырья средней и высокой влажности. Существенным недостатком данных установок является не только низкий КПД, но и необходимость дополнительного оборудования для утилизации и повторного использования тепловой энергии, что увеличивает и без того значительную металлоемкость технологического оборудования.

Большую роль играют достаточно простые способы получения энергоносителя, а также оснащение их современным, компактным и

²Машковский М.Д. Лекарственные средства. Том II- М.: Медицина, 1993.

мобильным оборудованием, которое имеет производительность 3-2000 кг/ч и отвечает всем требованиям экологической чистоты процесса переработки биологического сырья и высокой сохранности полезных веществ и витаминов, а также физических свойств.

При такой производительности оборудования и требованиях, решать проблему сушки такого сырья необходимо реализуя электротехнологии инфракрасных воздействий на высушиваемый продукт, так как экономический эффект данного способа сушки в 4 раза выше, нежели чем у других способов с приблизительно одинаковым качеством конечного продукта. При этом установки для сушки должны быть компактными, легко встраиваться в технологическую линию переработки сырья, которая в сложном производстве БАДов является наиболее энергоресурсоемким процессом, на который приходится 35–40% расходов топлива, 90–95% электроэнергии и 10–12% трудозатрат от общего количества издержек на производство биодобавок. Также установки должны обладать определенной универсальностью, чтобы при необходимости обеспечивать сушку других продуктов или сырья с похожим или аналогичным диапазоном параметров или сырья с другой структурой.

Развитие технологических линий и отраслей в целом по переработке продуктов сельскохозяйственного происхождения, стимулирует развитие и становление новых техник, технологий и оборудования обезвоживания жидкого сырья.

Таким образом создание новых и модернизация существующих сушильных установок с целью повышения качества выполнения технологических операций, повышения качества продукции, снижения расхода энергоресурсов и затрат ручного труда на сегодняшний день является актуальной проблемой не только для Челябинской области, но и для Российской Федерации, а также стран постсоветского пространства.

Внедрение технологии по получению БАДов на основе жидкого (кефирного) сырья для Челябинской области носит рекомендательный характер.

Во-первых, ухудшение экологии в Челябинской области приводит к многочисленным болезням населения, а это в свою очередь к росту спроса на биологически активные добавки к пище, которые помогают выводить токсины

тяжелых металлов из организма человека и укрепить иммунитет, т. е. оказывают иммуностимулирующее воздействие.

Во-вторых, прирост в сельском хозяйстве за последние годы обусловлен в том числе и использованием биодобавок к пище. Животные, как и человек, подвержены различным заболеваниям и несбалансированному рациону питания. Именно поэтому стали прибегать к различным добавкам к кормам для животных. На территории Челябинской области есть несколько крупных агрохолдингов, птицефабрик и животноводческих комплексов, а также множество фермерских хозяйств. Внедрение БАДов из жидкого сырья прекрасно подойдет для нашего края.

Примером БАДов на основе жидкого (кефирного) сырья является сухой продукт «Наринэ»³. Его применяют для изготовления закваски, которую используют для получения кисломолочного лечебного продукта, применяемого для детского и лечебного питания. «Наринэ» представляет собой эффективное средство лечения и профилактики аллергии.

Молочное производство в Челябинской области хорошо развито. Об этом может свидетельствовать многообразие предприятий по выпуску молочной продукции.

Современное состояние исследований по данному направлению

Некоторые виды обработки биологического сырья, используемые в традиционных технологиях, нередко вызывают глубокие биохимические изменения, которые сказываются не только на внешнем виде продукта, но и снижают пищевую ценность, содержание микроэлементов и биологически активных веществ. Как правило, это следствие высоких температур, при которых происходит технологический процесс сушки, и желание производителей за счет этого ускорить процесс получения готовой продукции.

В связи с этим, производства отдельных предприятий ограничивают или исключают возможность широкой механизации и автоматизации технологического процесса переработки биологического сырья, не позволяют полностью загружать и эффективно использовать установленное на них

³Наринэ – биологически активная добавка (БАД). Вырабатывается с применением чистой культуры молочнокислых бактерий *Lactobacillus* sp. штамм n.v. Ер 317/402 Narine, выделенный профессором Л.А. Ерзинкяном в 1964 году. Продукт назван в честь внучки профессора «Наринэ».

оборудование, а доминирование доли энергозатрат в себестоимости готовой продукции постоянно растет.

Неудовлетворительное хранение, отступление от особенностей технологии переработки данного сырья и плохой транспортировки происходит не только утрата природных достоинств свежего продукта, но и его прямое уничтожение. Потери составляют более 40% среднегодового производства продуктов из биологического сырья. Всё это негативно сказывается на решении проблемы обеспечения населения полноценными пищевыми добавками.

Так применение ресурсосберегающих технологий в энерготехнологических объектах, а также методов математического моделирования и адаптирование их при проектировании и реконструкции технологических линий могут служить решением данных проблем.

Основные технические параметры данной технологии

Эффективность выбранной технологии сушки биологического сырья оценивается в основном двумя факторами: степенью смягчения теплового воздействия на сырье, а также сокращением энергозатрат на сушку.

Такая технология может быть высокопроизводительной при использовании сушильных установок транспортерно-каскадного типа при непрерывном технологическом процессе. Так как сушка в них осуществляется одним из перспективных способов сушки на данный момент – ИК - излучением. Это объясняется тем, что энергия подводится непосредственно к продукту без затрат энергии на нагрев промежуточного теплоносителя, следовательно, потери тепла значительно меньше, а КПД установки становится выше. При таком принципе нет необходимости значительно повышать температуру продукта и процесс испарения можно интенсивно вести при температуре 40-60°C. Пленочные электронагреватели - это один из видов нагревателей ИК-излучения, которые обеспечивают качественную низкотемпературную сушку в данном диапазоне температур.

Предлагаемая технология способствует снижению затрат труда до 28%, эксплуатационных и энергетических затрат до 40% при полном сохранении активных и питательных веществ в конечном продукте из биологического сырья.

Экономическая эффективность данной технологии складывается из энергетического, трудового, структурного и технологического эффектов.

Краткое описание технологии с раскрытием сущности используемых изобретений

Для реализации поставленных задач предлагается экспериментальная низкотемпературная сушильная установка каскадного типа (рисунок 1), параметры и характеристики, которой необходимо исследовать для дальнейшего изготовления сушильных установок с оптимальными параметрами ведения технологического процесса сушки конкретного биологического сырья, с целью получения конечного продукта высокого качества при сниженных энергозатратах.



Рисунок 1. Внешний вид экспериментальной инфракрасной сушильной установки

Сушильная установка содержит установленные параллельно друг над другом в каркасе из вертикальных и горизонтальных стоек на опорах с возможностью вращения ленточные конвейеры.

Приводной механизм, раскладчик для распределения продукта сушки на верхнюю рабочую ветвь ленты верхнего конвейера.

Соседние конвейеры установлены с возможностью вращения лент в противоположенных направлениях; нечетные ряды конвейеров смещены по длине на одинаковую величину, достаточную для перекантровки продукта сушки с конвейера на конвейер, а в зонах перекантровки установлены жестко связанные с каркасом экранирующие щитки для исключения рассыпания продукта сушки.

Каркас снабжен направляющими, на которые опираются верхние рабочие ветви лент конвейеров, над ними установлены жестко связанные с

каркасом нагревательные элементы инфракрасного излучения с отражателями, которыми поддерживаются нижние ветви лент конвейеров.

В качестве генераторов инфракрасного излучения используются пленочные электронагреватели⁴, имеющие степень черноты 0,98 (рисунок 2).



Рисунок 2. Внешний вид пленочного электронагревателя

В зоне перекантовки установлены вентиляторы для удаления пылеобразных частиц и избыточной влаги, установка содержит систему автоматического управления, контролирующую необходимые технологические параметры процесса сушки.

Выполнение каркаса без наклона повышает мобильность установки и дает возможность использования каскадного принципа размещения сушильных установок (размещение одной сушильной установки над другой).

Использование в качестве нагревательных элементов инфракрасного излучения пленочных электронагревателей обеспечит равномерное облучение продукта сушки в режиме щадящих температур (35–60 °С) при минимальных энергетических затратах, а использование системы автоматического управления, контролирующей необходимые технологические параметры процесса сушки, обеспечит высокое качество готового продукта⁵.

⁴ Полевой Б.Г., Попов В.М. Патент 100353 RUH05B 3/36 «Пленочный электронагреватель» – №2010115793, заявленный 20.04.2010, опубликованный 10.12.2010. Бюл. №34; Попов В.М., Афонькина В.А. Сушка термолабильных культур в ИК - диапазоне с учетом оптических свойств продукта. // Вестник Южно-уральского государственного университета. Серия. Энергетика. Выпуск 17. – 2012. – № 26 [294]. – С. 17–20

⁵ Попов В.М., Афонькина В.А. Сушка термолабильных культур в ИК - диапазоне с учетом оптических свойств продукта. // Вестник Южно-уральского государственного университета. Серия. Энергетика. Выпуск 17. – 2012. – № 26 [294]. – С. 17–20

⁵ Попов В.М., Афонькина В.А. Сушка термолабильных культур в ИК - диапазоне с учетом оптических свойств продукта. // Вестник Южно-уральского государственного университета. Серия. Энергетика. Выпуск 17. – 2012. – № 26 [294]. – С. 17–20; Афонькина В.А. Диссертация на тему: «Инфракрасная сушка термолабильного сырья на примере зеленых культур» – Челябинск, 2014; Афонькина В.А. Теоретические аспекты обоснования выбора пленочных ИК – излучателей для сушки термолабильных культур. // Вестник ЧГАА. – 2012. – Том 62. – С. 5–9.

Применение в конструкции сушильной установки пленочных электронагревателей в качестве тепловыделяющих и излучающих элементов с наноразмерным проводящим слоем, позволит упростить и удешевить конструкцию ИК - сушилки, по сравнению с ныне выпускаемыми установками, за счет упрощения сборки и экономии материалов, а также за счет согласования оптических характеристик биологического сырья и генератора инфракрасного излучения.

Все это позволит кардинально расширить функциональные возможности сушильной установки за счет варьирования параметров излучения, необходимого для биологически активных добавок.

Ожидаемые результаты

В результате реализации предложенной технологии будет решен вопрос совершенствования технологического процесса сушки биологически активных добавок к пище и кормам на основе кефирного сырья, снижения энергозатрат и исключения затрат ручного труда, сокращения прямых затрат, снижения себестоимости готовой продукции и повышение ее качества.

Применение ИК-излучения для инфракрасной сушки жидких БАДов позволит усовершенствовать и автоматизировать технологические процессы и технические средства, обеспечивающие механизированную загрузку и выгрузку сырья, автоматический сбор информации о ходе технологического процесса при достижении необходимой конечной влажности сырья, снижая тем самым количество операций при подготовке БАД для хранения, а также при приготовлении готовой продукции из биологического сырья.

Выводы

В настоящее время широкое применение находят системы с применением инфракрасной техники. Они характеризуется минимальным количеством потребления энергии, безопасностью при эксплуатации и мягкостью воздействия на материал.

Основу представленных технологий составляют следующие принципы:

– сокращение энергозатрат на производство;

- увеличение лучистой составляющей источников инфракрасного излучения в процессе теплопередачи, предохраняющей продукт от перегрева, излишнего испарения влаги и разрушения биологически активных веществ;
- уменьшение металлоемкости производства;
- применение автоматики в технологических процессах.

Несмотря, на первый взгляд, на простоту данной технологии, это вовсе не означает упрощение процесса удаления влаги из биологического сырья, поскольку она требует тщательного и своевременного выполнения всех немногочисленных операций. Однако, ситуация с обеспечением хозяйств необходимой техникой остается довольно сложной. Из-за ограниченности финансовых средств и высоких цен на импортную технику. Новые машины и оборудование приобретаются хозяйствами в незначительных количествах от потребности. Стоимость комплексов импортного производства в два с лишним раза выше предлагаемых российских аналогов.

В связи с санкциями и высокими ценами на импортную технику, разработка отечественного оборудования даст толчок развитию вопросу об импортозамещении.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛЁНОЧНОГО ЛУЧИСТОГО ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЯ КАК ИСТОЧНИКА РАВНОМЕРНОГО ПОТОКА ИЗЛУЧЕНИЯ

Е.Н. Епишков – к.т.н., ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет»

Аннотация

Практика показывает, что падёж поголовья животных и птицы в большинстве случаев происходит в раннем возрасте, зачастую от простудных заболеваний. В связи с этим модернизация и усовершенствование средств локального обогрева молодняка животных и птиц является важной научной задачей. В статье приведены результаты теоретических исследований процесса теплообмена внутри плёночного лучистого электронагревателя (ПЛЭН) и расчёт её оптимальных параметров.

В настоящее время широкое распространение получили средства локального обогрева на основе ТЭНов и инфракрасных ламп. В частности, для обогрева поросят-сосунов широко используют облучатели на основе ламп ИКЗК 220-250¹.



Рисунок 1. Облучатель на основе лампы ИКЗК 220-250

К недостаткам данной системы обогрева можно отнести следующее:

1. Раздражающее действие яркого светового потока от ламповых облучателей и возможное переохлаждение нижней части поверхности тела лежащих животных при контакте их с холодным полом.

¹ Баранов Л.А. Захаров В.А. Светотехника и электротехнология // Учебное пособие для студентов высш. учеб. заведений – М. КолосС, 2006. С. 344

2. Свет ламповых излучателей мешает животным спать. Поэтому в зонах отдыха, где должен создаваться тепловой комфорт установками локального обогрева, освещение (особенно яркое) нежелательно.

3. Часть создаваемого лампой лучистого потока не используется по прямому назначению – обогреву животных, а рассеивается вне границ технологического станка.

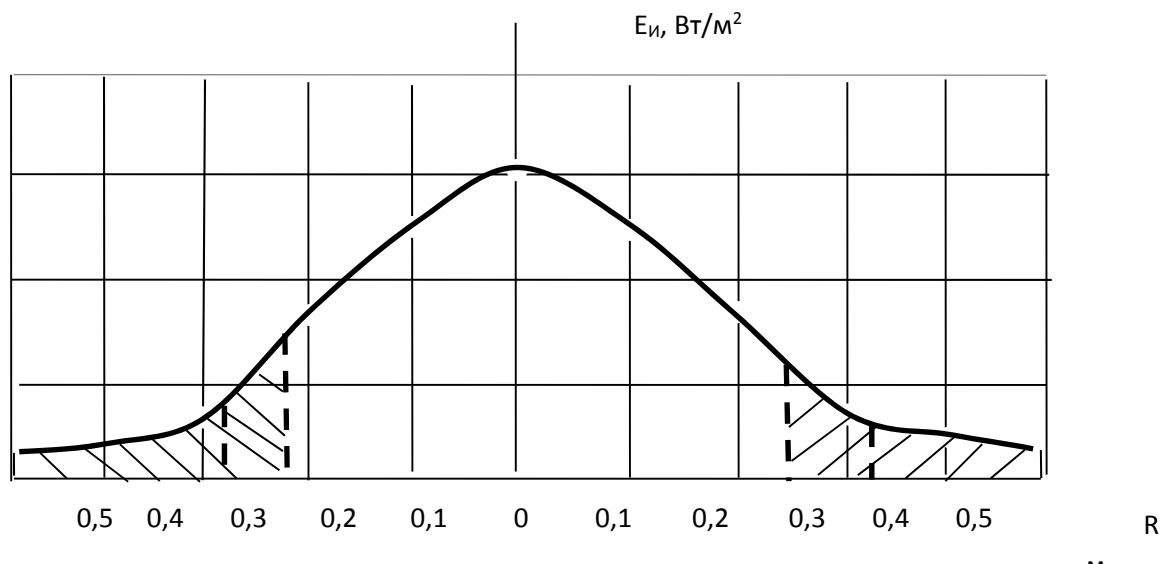


Рисунок 2. Распределение облучённости под лампой ИКЗК 220-250

4. Из характеристики облученности $E_{и}=f(R)$. (рисунок 1) лампы² следует, что в центре проекции лампы создается максимальная облученность, а к периферии – облученность в 3-4 раза меньше. Поэтому в центре облучаемой поверхности животные не располагаются из-за слишком высокой температуры.

Они располагаются по кольцу вокруг центральной части облучаемой поверхности. Таким образом, значительная часть лучистой энергии на обогрев поросят не используется.

Для обогрева цыплят используются брудеры БП-1А³. Он состоит из набора секций 22 и крышки 21, образующих зонт, четырех трубчатых электронагревателей 7 (тэна) мощностью 250 Вт каждый, установленных на

² Басов А.М., Быков В.Г., Лаптев А.В., Файн В.Б. Электротехнология // Учебное пособие для студентов высш. учеб. заведений – М.: Агропромиздат, 1985. С.255

³ Исаченко В.П. Осипова В. А. Сукомел А.С. Теплопередача // Учебное пособие для студентов высш. учеб. заведений – М. Энергоиздат, 1981. С.416 .

обогревателе 20. Лампа 2 предназначена для освещения обогреваемой площади под брудером.

Общим недостатком описанных устройств является значительная неравномерность потока излучения, создаваемого этими устройствами в зоне обогрева. Это приводит к значительному перегреву центральных областей обогреваемого пространства и существенному недогреву периферийных. Что нецелесообразно как с экономической, так и с зоотехнической точки зрения. Существует два условия теплового комфорта.

Первое условие комфортности. Животное испытывает тепловой комфорт, если организм находится в состоянии термического равновесия, т.е. выделяет в окружающую среду определенное количество явной теплоты без перенапряжения аппарата терморегуляции. При этом объективными показателями удовлетворительной работы системы терморегуляции является интенсивность выделения явной теплопродукции и, как следствие, температура поверхности тела.

Второе условие комфортности. Это условие вводит ограничение по интенсивности теплообмена организма животных с окружающей средой в момент нахождения их около нагретых и охлажденных поверхностей. Оно определяет возможную неравномерность теплоотдачи различных участков поверхности тела и устанавливает соотношение лучистой, конвективной и кондуктивной составляющих теплообмена. Смысл этого условия комфорта заключается в ограничении теплоотдачи с различных участков поверхности тела.

Стремясь выполнить это условие, создают такой температурный режим, при котором местный перегрев и охлаждение сводится к минимуму, т. е. обеспечивают предельно равномерную теплоотдачу организма в окружающую среду. Поэтому, в первом приближении можно принять в качестве второго условия комфортности максимально возможную равномерность явной теплоотдачи организма животного со всех участков поверхности тела.

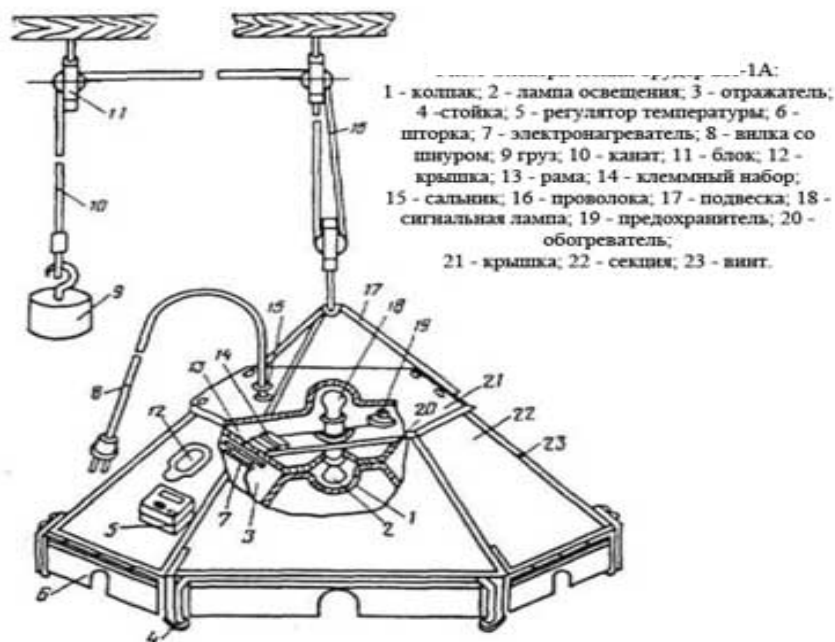


Рисунок 3. Электрический брудер БП-1А

Таким образом при использовании традиционных способов обогрева зачастую не соблюдается второе условие теплового комфорта, что влечёт за собой простудные заболевания, вызывающие повышение падежа и задержку физиологического развития животных.

На основании всего сказанного была сформулирована **цель исследования:**

Разработка и исследование свойств источника теплового излучения с равномерным распределением плотности потока излучения по обогреваемой поверхности.

Задачи исследования

1. Разработка конструкции нагревателя с квазиравномерным распределением плотности потока излучения по поверхности.
2. Разработка математической модели теплообмена внутри этого источника.
3. Обоснование оптимальных параметров этого источника.

Одним из вариантов излучателя с равномерной плотностью потока излучения может служить плёночный лучистый электронагреватель (ПЛЭН). Внешний вид нагревателя изображён на рисунке 4. ПЛЭН представляет собой полотно, состоящее из двух слоёв полиэтилен-терефталатовой плёнки. Между ними находится резистивный элемент меандровой формы выполненный из прецизионной стали 20НХГ. Данное техническое решение защищено

патентом на полезную модель №57070⁴. В последствии эта модель усовершенствовалась, что вылилось в ряд патентов⁵.



Рисунок 4. Внешний вид ПЛЭН

Для оценки степени неравномерности поля поверхности нагревателя разработана математическая модель теплообмена внутри нагревателя.

Как видно из рисунка 4 нагреватель можно представить в виде чередования токоведущих и нетокведущих областей. Рассмотрим процесс теплообмена в этих областях

Построение модели основано на выполнении закона сохранения энергии. При этом следует учесть, что токоведущая область обладает внутренними источниками энергии, а нетокведущая не обладает и лишь рассеивает тепло в окружающую среду.

⁴ Патент. на полезн. модель 57070 Российская Федерация. Пленочный электронагреватель [Текст] / Н.Е. Епишков, Е.Н. Епишков, С.В. Глухов; заявитель и патентообладатель Н. Е. Епишков. .–№ 2006110752 ; заявл. 03.04.2006; опубл. 27.09.2006.

⁵Патент. на изобретение 2321188 Российская Федерация. Пленочный электронагреватель [Текст] / Н.Е. Епишков, Е.Н. Епишков, С.В. Глухов; заявитель и патентообладатель Н. Е. Епишков. .–№ 200614292/09 ; заявл. 04.12.2006; Патент. на полезн. модель 76764 Российская Федерация. Пленочный электронагреватель [Текст] / Н.Е. Епишков, Е.Н. Епишков, С.В. Глухов; заявитель и патентообладатель Н.Е. Епишков. .–№ 2008119219/22 ; заявл. 15.05.2008.

Теплообмен в токоведущей части

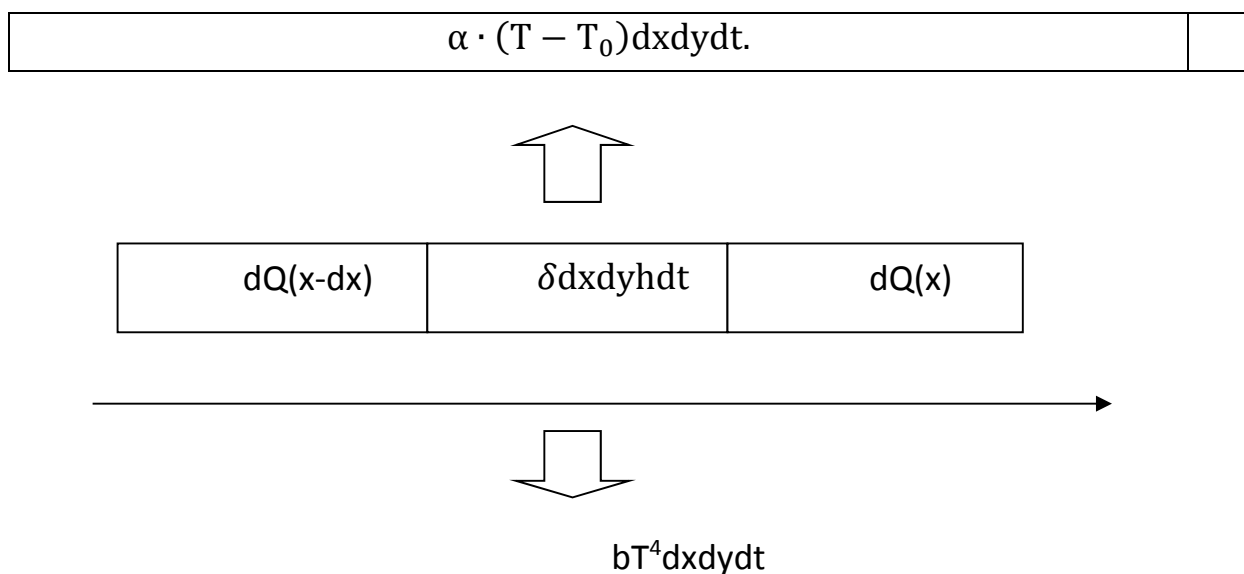


Рисунок 5. Процесс теплообмена в токоведущей части ПЛЭН

Процесс теплообмена в токоведущей части основан на законе сохранения энергии и схематично изображён на рисунке 5. Теплота $dQ(x - dx)$ в элемент $dx dy h$ поступает из соседнего элемента с координатой x нагретого до большей температуры и выделяется внутри элемента согласно закону Джоуля-Ленца $\delta * dx * dy * h * dt$. Одновременно теплота $dQ(x)$ утекает в более холодный элемент с координатой x , а также рассеивается в окружающую среду посредством конвекции $\alpha(T - T_0) dx dy dt$ и излучения $bT^4 dx dy dt$. Уравнение теплового баланса описывается уравнением (1).

$$\delta Q(x) = dQ(x - dx) - dQ(x) - \alpha * (T - T_0) * dx * dy * dt + \delta * dx * dy * h * dt - b * T^4 * dx * dy * dt \quad (1)$$

где T – температура в элементе с координатой x ;

T_0 – температура окружающей среды;

α – коэффициент теплоотдачи;

$$b = 5,67 * 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 * К^4};$$

h – толщина нагревателя;

δ – объёмная плотность энергии;

dt – элементарный интервал времени.

При этом $dQ(x)$ выражается с помощью закона Фурье (2)⁶.

$$dQ(x) = -\lambda * \frac{\partial T(x)}{\partial x} * h * dy * dt \quad (2)$$

где $-\lambda$ – коэффициент теплопроводности среды.

Полученное на основании этого дифференциальное уравнение для установившегося температурного режима имеет вид

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\alpha}{\lambda * h} * (T - T_0) = -\frac{\delta}{h} - \frac{b}{h} * T^4 \quad (3)$$

Теплообмен в нетоковедущей части

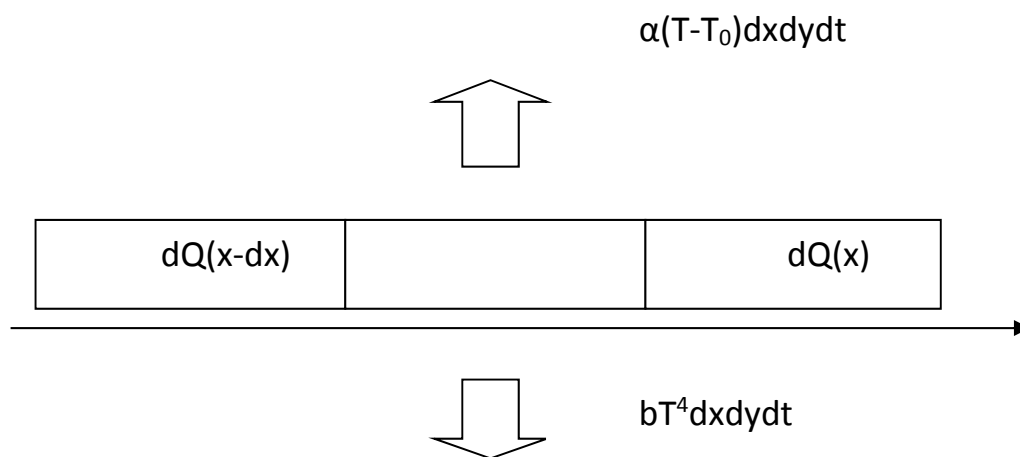


Рисунок 6. Процесс теплообмена в нетоковедущей части ПЛЭН

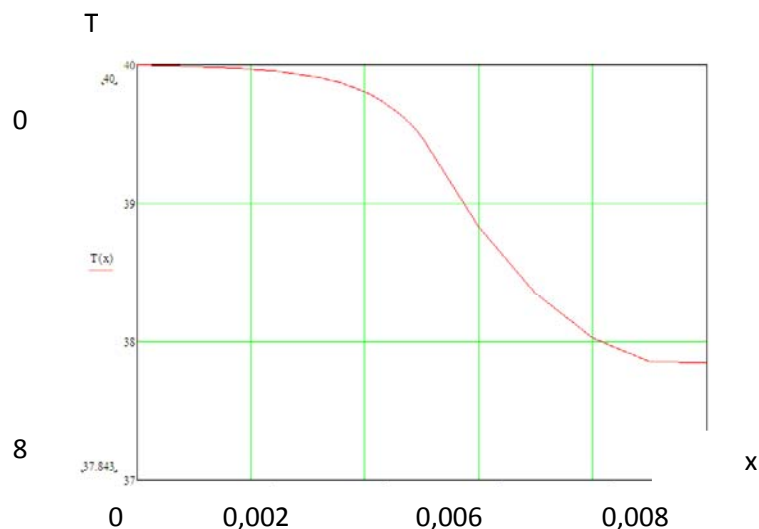
Процесс теплообмена в нетоковедущей части подчиняется тем же законам, разница лишь в том, что отсутствуют внутренние источники теплоты $\delta dxdyhdtdt$.

Дифференциальное уравнение для нетоковедущей части имеет вид:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\alpha}{\lambda * h} * (T - T_0) = -\frac{b}{h} * T^4 \quad (4)$$

Численное решение данных уравнений приведено на графике:

⁶ Исаченко В.П. Осипова В.А. Сукомел А.С. Теплопередача // Учебное пособие для студентов высш. учеб. заведений – М. Энергоиздат, 1981. С.416 .



Выводы

1. Согласно проведённым теоретическим расчётам, при плотности мощности нагревателя 175 Вт/м^2 , оптимальными являются толщина токоведущей части 1 см при промежутке между резистивными элементами 1 см. В этом случае неравномерность поля температуры поверхности нагревателя не превышает 2 градуса.

2. Существующую неравномерность можно значительно уменьшить путём введения дополнительного слоя с большим коэффициентом теплопроводности (λ). Это техническое решение реализовано в патенте на полезную модель №№57070.

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМЫ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД АЭС НА ОСНОВЕ ГТУ С УЧЕТОМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ

*В.Е. Юрин – к.т.н., научный сотрудник Саратовского научного центра
Российской академии наук*

Аннотация

В аварийных ситуациях, сопровождаемых полным обесточиванием атомной электростанции (в том числе при максимальной проектной аварии), газотурбинная установка позволяет обеспечить необходимое для расхолаживания активной зоны реакторов электроснабжение. В штатном режиме ГТУ генерирует электроэнергию в энергосистему. В работе проведен предварительный вероятностный анализ безопасности АЭС при комбинировании с газотурбинной установкой с учетом нестационарных состояний оборудования в аварийном режиме.

Традиционные системы аварийного расхолаживания (САЭ) реакторов АЭС включают в себя независимые каналы безопасности с дизель-генераторами (ДГ)¹. Дизель-генераторы находятся в режиме ожидания, и быстротечность их запуска отрицательно сказывается на надежности, вследствие развития значительных температурных и механических напряжений в элементах дизеля в начальный период пуска². Так же активно развиваются системы пассивного отвода остаточных тепловыделений (СПОТ). Они имеют целый ряд недостатков: значительное увеличение капитальных затрат АЭС; ежегодные затраты на поддержание в рабочем состоянии; зависимость эффективности СПОТ от климатических условий.

Автором статьи ранее была предложена система резервирования собственных нужд АЭС на основе газотурбинной установки (ГТУ)³. В ситуации с полным обесточиванием, в том числе и с течью в первом контуре (максимальная проектная авария) ГТУ обеспечит электроэнергией потребители собственных нужд АЭС первой и второй групп, что позволит отказаться от СПОТ и приведет к значительному уменьшению затрат и

¹ Ericson D.M. Probablistic safety anessment reaches maturity. Nuclear Engineering International. 1989. Vol. 34. №422. P. 66-69

² Saban J., Zaharija-Tiska D., Strbuncelj Z. Large diesel generators for nuclear power stations and processing industry. Koncar journal. 1988. – N1. – P. 41-47.

³ Патент РФ №2520979. Способ резервирования собственных нужд АЭС // Заявка от 04.03.2013, опубл. 27.06.2014. Бюл. №18; Аминов Р.З., Юрин В.Е., Егоров А.Н., Башлыков Д.О. Сравнительный анализ систем активного и пассивного отвода тепла активной зоны реактора ВВЭР-1000 в условиях обесточивания // Известия РАН. Энергетика, 2016. – № 3. – С. 62–69.

капиталовложений в системы безопасности АЭС. При этом ГТУ полностью окупается за счет штатной выработки электроэнергии. Схема предлагаемой системы резервирования показана на рисунке 1.

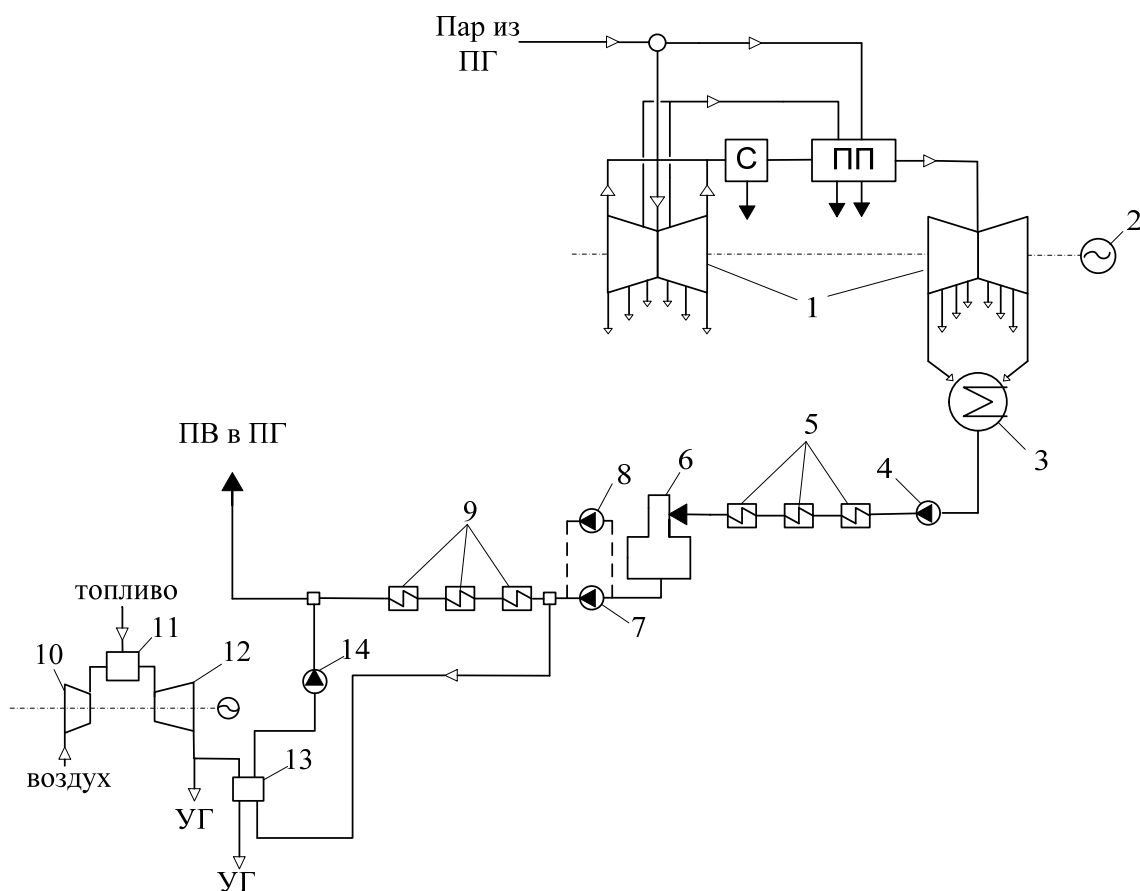


Рисунок 1. Принципиальная технологическая схема комбинирования АЭС с ГТУ

1 – основная ПТУ; 2 – электрические генераторы; 3 – конденсатор; 4 – конденсатный насос; 5 – подогреватели низкого давления; 6 – деаэратор; 7 – питательный насос; 8 – аварийный питательный насос; 9 – подогреватели высокого давления; 10 – компрессор; 11 – камера сгорания; 12 – газотурбинная установка; 13 – котел утилизатор; 14 – дожимной насос

В эксплуатационном режиме в период ночного провала электрической нагрузки ГТУ 12 работает в состоянии горячего резерва с целью обеспечения максимально быстрой скорости набора мощности в аварийной ситуации. В пиковые и полупиковые часы электрической нагрузки ГТУ 12 работает на нормальной нагрузке, уходящие газы направляются в котел утилизатор (КУ) 13. После питательного насоса 7 часть питательной воды направляются в КУ 13, нагревается там и подается дожимным насосом 14 (необходимым в связи с

гидравлическими потерями в КУ) в тракт питательной воды после ПВД 9 и смешиваясь с основным потоком питательной воды подается в ПГ. В результате уменьшения расхода через ПВД 9 уменьшаются отборы пара из основной паротурбинной установки (ПТУ) 1 на подогрев питательной воды. Избыток пара, полученный за счет снижения расхода на отборы, может быть использован в основной ПТУ для увеличения ее мощности. Так же может быть установлена дополнительная маломощная ПТУ, которая позволит использовать полученный избыток пара, не перегружая основную ПТУ.

В процессе экспертизы проектов АЭС важное место занимает процедура вероятностного анализа безопасности, используемого для выработки и принятия решений по оценке безопасности, действующих и проектируемых АЭС с ВВЭР⁴. В работе проведен предварительный вероятностный анализ безопасности АЭС при комбинировании с ГТУ с учетом нестационарных состояний оборудования в аварийном режиме. При определении показателей надежности, специалисты зачастую ограничиваются стационарными значениями интенсивностей отказа, пренебрегая переходными режимами. При расчете аварийных режимов необходимо учитывать переходные состояния, так как выход интенсивностей отказа оборудования на стационарный режим сопоставим со временем восстановления системы.

Для проведения предварительного вероятностного анализа безопасности АЭС при использовании ГТУ и трехканальной САЭ с ДГ составлен граф состояний (Рисунок 2).

⁴ Швыряев Ю.В., Морозов В.Б. и др. Результаты откорректированного ВАБ для АЭС повышенной безопасности с ВВЭР-1000 // Седьмой международный форум по обмену информации "Анализ безопасности АЭС с реакторами типа ВВЭР и РБМК" (ФОРУМ-7, 28-30 октября 2003, Словакия).

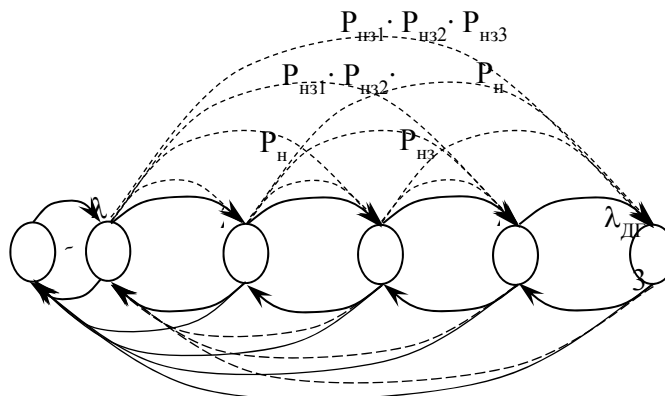


Рисунок 2. Граф состояний для системы резервирования собственных нужд АЭС

Состояния: 0 – отсутствие нарушения электроснабжения СН АЭС; ГТУ – выполнение функций электроснабжения СН АЭС ГТУ; 1 – выполнение функций одним из трех каналов САЭ с ДГ; 2 – выполнение функций вторым каналом САЭ с ДГ; 3 – выполнение функций третьим каналом САЭ с ДГ; 4 – потеря электроснабжения с последующим ПАЗ.

Обозначения: $\lambda_{об}$ – интенсивность обесточивания АЭС; $\lambda_{ДГ-к}$ – общая интенсивность отказов канала САЭ с дизель-генератором; $\lambda_{ГТУ}$ – общая интенсивность отказов ГТУ; $P_{з1..3}$, $P_{нз1..3}$ – вероятности запуска (98 % – паспортные данные) и незапуска (2 %) 1-го, 2-го, 3-го ДГ соответственно; $\mu_{об}$, $\mu_{ГТУ}$, $\mu_{ДГ-к}$ – интенсивности восстановления: штатного электроснабжения СН АЭС; ГТУ; ДГ с каналом САЭ, соответственно

При расчетах учитывались интенсивности исходных аварийных событий⁵. Интенсивности обесточивания по причине экстремальных природных условий рассматривались на примере Среднего Поволжья России за 100 лет. При расчетах также учитывалось, что в случае незапуска ДГ с заданной вероятностью система переходит в следующее состояние.

⁵ Самойлов О.Б., Усынин Г.Б., Бахметьев А.М. Безопасность ядерных энергетических установок: Учебное пособие для вузов -М.: Энергоатомиздат, 1989. 280 с.; Балаковская АЭС. Рабочие чертежи. Материалы изысканий. Дополнительные гидрометеорологические данные. Свердловск, «Теплоэлектропроект» Уральское отделение, 1980 г.; Малевинский Г.В. Вероятностный анализ безопасности АЭС «Библис» (ФРГ). Энергохозяйство за рубежом. – 1990. – №4.

Таблица 1 – Исходные данные по интенсивностям исходных аварийных событий

Исходное аварийное событие	Интенсивность, 1/час
интенсивность обесточивания по причинам потери внешнего электроснабжения	$2,3 \cdot 10^{-5}$
интенсивность обесточивания по причинам потери электроснабжения собственных нужд	$1,2 \cdot 10^{-5}$
интенсивность отказов дизель-генератора по внутренним причинам	$3,0 \cdot 10^{-3}$
интенсивность отказов канала безопасности по внутренним причинам	$5,0 \cdot 10^{-4}$
обесточивание, вызванное землетрясением	$1,9 \cdot 10^{-8}$
обесточивание, вызванное пыльной бурей	$5,7 \cdot 10^{-9}$
обесточивание, вызванное ливневыми дождями	$6,8 \cdot 10^{-8}$
обесточивание, вызванное ураганным ветром	$3,4 \cdot 10^{-7}$
обесточивание, вызванное сильным обледенением	$1,4 \cdot 10^{-8}$
обесточивание, вызванное пожарами	$1,9 \cdot 10^{-11}$
отказ газотурбинной установки	$2,9 \cdot 10^{-4}$

Интенсивность отказов установок рассчитывается как сумма интенсивности отказов по внутренним (наработка на отказ) и внешним причинам (климатические условия)⁶. По графу состояний (Рисунок2) была составлена и решена численным методом с использованием ЭВМ в системе Mathcad система дифференциальных уравнений⁷.

Итоговая интенсивность отказа определялась как сумма произведений вероятности состояний работоспособности на интенсивность переходов системы из области рабочего состояния в конечные. В работе были определены итоговые интенсивности отказа системы резервирования с последующим ПАЗ при полном обесточивании для каждого часа начиная с момента начала аварии в течении 72 часов. Для сравнения был также рассчитан вариант базовой системы САЭ с 3-мя ДГ и общестанционным ДГ. Полученные результаты показаны на Рисунке 3.

⁶ Юрин В.Е. Исследование систем активного отвода остаточного тепловыделения реакторов на базе комбинирования АЭС с многофункциональными установками: дис. ... канд. технических наук: 05.14.01. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. Саратов. 2015.

⁷ Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2016617127. Оценка вероятности снижения интенсивности повреждения активной зоны реактора АЭС с учетом нестационарных процессов при резервировании собственных нужд на основе дополнительной паротурбинной установки / В.Е. Юрин, М.А. Муртазов // Заявка от 29.04.2016, зарегистрировано 27.06.2016.

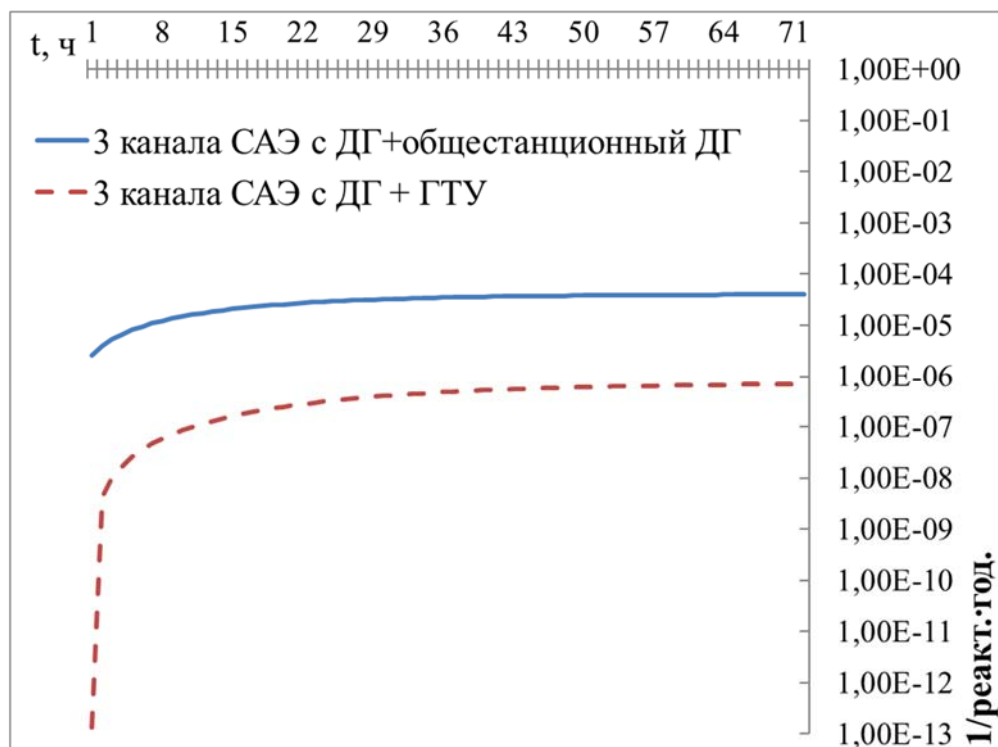


Рисунок 3. Зависимости интенсивностей отказа систем резервирования СН АЭС от времени

На выбранном промежутке времени значения интенсивностей отказа претерпевают значительное изменение, поэтому была посчитана средняя интенсивность аварии с ПАЗ для продолжительности обесточивания 24, 48 и 72 часов (Табл. 2).

Таблица 2 – Расчетные значения интенсивностей аварий с ПАЗ

Интенсивность отказа, 1/реактор-год	Три канала САЭ с ДГ и общестанционный ДГ	Три канала САЭ с ДГ и ГТУ
Среднее для 24 часов	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$
Среднее для 48 часов	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$
Среднее для 72 часов	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-7}$

Как видно из результатов, приведенных в Табл. 2, рассмотренная система аварийного электроснабжения с ДГ и ГТУ удовлетворяет второму целевому показателю, установленному для АЭС с ВВЭР нового поколения, т.е. не превышает $1,0 \cdot 10^{-6}$ 1/реактор-год⁸.

В качестве результирующего экономического эффекта повышения безопасности АЭС при комбинировании с ГТУ принимается среднее

⁸ Токмачев Г.В. Подход к применению ВАБ при проектировании АЭС с реакторами ВВЭР нового поколения // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. – 2007. – Том 3. – №4. – С.44–53.

ежегодное снижение риска возникновения ущерба от аварий с ПАЗ, по сравнению с уровнем безопасности трехканальной САЭ с общестанционным ДГ.

$$\Delta R_t = Y \cdot \sum_{n=1}^{72} \Delta_{syst} / 72 ,$$

где $\Delta\lambda_{syst} = \lambda_{syst}^{\text{САЭ с ДГ и общ. ДГ}} - \lambda_{syst}^{\text{САЭ с ГТУ и ДГ}}$ — снижение интенсивности ПАЗ (для расчета взяты средние значения для 72 часов);

Y — ущерб от аварии с ПАЗ, оценивается, по различным данным, от 80 до 155 млрд. дол./реактор⁹. Для расчетов принят в размере 100 млрд. дол./реактор.

Как показали расчеты, при учете нестационарных состояний конечный результат ежегодного снижения риска возникновения ущерба от аварий с ПАЗ для варианта комбинирования АЭС с ГТУ по сравнению с трехканальной САЭ с ДГ и общестанционным ДГ составил 178 млн. руб./год (курс доллара принят равным 58 рублям).

Выводы

Проведен предварительный вероятностный анализ безопасности АЭС при комбинировании с ГТУ с учетом нестационарных состояний оборудования в аварийном режиме. Как показали расчеты, рассмотренная трехканальная система аварийного электроснабжения с дизель-генераторами и ГТУ удовлетворяет второму целевому показателю, установленному для АЭС с ВВЭР нового поколения, т.е. интенсивность повреждения активной зоны не превышает $1,0 \cdot 10^{-6}$ 1/реактор-год. Ежегодное снижение риска возникновения ущерба от аварий с ПАЗ для варианта комбинирования АЭС с ГТУ по сравнению с трехканальной САЭ с ДГ и общестанционным ДГ составило 178 млн. руб./год.

⁹ Аминов Р.З., Юрин В.Е. Оценка эффективности использования активной системы отвода остаточного тепловыделения при обесточивании на примере реактора ВВЭР-1000 // Известия РАН. Энергетика. – 2014. – №6. – С. 61–72.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ: ЗАДАЧИ, ПРОБЛЕМЫ, РЕШЕНИЯ

**СБОРНИК ТРУДОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ
(С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ) НАУЧНО-
ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
НАУЧНЫХ, НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ,
АСПИРАНТОВ И СТУДЕНТОВ**

ООО «Полиграф-Мастер»

г. Челябинск, ул. Академика Королева, 26

Тел.: (351) 281-01-64, 281-01-65, 281-01-66

E-mail: P-master74@mail.ru

Государственная лицензия на издательскую деятельность

ИД № 02758 от 04.09.2000 г.

Государственная лицензия на полиграфическую деятельность

ПД № 11-0092 от 17.11.2000 г.

Усл.п.л.34,3 Тираж 500 экз. Заказ № 1727