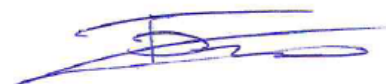


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Самарский государственный технический
университет»

На правах рукописи



Будко Степан Игоревич

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС СИСТЕМЫ ПЛАВКИ
ГОЛОЛЁДА НА ПРОВОДАХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ БЕЗ
ОТКЛЮЧЕНИЯ НАГРУЗКИ**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Базаров А.А.

Самара – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ БОРЬБЫ С ОБРАЗОВАНИЕМ ГОЛОЛЁДА НА ПРОВОДАХ.....	19
1.1. Методы диагностирования и обнаружения образования гололёда на проводах ЛЭП	22
1.1.1. Метод измерения веса и натяжения проводов	23
1.1.2. Локационное зондирование	24
1.1.3. Беспроводные и интеллектуальные системы мониторинга.....	25
1.1.4. Устройства контроля параметров проводов ЛЭП	26
1.1.5. Гравитационный метод.....	27
1.1.6. Аэродинамический метод	28
1.2. Прогнозирование возникновения гололёда на ЛЭП	28
1.2.1. Обучаемые нейронные сети	29
1.2.2. Математическое моделирование прогнозирования	30
1.3. Тепловые методы плавки гололёда на проводах ЛЭП.....	30
1.3.1. Мобильная установка плавки гололёда	31
1.3.2. Подключаемый источник реактивной мощности	32
1.3.3. Двухфазный режим работы ЛЭП	33
1.3.4. Наложение постоянного тока на переменный	33
1.3.5. Плавка переменным током	34
1.3.6. Плавка токами высокой частоты	34
1.3.7. Плавка импульсами постоянного тока	35
1.3.8. Плавка реактивной составляющей тока	35
1.4. Механические, химические и конструктивные способы очистки гололёда	36
1.5. Выводы по главе 1	37
2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ, ТЕПЛОВЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОВОДАХ ЛЭП ПРИ ПЛАВКЕ ГОЛОЛЁДА.....	39
2.1. Математическая модель электромагнитных процессов в системе «провод – окружающая среда»	39

2.2. Математическая модель тепловых процессов в системе «провод – ледяная оболочка»	41
2.3. Математическая модель тепловых процессов в системе «провод – ледяная оболочка» с имитацией проплавления	44
2.4. Уточнение условий теплообмена провода с окружающей средой	46
2.5. Математическая модель тепловых процессов в системе «провод – ледяная оболочка» при ограниченной мощности	48
2.6. Математическое моделирование процесса проплавления ледяной оболочки на проводах при различных видах осадков	53
2.7.1. Математическая модель тепловых процессов в воздушной среде в системе плавки гололёда на проводах линии электропередачи	54
2.7.2. Математическая модель гидродинамических процессов в воздушной среде в системе плавки гололёда на проводах линии электропередачи	57
2.8. Математическая модель теплового состояния провода после сброса ледяной оболочки в режиме протекания тока плавки	61
2.9. Математическая модель процесса подогрева проводов для предупреждения образования гололёда на воздушных ЛЭП	62
2.10. Математическая модель электрического режима участка сети при плавке гололёда	63
2.11. Обоснование математических моделей тепловых и электрических процессов при плавке гололёда	68
2.12. Выводы по главе 2	70
3. МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПЛАВКЕ ГОЛОЛЁДА НА ВОЗДУШНОЙ ЛЭП	72
3.1. Моделирование электромагнитных процессов в системе «фазный провод – ледяная оболочка – окружающая среда»	72
3.2. Моделирование тепловых процессов в системе «провод ледяная оболочка»	76
3.3. Имитационное моделирование тепловых процессов проплавления в системе «провод – ледяная оболочка»	84
3.3.1. Моделирование проплавления с фиксированной скоростью оболочки	84
3.3.2. Моделирование проплавления с движущимся проводом	91

3.4. Моделирование тепловых процессов в системе «провод ледяная оболочка» с определением времени разрушения ледяного слоя в условиях ограниченной мощности	96
3.5. Моделирование проплавления ледяной оболочки в зависимости от её физических свойств и толщины	106
3.6. Моделирование термогидродинамических процессов в воздушной среде в системе плавки гололёда на проводах линии электропередачи	114
3.7. Моделирование теплового состояния провода после сброса ледяной оболочки в режиме протекания тока плавки	125
3.8. Верификация результатов компьютерного моделирования и сопоставление с данными независимых исследований.....	130
3.9. Выводы по главе 3	132
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНИИ 10 КВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕЖИМА ПЛАВКИ	134
4.1. Исследование параметров системы плавки гололёда	134
4.2. Определение потерь напряжения в линии при плавке гололёда.....	135
4.3. Исходные параметры питающей сети.....	136
4.4. Определение исходных параметров потребителей в системе плавки	137
4.5. Расчет и выбор силового оборудования системы плавки.....	140
4.6. Моделирование режимов работы ЛЭП	141
4.7. Экономическая эффективность технологии системы плавки	149
4.8. Сравнительный анализ и обоснование электрических режимов разработанного комплекса	157
4.9. Выводы по главе 4.....	159
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	161
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	164
Приложение А.2 Акт внедрения ООО «Проект-Электро».....	182
Приложение Б	183
Моделирование тепловых процессов в системе «провод – ледяная оболочка».....	183
Приложение В	185

Моделирование тепловых процессов в системе «провод – ледяная оболочка».....	185
Приложение Г	187
Моделирование тепловых процессов имитации проплавления в системе «провод – ледяная оболочка» с заданной скоростью оболочки	187
Приложение Д.....	189
Моделирование тепловых процессов имитации проплавления в системе «провод – ледяная оболочка» с движущимся проводом.....	189
Приложение Е	190
Моделирование проплавления ледяной оболочки в зависимости от её физических свойств и толщины	190
Приложение Ж.....	193
Моделирование теплового процесса нагрева голых проводов в режимах плавки и профилактическом.....	193
Приложение З.....	195
Методики численного моделирования тепловых и термогидродинамических процессов	195
Приложение 3.1.....	195
Методика моделирования тепловых процессов в системе «провод – ледяная оболочка – окружающая среда».....	195
Приложение 3.2.....	199
Методика моделирования термогидродинамических процессов в системе «провод – ледяная оболочка – окружающая среда».....	199
Приложение И.....	202
Методика определения параметров системы стабилизации напряжения в режиме плавки гололёда	202

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы

Диссертация посвящена разработке электротехнического комплекса для плавки гололёда на проводах ЛЭП 10 кВ без отключения потребителей. Решаются задачи обеспечения достаточной мощности тепловыделения при ограниченном токе и выбора оборудования, не нарушающего режимы работы линий.

Проблема гололёдообразования особенно актуальна для регионов с повышенной влажностью, низкими температурами и ветровой активностью. Образование ледяной муфты на проводах приводит к разрушению опор, обрыву проводов, повреждению изоляторов и арматуры, что нарушает энергоснабжение и требует значительных затрат на восстановление.

Наиболее эффективный метод борьбы — нагрев проводов большим током. Однако существующие установки плавки гололеда требуют отключения линии и потребителей, длительной подготовки, что приводит к продолжительным перебоям в электроснабжении и низкой оперативности.

Минимизация ущерба возможна при оперативном обнаружении гололёда и плавке без отключения нагрузки. Такое решение может быть реализовано при использовании резерва мощности источника для загрузки линии реактивными токами, обеспечивающими достаточное тепловыделение. Настройка параметров выполняется с помощью подбора емкости конденсаторной установки в начале линии и подключением индуктивной нагрузки параллельно электроприемникам потребителя.

Нагрев проводника до температуры выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ предотвращает образование гололёда. При уже возникшем обледенении пропускание повышенного тока вызывает резистивный нагрев, плавление ледяной муфты и её осыпание.

Преимущество метода — отсутствие отключения потребителей, что обеспечивает бесперебойное электроснабжение и повышает надёжность системы. При этом контроль наличия гололёда и оперативности его предотвращения осуществляется по сигналам от датчиков гололёдной нагрузки, а предотвращение перегрева провода гарантируется ограничением тока плавки на основе расчёта теплового режима. Однако существующие разработки не лишены недостатков: остаются нерешёнными вопросы выбора оптимальных режимов плавки для различных типов проводов и климатических условий, отсутствуют универсальные критерии оценки эффективности таких комплексов, а также недостаточно изучено их влияние на смежное оборудование и режимы работы энергосистемы в целом.

На сегодняшний день остаются не решёнными следующие научно-технические задачи: отсутствуют апробированные методики расчёта тепловых режимов плавки гололёда без отключения нагрузки для проводов различных марок и сечений, работающих в составе реальных электрических распределительных сетей; не разработаны рекомендации по выбору параметров комплекса (тока плавки, ёмкости конденсаторных батарей, параметров нагрузочного реактора и времени плавки) для конкретных типов линий без предварительного отключения потребителей; не определены режимы работы электротехнического комплекса плавки без отключения нагрузки, при которых гарантируется поддержание нормативного уровня напряжения у потребителей, исключается термическое повреждение проводов, снижение их механической прочности и ускоренное старение изоляции (для изолированных проводов).

Таким образом, существует объективная необходимость в дальнейших исследованиях, направленных на разработку и применение электротехнического комплекса плавки без отключения нагрузки. В настоящей диссертации предлагается подход, позволяющий уточнить параметры работы электротехнического комплекса плавки без отключения нагрузки, разработать методику оценки его эффективности и обосновать

условия применения, обеспечивающие снижение аварийности, вызванной гололёдными отложениями, при сохранении бесперебойного электроснабжения потребителей.

Степень разработанности проблемы

При рассмотрении методов плавки гололеда на проводах линий электропередачи, а также причин его возникновения следует выделить, что способ очистки проводов от налипшего гололеда путем нагрева электрическим током является широко применяемым на трассах ЛЭП.

Исследованию процессов образования гололёда, их прогнозированию, а также разработке методов борьбы с этим явлением посвящено значительное количество трудов российских и зарубежных специалистов. Среди основных направлений исследований можно выделить следующие:

- вопросы мониторинга, прогнозирования и обнаружения гололёдных отложений рассмотрены в работах Д.А. Ярославского, Садыков М.Ф. [1], Е.И. Сацука [2-6], В.А. Соловьева [7-8], Р.Г. Минуллина [9-10], Бердникова Р.Н., Горюшина Ю.А., Дементьева Ю.А., Засыпкина А.С., Левченко И.И., Шовкопляса С.С., А.А. Аллилуева, Е.В. Рябухи [11-14] и Панасенко М. В., Д.А. Брыкина, В.В. Петрова, И.С. Скорикова, С.Б. Стебенькова, Н.П. Хромова, Д.В. Яковлева [15-16]. Разработка аппаратных средств и устройств контроля отражена в патентах В.Я. Башкевича, Гапоненкова, С.В. Аверьянова, В.И. Золотарёва, Г.Г. Угарова, Гапоненкова М.П., Аверьянова С.В., Золотарёва В.И., [17-18];

- математическое моделирование тепловых и электротехнических процессов. Расчет нестационарных температурных режимов и нелинейных процессов теплообмена (уравнений теплового баланса) рассмотрен в работах В.Н. Горюнова и С.С. Гиршина, Кузнецова Е. А., Петровой Е. В., Бигуна А. Я. [19-20]. Моделирование динамической пропускной способности линий и прогнозирование токовых нагрузок рассмотрено в трудах зарубежных исследователей D.J. Morrow, Abdelkader S. M. [21] и Nguyen Huu-Minh, Lilien Jean-Louis, Schell Peter [22]; Моделирование процессов в

электротехнических установках для плавки гололеда с использованием реактивных токов на ВЛ 10 кВ представлено в работах А.Г. Лютова, В.В. Карташова, Г.Э. Рахматуллиной, Ивановой Г. Э. и Л.Э. Рогинской [23-25];

- разработка способов, электротехнических комплексов и систем для плавки гололёда представлена в научных публикациях и патентах И.И. Левченко, А.С. Засыпкина, Е.И. Сацука, С.С. Шовкопляса, А.Н. Щурова [4-6, 11, 13-14, 26], А.Ю. Елизарьева, А.Р. Валеева, М.Б. Гузаирова, В.А. Максимова, К.В. Бобина [27-29], В.И. Каганова [30-34], М.К. Гуревича, Репина А.В., Шершнева А.Ю., Шершнева Ю.А. [35] и Б.М. Антонова, Исакаева Э. Х., Королева В. А., Мордынского В. Б., Сон Э. Е., Терешонокова Д. В., Тюфтяева А. С., Юсупова Д. И. [36];

- теоретические основы и физика атмосферного обледенения конструкций отражены в работах зарубежных ученых: М. Farzaneh [37-38], L. Makkonen [39], S. Fikke [40-41], H. Olafsson, Eliasson A. J., Thorsteins E. [42-43], B.J. Wareing, Nygaard, B. E. [44], Y. Sakamoto [45], а также систематизированы в обобщающих технических брошюрах международного совета по большим электрическим системам CIGRE [46];

- применение современных информационных и специальных технологий исследовано в трудах Nan Wen, Bo Yan, Zheyue Mou, Guizao Huang, Hanxu Yang, Xin Lv [47] (прогнозирование обледенения на основе машинного обучения) и C.R. Sullivan [48] (использование высокочастотного нагрева). Вопросы применения роботизированных комплексов для диагностики и очистки проводов раскрыты в публикациях [49-50];

- фундаментальные процессы теплообмена в движущейся газовой среде, являющиеся основой термогидродинамического анализа, рассмотрены в трудах М.А. Михеева, И.М. Михеевой [51] и С.С. Кутателадзе [52]. Принципы моделирования турбулентности описаны в исследованиях И.А. Белова, С.А. Исаев [53]. Нормативно-методическое обеспечение и вопросы надежной эксплуатации ВЛ отражены в методических указаниях Бургсдорда

В.В., Никитиной Л.Г., Никонца Л.А., Хруща П.Р. [54] и монографиях Р.М. Рудаковой [55].

Несмотря на большое число исследований, остаются нерешёнными следующие вопросы:

- разработка математических моделей тепловых процессов в проводнике с ледяной оболочкой, с учетом неравномерного таяния льда, позволяющих определить параметры нагрева при различных значениях тока линии, температуры среды и скорости ветра;
- моделирование тепловых процессов в системе «провод – ледяная оболочка» при разных скоростях ветра и определение скорости перемещения ледяного слоя во время плавки;
- определение величины тока в линии, обеспечивающей достаточную мощность тепловыделения для плавления льда без перегрузки трансформатора и перегрева провода.

Особенностью разработки электротехнического комплекса для плавки гололёда на ЛЭП 10 кВ без отключения потребителей является необходимость учета дефицита мощности, ограничений по времени переключений и несовершенства систем контроля. На линиях 6–10 кВ требуется особо тщательное обоснование величины тока линии, чтобы обеспечить плавление без перегрузки трансформатора.

Получение параметров системы плавки, данных о мощности тепловыделения и токах, а также разработка методик расчёта электрооборудования и моделирования электромагнитных, тепловых и термогидродинамических процессов являются актуальной задачей.

Цель диссертационной работы - разработка электротехнического комплекса для плавки гололёда на линиях 10 кВ без отключения потребителей и снижения качества напряжения с помощью численного моделирования тепловых процессов в проводах с обледенением и электромагнитных процессов в электрической линии.

Задачи диссертационного исследования:

- разработка математической модели электромагнитных процессов в системе проводов ЛЭП;
- разработка математических моделей тепловых процессов в системе «воздух – ледяная оболочка – проводник» в условиях образования гололёда на проводах ЛЭП;
- исследование тепловых процессов в системе «проводник – ледяная оболочка – окружающая среда» во время плавки гололеда;
- разработка математической модели термогидродинамического процесса в системе «воздух – поверхность провода» для определения параметров процесса теплообмена;
- разработка методики расчета времени плавки гололеда и определения коэффициентов теплообмена на проводах ЛЭП;
- расчет параметров системы «трансформатор – конденсаторные установки параллельной и последовательной компенсации – ЛЭП – реактор» с целью обеспечения заданного режима плавки, ограничения токов и поддержания допустимого отклонения напряжения у потребителей;

Решение перечисленных выше проблем в совокупности составляет основное содержание диссертации, выполненной автором в Самарском государственном техническом университете.

Объектом исследования является электротехнический комплекс системы плавки гололёда на проводах ЛЭП напряжением 10 кВ, обеспечивающий расплавление и опадение ледяной муфты без предварительного отключения конечных потребителей.

Предмет исследования – электромагнитные, тепловые и гидродинамические процессы в системе проводов с ледяной оболочкой и окружающей воздушной среде, электрические режимы работы ЛЭП при нормальной работе и в условиях плавки.

Методы исследования

Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы математического моделирования, теории тепловых,

электромагнитных и термогидродинамических процессов, численные методы решения электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов, методы компьютерного моделирования.

Достоверность результатов работы оценивалась путем сравнения результатов численных экспериментов с данными, полученными в работах других авторов.

Научная новизна

1. Разработана уточненная математическая модель тепловых процессов в системе «провод – ледяная оболочка – окружающая среда», отличающаяся учетом влияния направления ветра на значения коэффициента теплообмена с окружающей средой локальных участков системы, изменяющихся физических свойств в процессе плавлении ледяной оболочки.

2. Определен алгоритм расчета процесса проплавления ледяной оболочки без перестроения сетки конечных элементов в системе «проводник – ледяная оболочка», позволяющий рассчитать скорость и время опадения ледяной оболочки при плавке;

3. Предложен комплексный подход к определению параметров электротехнического комплекса плавки гололёда без отключения нагрузки, основанный на совместном использовании математического моделирования тепловых процессов в проводнике и анализа электрических режимов оборудования сети 10 кВ.

Практическая значимость результатов работы

Практическая ценность проведенных исследований определяется следующими результатами:

1. Разработана усовершенствованная методика расчёта тепловых процессов при плавке гололёда, отличающаяся учётом конструктивных параметров проводов и изменения взаимного расположения провода с ледяной оболочкой, позволяющая определить минимальное время воздействия тока, необходимое для разрушения ледяной оболочки, что даёт

возможность исключить длительный нагрев провода и сократить энергозатраты на плавку;

2. Предложена усовершенствованная методика расчёта тепловых потоков с поверхности провода и коэффициентов конвективного теплообмена с окружающей средой, которая позволяет учитывать направление и скорость ветра, что повышает точность определения времени, необходимого для плавки гололёда, и снижает риск перегрева провода;

3. Разработана компьютерная модель электрических процессов системы «трансформатор – устройства последовательной и параллельной компенсации реактивной мощности - линия электропередачи – нагрузочный реактор», позволяющая определять параметры системы, обеспечивающие стабильное напряжение на зажимах потребителей в режиме плавки;

4. Создана и апробирована методика расчёта параметров схемы плавки гололёда и выбора оборудования, которая позволяет определить режим плавки при ограниченной мощности трансформатора и пропускной способности линии, что даёт возможность использовать предложенный комплекс на существующих подстанциях без модернизации основных силовых элементов;

5. Обоснована эффективность применения системы плавки с функциями автоматизированного мониторинга гололедообразования. Предложенный подход позволяет повысить надёжность электроснабжения потребителей и сократить время процесса плавки гололёда по сравнению с классическими методами.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждаются корректным использованием математического аппарата и согласованием с данными, известными из литературы.

Реализация результатов работы

Результаты исследований электромагнитных, тепловых и термогидродинамических процессов в проводниках ЛЭП и окружающей среде при плавке гололёда, в части методики проектирования,

математических моделей, компьютерного моделирования, внедрены в учебном процессе СамГТУ (г. Самара) при подготовке бакалавров по профилю «Электротехнологические установки и системы» и магистров по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника». Результаты расчета и выбора силового электрооборудования для системы плавки в виде методики проектирования и математического компьютерного моделирования внедрены в практику подготовку бакалавров профиля «Электроснабжение» и магистров профиля «Оптимизация систем электроснабжения и повышение их эффективности»;

Разработанные в диссертации научные положения внедрены в проектную практику ООО «Проект-Электро» (г. Самара) в виде методик расчета тепловых и термогидродинамических процессов в системе «провод - ледяная оболочка – воздух», при определении и выборе силового электрооборудования для систем плавки гололёда.

Апробация работы

Материалы диссертационного исследования докладывались и обсуждались на:

X Международной научно-практической конференции «Мировые тенденции развития науки и техники: пути совершенствования» (г. Москва, 2022); II Всероссийской с международным участием молодежной конференции «Бутаковские чтения» (г. Томск, 2022); XXXII Всероссийской научно-практической конференция «Наука и образование в новых реалиях: проблемы, дискуссии, пути совершенствования» (г. Ростов-на-Дону, 2023); Международной научно-технической конференции «Автоматизация, энергетика и машиностроение: технологии и инновации»; Международной научно-практической конференции «Теоретические и практические аспекты развития современной науки» (г. Нефтекамск, 2026); Международной научно-практической конференции «Современная наука: теоретический и практический взгляд» (г. Астана, 2026).

Публикации

По результатам диссертационной работы опубликовано 17 печатных работ общим объемом 11,77 п.л. (в том числе лично автора - 6,84 п.л.), из них 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад автора. В работах, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежит: в работе [111] – анализ существующих методов обнаружения гололёда; в работах [112-124] – разработка математических и компьютерных моделей; в работах [118-119] – моделирование и анализ термогидродинамических процессов в проводнике; в работе [112] – постановка задачи, моделирование и анализ эффективности алгоритма расчета тепловых процессов в проводах; в работах [125-126] – разработка методики расчета силового электрооборудования, его расчет и выбор, настройка компьютерной математической модели электрических процессов в цепи системы плавки; в работе [127] – определение параметров схемы и моделирование режима работы ЛЭП при плавке гололёда, регулировка параметров, приводящих к возникновению последовательного резонанса напряжений в сети.

На защиту выносятся:

1. Математические модели тепловых процессов в проводнике с ледяной оболочкой в режиме плавки гололёда и методика расчета процесса её проплавления, учитывающие перемещение ледяной оболочки относительно провода;
2. Математическая модель термогидродинамических процессов в системе «провода ЛЭП – воздух» и основанная на ней методика, позволяющая определить коэффициенты конвективного теплообмена на поверхности провода при различных скорости и направлении ветра;
3. Методика определения электрических параметров системы плавки гололеда и выбора силового оборудования на базе компьютерного моделирования, учитывающая ограниченную мощность силового трансформатора и пропускную способность линии;

4. Система плавки гололёда на проводах ЛЭП 10 кВ, функционирующая в условиях бесперебойного электроснабжения потребителей.

Соответствие паспорту специальности

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы по п.1. «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем», п.3. «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления», п.4. «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 163 страницах машинописного текста; содержит 51 рисунков и 19 таблиц, список использованных источников, включающий 127 наименования, 9 приложений.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, задачи, научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор существующих технологий и систем плавки гололёда. Проанализированы методы и устройства борьбы с обледенением. Сделан вывод о необходимости разработки усовершенствованной системы плавки без отключения нагрузки и сформулированы задачи диссертации.

Во второй главе разработана совокупность математических моделей:

- комплекс нестационарных тепловых моделей (нагрев голого провода, подогрев и проплавление ледяной оболочки) с учётом фазовых переходов «лёд–вода»;
- модель определения уточнённых коэффициентов теплообмена на основе термогидродинамического анализа приповерхностного слоя;
- модель определения электрических режимов работы электрооборудования и линии электропередачи в режиме плавки гололёда.

В третьей главе на основе разработанных математических моделей выполнено компьютерное моделирование:

- тепловых процессов в системе «провод – ледяная оболочка – окружающая среда»;
- термогидродинамических процессов обтекания провода воздушным потоком (с определением уточнённых коэффициентов теплообмена);
- режимов нагрева голого провода для профилактического подогрева.

В результате моделирования определена токовая нагрузка, гарантированно проплавливающая ледяную оболочку при наихудших условиях, а также установлено время полного проплавления в зависимости от толщины льда, температуры и скорости ветра. Установлено, что при низких скоростях ветра возникает риск перегрева провода после освобождения ото льда; при высоких скоростях ветра длительный режим плавки безопасен.

На основе моделирования тепловых процессов в системе «провод – ледяная оболочка – окружающая среда» разработана методика расчета времени плавки гололёда и выбора безопасных токовых нагрузок, исключаящих перегрев провода. По результатам термогидродинамического определения уточнённых коэффициентов теплообмена предложена методика корректировки режимов плавки с учетом ветровых воздействий.

В четвёртой главе предложена система плавки гололёда на ЛЭП 10 кВ без отключения нагрузки. Обоснована принципиальная схема с нагрузочным

реактором в конце линии и конденсаторной батареей (УКРМ) на шинах подстанции.

Выполнен расчёт и выбор оборудования: нагрузочного реактора, конденсаторной батареи, включаемой параллельно линии и предназначенной для компенсации реактивной мощности, конденсаторной батареи, подключаемой последовательно с линией и предназначенной для повышения напряжения на зажимах потребителей.

Моделированием в Multisim определены условия для возникновения последовательного резонанса с целью повышения напряжения; определены ёмкости конденсаторных батарей, включаемых параллельно и последовательно с линией, обеспечивающие снижение реактивного тока силового трансформатора ГПП и номинальное напряжение у потребителя (10,5 кВ). Сформулированы требования к компоновке оборудования (УКРМ и батарея - в РП-10 кВ, реактор - в шкафу возле КТП).

Разработана методика имитационного моделирования электрических режимов системы плавки.

Выполнена экономическая оценка. Подтверждена эффективность системы, обеспечивающей бесперебойное электроснабжение и предотвращение многомиллионных убытков.

1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ БОРЬБЫ С ОБРАЗОВАНИЕМ ГОЛОЛЁДА НА ПРОВОДАХ

Гололёдные образования на проводах – это масштабная проблема, которой подвержена электроэнергетика РФ. Аварии, вызванные ледяными отложениями на ЛЭП, наносят материальный ущерб стране, связанный с недоотпуском электроэнергии и работами по восстановлению поврежденных линий. В связи с этим, разработка методик своевременного прогнозирования и оперативной плавки гололёдообразования, позволяющих смягчить или избежать негативных последствий, является актуальной задачей.



а



б

Рисунок.1.1. Последствия образования гололёда на проводах ЛЭП

а – интенсивное образование гололёда на ЛЭП; б - обрыв проводов под весом гололёдной нагрузки

При проектировании электротехнических комплексов плавки гололеда на воздушных линиях (ВЛ) электропередачи необходимо строго разграничивать климатические параметры, применяемые для механического расчета прочности ЛЭП, и эксплуатационные параметры, определяющие тепловые режимы очистки проводов [56]. Территория РФ районирована по толщине стенки гололеда на I–VII районы, где нормативная толщина варьируется от 10 до 40 мм, а также особые районы с толщиной стенки свыше 40 мм [57]. Большинство распределительных сетей напряжением 10

кВ эксплуатируются в I–IV районах (нормативная стенка 10–25 мм). В то же время, по ветровому давлению территория разделена на I–VII районы. Расчетное ветровое давление при гололеде для ВЛ напряжением до 20 кВ должно приниматься не менее 200 Па (что эквивалентно скорости ветра 18,1 м/с) [57]. Расчетный ток плавки быть достаточным для расплавления гололеда в течение промежутка времени не более 60 мин на участке линии, для которой предназначена плавка, с проводом (грозозащитным тросом) наибольшего сечения исходя из значений максимальной толщины стенки гололеда и наихудших метеоусловий (минимальная температура воздуха, максимальная скорость ветра с направлением, перпендикулярным оси провода) [58-59]. Кроме того, традиционные схемы плавки предполагают обязательный вывод линии из нормального режима работы и отключение потребителей, что является существенным недостатком для распределительных сетей 10 кВ.

Статистика технологических нарушений в российских сетях, по данным ПАО «Россети» и ПАО «ФСК ЕЭС» за последние 2024-2026 гг. показывает, что климатические аномалии, сопровождающиеся ледяными дождями и резкими перепадами температур, по-прежнему остаются главной причиной массовых обрывов воздушных линий. Так, в феврале 2024 года масштабный ледяной дождь в зоне ответственности ПАО «Россети Юг» (Ростовская область) привел к тому, что толщина ледяной муфты на проводах достигла 4 сантиметров. Критическое превышение допустимых весовых нагрузок вызвало каскадное падение опор и обрывы проводов, в результате чего без электроснабжения одномоментно остались свыше 200–250 тысяч человек [60]. В осенне-зимний период 2024/2025 гг. в Поволжье также фиксировалось экстремальное гололедообразование. По официальным данным ПАО «Россети Волга», для предотвращения аварий энергетикам пришлось провести 364 плавки гололеда на проводах воздушных ЛЭП, из которых 145 плавок было реализовано непосредственно в начале 2025 года [61]. В Северо-Кавказском федеральном округе только филиалом «Россети

Северный Кавказ» – «Ставропольэнерго» в 2024 году было осуществлено 274 плавки на 337 линиях электропередачи классом напряжения 6–110 кВ [62]. Проблема остается острой и для северных регионов: в январе 2026 года обледенение проводов в совокупности с ветровой нагрузкой спровоцировало крупную аварию и блэкаут в энергосистеме Мурманской области [63]. Данная статистика наглядно доказывает, что, несмотря на применение традиционных методов плавки с отключением потребителей, электросетевые компании остро нуждаются во внедрении автоматизированных комплексов раннего обнаружения и ликвидации гололеда в рабочем режиме сети.

Финансовые последствия подобных аварий для электросетевых компаний носят катастрофический характер. По оценкам региональных властей и экспертов, ущерб от массовых обрывов ЛЭП и разрушения инфраструктуры в ходе ледяных дождей исчисляется сотнями миллионов рублей. Например, по официальным данным, прямой ущерб энергосистеме Приморского края от экстремального гололедообразования превысил 600 млн рублей [64]. На ликвидацию последствий и выплаты компенсаций за материальный ущерб в результате ледяного дождя в Нижегородской области было направлено около 500 млн рублей [65], а последующая программа реконструкции пострадавших сетей оценивается в 3 млрд рублей [66].

Наиболее подвержены гололедообразованию районы следующих регионов: Республика Татарстан, Мурманская область (Хибины, Кольский полуостров), Дальний Восток (Камчатка, Сахалин, Курильские острова), Западная Сибирь, Северный Кавказ, а также Центральный, Приволжский, Южный и Северо-Западный федеральные округа, где часты вторжения тёплых воздушных масс. Интенсивность обледенения в разных регионах существенно различается: от редких слабых отложений до многократных образований в течение осенне-зимнего периода. Как правило, обледенение фиксируется при температуре от +2 до -10 °С и скорости ветра 5–20 м/с.

Аварии, возникающие из-за образования гололёда, являются наиболее тяжёлыми и массовыми в энергосистемах. Гололёд образуется при

конденсации переохлаждённых капель тумана, ледяного дождя или мокрого снега на охлаждённой поверхности провода. Чаще всего отложения имеют эллиптическую форму и располагаются с наветренной стороны; при ветре вдоль провода образуется более пористая муфта по всей поверхности. Плотность гололёда составляет 600–900 кг/м³.

Наиболее эффективный способ борьбы — нагрев проводов электрическим током. Если температура провода выше 0 °С, гололёд не образуется; при наличии отложений нагрев вызывает их таяние и сброс. Талая вода стекает в нижнюю часть муфты, где возможно повторное замерзание. Скорость нагрева существенно зависит от температуры воздуха и скорости ветра: при низких температурах и сильном ветре требуются большие значения мощности и токов.

Основная сложность оперативного решения проблемы — отсутствие быстросействующих и точных методов обнаружения гололёда, а также недостаточная оснащённость средствами диагностики, автоматизации и комплексными системами плавки гололёда.

Задачами анализа существующих современных методов обнаружения образования гололёда и борьбы с ним являются:

- исследование существующих методов борьбы с обледенением;
- определение преимуществ и недостатков существующих методов;
- учет особенностей конструкции систем борьбы с гололедом и методов моделирования процессов плавки в них;
- Оценка актуальности и рациональности разработки системы плавки без отключения нагрузки.

1.1. Методы диагностирования и обнаружения образования гололёда на проводах ЛЭП

Существующие методы обнаружения гололеда разделяются на:

- методы прогнозирования возможного гололёдообразования. Их применение основано на моделировании термодинамического обменного процесса переохлаждённых капель воды с использованием метеорологических данных воздушной среды. Также производится учет технических параметров линии электропередачи [9-10]. Методы прогнозирования являются вероятностными;
- контактные методы с непосредственным контролем процесса образования гололёда на проводах при помощи специальных датчиков и устройств обнаружения гололёда [9-10, 17-18]. Их применение позволяет с достаточной точностью определить необходимый момент начала плавки гололёда. Специализированные датчики и устройства обнаружения гололёда являются измерительными сигнальными устройствами, реагирующими на изменение температуры воздуха, скорости ветра вокруг проводника, удельного сопротивления и веса проводов.

1.1.1. Метод измерения веса и натяжения проводов

Метод измерения веса и натяжения проводов считается наиболее объективным для оценки гололёдной нагрузки в контролируемых пролётах. Датчик устанавливается в точку подвеса гирлянды изоляторов (рисунок 1.2). Показания передаются на диспетчерский пункт для принятия решения о плавке гололёда [9-10, 17-18]. Система контроля внедрена на линиях ОАО «ФСК ЕЭС».

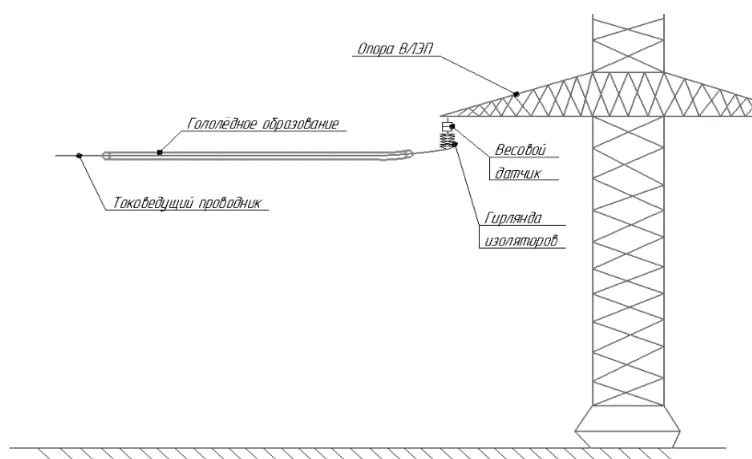


Рисунок 1.2. Реализация метода взвешивания проводов при обнаружении гололёда

Для исключения ложных срабатываний от кратковременных динамических воздействий (порывы ветра, посадка крупных птиц на провод) современные измерительные комплексы используют алгоритмы программной фильтрации. Система реагирует только на монотонное и продолжительное увеличение весовых параметров пролета, характерное для процесса гололедообразования.

К недостаткам метода относится локальность участка измерений: контролируется только пролёт с датчиком, остальная линия остаётся без наблюдения. Для устранения этого недостатка требуется увеличение числа датчиков и устройств передачи данных, что ведёт к росту капитальных затрат. Тензодатчик устанавливается между изолятором и опорой, имеет защиту от электромагнитных полей. Преимуществом является высокая точность измерений (погрешность около 2%).

1.1.2. Локационное зондирование

Гололёд увеличивает затухание сигналов в высокочастотном (ВЧ) канале и снижает скорость их распространения по ЛЭП [9-10].

Метод локационного зондирования основан на подаче импульса электрического сигнала в линию и измерении времени его прохождения до

неоднородности (конца линии, ответвления или участка с гололёдом) и обратно. При появлении гололёда возникает временная задержка, пропорциональная объёму отложений, по которой судят о наличии обледенения. С ростом толщины льда скорость сигнала снижается, затухание увеличивается [9-10]. Однако фиксация отражённых сигналов от границ обледенения затруднена из-за снижения волнового сопротивления [9-10].

На результаты зондирования влияют многочисленные помехи: от промышленной частоты, переходных процессов, коронирования, дуг короткого замыкания (КЗ), атмосферных разрядов, соседних ВЧ-каналов и радиостанций, а также аппаратуры телемеханики, связи и релейной защиты [9-10].

1.1.3. Беспроводные и интеллектуальные системы мониторинга

В современных подходах к диагностике гололёдообразования [1-2, 12] активно применяются комплексные беспроводные системы мониторинга, объединяющие распределенные метеостанции, многопараметрические датчики (контроль температуры, влажности, ветрового давления, угла наклона провода) и системы видеофиксации.

Определение массы ледяных отложений и механических нагрузок на воздушные линии осуществляется путем математического моделирования и применения нейросетевых классификаторов. Данные алгоритмы анализируют информацию об оптическом или механическом изменении провисания провода с учетом влияния рельефа и климатических факторов. Информация с измерительных постов передается по каналам беспроводной связи (например, GSM) в диспетчерские центры для непрерывного анализа состояния линии в реальном времени.

Преимущества таких систем: высокая информативность, возможность дифференциации нагрузок (отделение гололеда от ветрового давления или

развития дефектов троса) и минимизация ложных срабатываний за счет комплексного учета множества факторов.

К недостаткам можно отнести высокие капитальные и эксплуатационные затраты на развертывание и обслуживание множества измерительных постов на протяженных участках воздушных линий (ВЛ); уязвимость электронных компонентов и оптических систем к экстремальным погодным условиям (перепады температур, обледенение оптики); зависимость от стабильности сотового покрытия в удаленных районах и надежности автономных источников питания (батареи, солнечные панели) в зимний период.

1.1.4. Устройства контроля параметров проводов ЛЭП

Стационарные системы мониторинга (например, датчики WTS, УКТП «БЛАЙС», модули ASTROSE, МИГ-ДТПК5 и ДО-3М) [2-4, 9-10, 15-18] представляют собой комплексные решения для дистанционного контроля температуры провода, влажности воздуха и угла провиса.

Автономные модули монтируются непосредственно на проводах ЛЭП и питаются от электромагнитного поля провода или встроенных солнечных панелей. Передача данных осуществляется по беспроводным каналам (GSM) на диспетчерский пункт.

Основные преимущества отечественных устройств обусловлены их адаптацией к суровым климатическим условиям и вибрациям. Однако массовое внедрение систем мониторинга на всех ВЛ остаётся дорогостоящей задачей. Кроме того, постоянная эксплуатация под открытым небом при высоких напряжениях предъявляет экстремальные требования к надёжности электронных компонентов, а проблема автономного питания в зимних условиях с низкой инсоляцией до сих пор не решена полностью.

1.1.5. Гравитационный метод

Гравитационный метод реализуется непосредственным измерением гололёдной и гололёдно-ветровой нагрузок на провод с последующим сравнением с пороговыми значениями. Известны устройства для измерения этих нагрузок с контролем направления ветра на воздушных линиях электропередачи (ВЛЭП) [13]. Схема (рисунок 1.3) содержит три магнитоупругих датчика 1, 3, 6, каждый из которых подвешен между траверсой П-образной опоры и гирляндой изоляторов с фазным проводом.

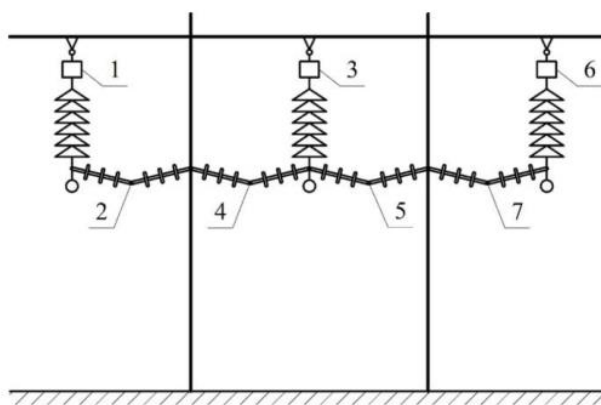


Рисунок 1.3. Устройство для измерения гололёдной и ветровой нагрузок с контролем направления ветра на воздушных ЛЭП

Нижний конец средней гирлянды изоляторов закреплён горизонтальными распорками 4, 5 к обеим стойкам, а левая и правая гирлянды прикреплены к стойкам распорками 2, 7. При боковом ветре соответствующая гирлянда отклоняется, и её датчик измеряет гололёдно-ветровую нагрузку, тогда как средняя гирлянда остаётся неподвижной, и её датчик измеряет только гололёдную нагрузку. По полученным данным преобразователи вычисляют фактическое ветровое давление, отображаемую приборами.

Недостатки устройства: отсутствие автоматической индикации отложений из-за отсутствия порогового устройства; невозможность применения на грозозащитных тросах (их менее трёх); ограниченная область

применения — только для фазных проводов одноцепных линий с П-образными опорами.

1.1.6. Аэродинамический метод

Аэродинамический метод заключается в одновременном измерении направления и скорости ветра, а также фактической ветровой нагрузки на провод. По измеренным параметрам рассчитывается ожидаемая ветровая нагрузка на провод без отложений. Если фактическая нагрузка превышает ожидаемую, фиксируется наличие гололёда [18].

Недостатки метода: возможное заклинивание шарнирного соединения гирлянд изоляторов из-за обледенения, сложность монтажа V-образной подвески, требующая изменений стандартной конструкции [18].

1.2. Прогнозирование возникновения гололёда на ЛЭП

Прогнозирование гололёдообразования на ЛЭП имеет высокую актуальность в связи с серьёзными последствиями для энергосистемы. Оно позволяет: заблаговременно включать обогрев проводов на опасных участках; подготовить аварийные бригады и технику; перераспределить нагрузки и подготовиться к пиковому потреблению; промышленным объектам — перейти на резервное питание или плавно остановить процессы. Применение прогнозирования актуально для снижения влияния обледенения на работоспособность линий [7, 9].

1.2.1. Обучаемые нейронные сети

В работах [1-2, 15] предложена интеллектуальная система прогнозирования гололёдообразования с использованием нечёткой логики. Нейронная сеть выявляет нелинейные зависимости между метеопараметрами и образованием гололёда, обучаясь на реальных данных метеостанций и подстанций Хабаровского края за несколько сезонов, что является сильной стороной исследования.

В работе [47] разработана нейронная сеть для прогнозирования динамических параметров ЛЭП (максимальный провис, горизонтальное отклонение, несбалансированное натяжение) после таяния льда. На основе численных исследований с различными параметрами льда, ветра и конструкции линий создан набор данных. Построены две модели прогнозирования — на основе нейронной сети обратного распространения и метода «дополнительных деревьев», позволяющие быстро и эффективно определять указанные параметры по восьми входным переменным. Модели применимы для линий с большими пролётами и перепадами высот, обеспечивая расчёт изоляционного расстояния и прочности в зонах гололёда.

Прогнозирование износа оборудования после таяния льда позволяет заблаговременно принимать защитные меры и проводить восстановительные работы для повышения надёжности. Полученные данные могут использоваться при проектировании линий с оптимально подобранными характеристиками. Недостатком нейросетей является отсутствие объяснения причинно-следственных связей в отличие от физических моделей.

1.2.2. Математическое моделирование прогнозирования

Обзор методов прогнозирования гололёдообразования на основе метеоданных представлен в работах [7, 9-10]. Фундаментальные исследования в данном направлении ведутся зарубежными научными группами под руководством Н. Olafsson (Исландия) [42-43], М. Farzaneh (Канада) [37-38], S. Fikke (Норвегия) [40-41], L. Makkonen и B.J. Wareing (Великобритания) [39, 44], а также систематизированы в трудах комитета CIGRE [46]. Основой прогноза являются температура, влажность, скорость ветра, рельеф местности и технические параметры линии.

Наиболее интересные результаты получены итальянскими исследователями [67]: на основе прогнозных данных температуры, осадков и ветра определяются зоны риска, затем вычисляется ожидаемая нагрузка на провода. Рассматривается только влажный снег при температуре $0 \div 2$ °С и содержании жидкой воды $15 \div 40$ %. За время $18 \div 24$ ч диаметр ледяной муфты может достигать 15 см, нагрузка – $8 \div 10$ кг/м. Однако достоверность метода невысока: предупреждения носят потенциальный характер, возможны ложные тревоги, прогноз не является указанием к началу плавки.

1.3. Тепловые методы плавки гололёда на проводах ЛЭП

Освобождение проводов ото льда осуществляется механическими, тепловыми, химическими и конструктивными методами. Тепловые способы, включая профилактический нагрев и плавку, являются основными в электрических сетях. Наиболее эффективен метод плавки коротким замыканием, однако он требует отключения линии и специального оборудования, что является его серьезным недостатком.

В связи с этим необходимо рассмотреть и проанализировать другие методы плавки гололёда, позволяющие предотвращать аварии, а также оценить применение разработок, методик и систем, повышающих эффективность борьбы с гололёдообразованием.

1.3.1. Мобильная установка плавки гололёда

В работе [36] представлена мобильная установка плавки гололёда (УПГМ) на автомобильном шасси с внедорожным потенциалом для работы на труднопроходимых трассах ВЛ. Оборудование размещено в контейнере, так как работоспособность системы управления дизель-генераторной установки (ДГУ) и преобразователя обеспечивается при температуре не ниже $1 \div 2^\circ\text{C}$. Из-за отсутствия подходящего шасси автоподъёмник и контейнер с оборудованием размещены на двух отдельных автомобилях (рис.1.4).

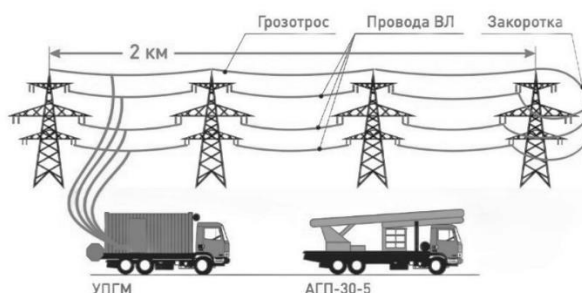


Рисунок 1.4. Упрощенная схема функционирования информационно-измерительной системы

Электрические параметры УПГМ определяются режимами плавки, сопротивлением проводов и возможностями транспортировки. В 20-футовом контейнере на автоконтейнеровозе «КамАЗ-43118» возможна установка ДГУ мощностью до 300 кВт, что предопределило основные параметры. Мобильные системы дополняют комплекс борьбы с гололёдными авариями.

Применение мобильной установки целесообразно для коротких участков ВЛ или при неинтенсивных отложениях. В противном случае предпочтительнее стационарная система.

1.3.2. Подключаемый источник реактивной мощности

Данный метод и реализующее его изобретение [68] относится к способу плавки гололёда на ВЛ 6–10 кВ без отключения потребителей. К линии подключается источник реактивной мощности (ИРМ) так, что поток реактивной мощности направлен встречно потоку активной мощности. Это обеспечивает более равномерное распределение напряжения вдоль линии при том же активном токе в линии и позволяет проводить плавку гололёда без отключения потребителей. Нужно учесть, что емкостной реактивный ток может излишне загружать трансформатор, что не всегда допустимо.

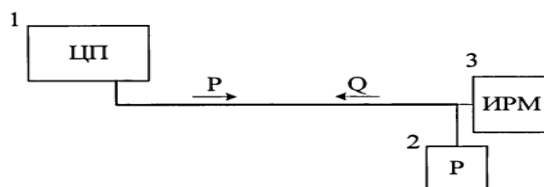


Рисунок 1.5. Упрощенная схема подключения источника ИРМ; Р – активная мощность, Q – реактивная мощность, ЦП – центр питания

Мощность ИРМ подбирается так, чтобы ток в линии при схеме плавки обеспечивал нагрев проводов для удаления или предотвращения гололёда. Для реализации способа могут использоваться как существующие в сетях ИРМ (конденсаторные батареи, синхронные и тиристорные компенсаторы), так и новые, включая мобильные.

1.3.3. Двухфазный режим работы ЛЭП

Предложенный в [69] способ заключается в отключении одной фазы ВЛ и замыкании разъединителей двух других фаз, создавая двухфазный режим электропередачи. Переменный ток от трёхфазного трансформатора через замкнутые разъединители поступает на преобразователь и замыкается через землю на нейтраль, создавая ток нулевой последовательности. Магнитное поле, созданное этим током, индуцирует ток в тросах, вызывая одновременную плавку гололёда на проводе и тросе без отключения всей линии. Аналогично выполняется плавка на других фазах.

Недостатки: отключение одной фазы ограничивает режим электропередачи, что нежелательно для крупных потребителей и ведёт к убыткам от недопоставленной энергии. Также требуется дорогостоящее силовое и преобразовательное оборудование, повышающее себестоимость.

1.3.4. Наложение постоянного тока на переменный

В работах [27, 70] предложен метод плавки гололёда наложением постоянного тока на переменный без отключения потребителей. Метод основан на пропускании постоянного тока по обходной системе шин подстанции.

Однако он требует специальной схемы распределительного устройства, дополнительных заградительных конденсаторов и реакторов, что усложняет эксплуатацию и ограничивает его применение.

1.3.5. Плавка переменным током

В сетях до 110 кВ наиболее распространён метод плавки трёхфазным коротким замыканием [54, 71-74]. Линия отключается от источника, в её конце создаётся искусственное КЗ, и по проводам пропускается повышенный ток, вызывающий нагрев и расплавление льда.

Недостатки метода: отключение потребителей на время плавки (от 1 часа и более), значительные энергозатраты, окисление контактных соединений и провисание проводов.

Другие способы плавки переменным током (перераспределение тока нагрузки, наложение тока с помощью вольтодобавочного трансформатора, встречное включение фаз) не получили широкого практического применения, поэтому в работе подробно не рассматриваются.

1.3.6. Плавка токами высокой частоты

Метод плавки токами высокой частоты основан на поверхностном эффекте: ток течёт по тонкому поверхностному слою провода, эффективное сечение уменьшается, а активное сопротивление возрастает [30-34]. Это позволяет при относительно небольшом токе получить требуемую мощность тепловыделения. Кроме того, повышение частоты упрощает согласование источника с линией и позволяет использовать бесконтактный подвод энергии.

В работе [34] предложено не плавить уже образовавшийся лёд, а предотвращать его появление при приближении гололёдной обстановки путём нагрева проводов до 10–20 °С с помощью высокочастотного тока, накладываемого на ток промышленной частоты. Отключение потребителей и короткое замыкание не требуются.

При этом методе по ЛЭП одновременно протекают токи промышленной и высокой частоты. В сталеалюминевых проводах из-за нелинейности магнитных свойств стали их взаимное влияние не исключено.

Данный способ оказался неконкурентоспособным из-за сложной конструкции проводов (отдельные проволочки с воздушными зазорами) и необходимости в мощных ВЧ-источниках. Опыты на проводах малой длины показали возможность разрыхления и опадания отложений.

1.3.7. Плавка импульсами постоянного тока

В работах [5, 14, 74] предложены способы плавки гололёда импульсами постоянного тока с заданной частотой следования, а также наведёнными токами повышенной частоты. Установки позволяют вести плавку одновременно на нескольких фазах и грозозащитных тросах, снижая энергозатраты по сравнению с плавкой переменным током. Однако существенный недостаток — необходимость отключения ВЛ на время плавки, что ограничивает применение метода.

1.3.8. Плавка реактивной составляющей тока

В работах [23-25] предложен метод плавки гололёда без отключения потребителей за счет создания искусственного резонансного контура (путем подключения к линии дополнительных конденсаторов и дросселей). Это позволяет генерировать в проводах значительный реактивный ток, достаточный для нагрева, тогда как от источника питания потребляется мощность лишь на покрытие потерь активной мощности.

Несмотря на концептуальную привлекательность, предложенные технические решения обладают рядом недостатков, ограничивших их

практическое внедрение. Циркуляция больших реактивных токов может вызывать глубокие просадки напряжения в узлах нагрузки, что требует дополнительной компенсации. Предложенные схемы не позволяют гарантировать термическую стойкость провода и безопасность режима.

1.4. Механические, химические и конструктивные способы очистки гололёда

Механические способы предполагают физическое разрушение ледяной муфты. Химические способы направлены на предотвращение образования или снижение адгезии (сцепления) льда с поверхностью провода. Конструктивные способы предполагают изначальное проектирование и строительство линий, более устойчивых к гололёду. Для корректного анализа требуется рассмотреть каждый метод по отдельности.

Механические способы - скребки, ударные устройства, роботы LineScout и LineROVer [49, 75]) основаны на физическом разрушении ледяной муфты, но не получили промышленного распространения из-за низкой эффективности и сложности применения.

Химические способы - противогололёдные смазки, покрытия супергидрофобные «Изолат» [76-77] снижают адгезию льда, но требуют регулярного нанесения на протяжённые участки, что технически сложно и экономически нецелесообразно.

Конструктивные способы - снегозащитные кольца, антиторсионные демпферы [78], компактные провода AERO-Z [78-79] могут снизить вероятность обледенения, но полностью проблему не решают и требуют значительных затрат на модернизацию линий.

В работах [80-84] предложены комбинированные устройства, сочетающие механическое, химическое и тепловое воздействие, однако они сложны и не нашли широкого применения.

Таким образом, ни механические, ни химические, ни конструктивные методы не обеспечивают надёжной и оперативной борьбы с гололёдом, что подтверждает необходимость развития тепловых методов плавки.

1.5. Выводы по главе 1

- Рассмотрены современные методы обнаружения гололёда: весовые, по провису, локационное зондирование, беспроводные и интеллектуальные системы, а также гравитационный, аэродинамический и ёмкостный способы. Показано, что существующих способов диагностики в изолированном виде недостаточно.
- Проанализированы методы прогнозирования гололёдообразования, включая математическое моделирование метеозависимостей и нейросетевой анализ, для заблаговременной оценки необходимости плавки. Имеющиеся решения позволяют оценить риски образования льда, однако носят вероятностный характер и не обеспечивают выдачу точных физических параметров (тока, времени) для управления режимом плавки, что требует дополнительных разработок моделей самого процесса плавки.
- Выполнен обзор методов борьбы с гололёдом. Большинство из них требуют отключения линии, а работающие без отключения потребителей либо ориентированы на ВЛ высокого напряжения, либо сложны, дороги и не нашли широкого применения.
- Анализ существующих технологий показал, что большинство применяемых способов плавки требуют длительного отключения линии, что недопустимо для современных требований к надёжности электроснабжения. Важнейшей проблемой концептуальных способов плавки без отключения - за

счет реактивной мощности, являются глубокие просадки напряжения в узлах нагрузки и риск термического повреждения провода.

- Выявленные недостатки существующих подходов определяют объективную необходимость в разработке нового электротехнического комплекса плавки, что требует создания математических моделей тепловых, гидродинамических и электрических процессов для определения режимов плавки без отключения потребителей.

2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ, ТЕПЛОВЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОВОДАХ ЛЭП ПРИ ПЛАВКЕ ГОЛОЛЁДА

2.1. Математическая модель электромагнитных процессов в системе «провод – окружающая среда»

При выборе силового электрооборудования для системы плавки, необходимо знать величину тока плавки и время его протекания. Эти параметры невозможно определить без анализа процессов тепловыделения и теплоотдачи.

Разработка электротехнического комплекса плавки гололеда включает определение параметров нагрева и режимов работы ЛЭП путём математического моделирования электромагнитных процессов в системе «проводник – окружающая среда» [85].

Электромагнитная задача формулируется в виде системы уравнений Максвелла [51].

$$\operatorname{rot} \dot{\mathbf{H}} = \dot{\mathbf{J}} = \gamma \dot{\mathbf{E}}; \quad (2.1)$$

$$\operatorname{rot} \dot{\mathbf{E}} = -\frac{\partial \dot{\mathbf{B}}}{\partial t} = -\mu\mu_0 \frac{\partial \dot{\mathbf{H}}}{\partial t}; \quad (2.2)$$

$$\operatorname{div} \dot{\mathbf{B}} = 0; \quad (2.3)$$

$$\operatorname{div} \dot{\mathbf{D}} = \operatorname{div} \left(\varepsilon \varepsilon_0 \dot{\mathbf{E}} \right) = q_0. \quad (2.4)$$

Здесь $\dot{\mathbf{H}}$, $\dot{\mathbf{B}}$, $\dot{\mathbf{E}}$, $\dot{\mathbf{D}}$ – векторы напряженности и индукции магнитного и электрического полей; γ – удельная электропроводимость; μ , ε – относительные магнитная и диэлектрическая проницаемости; μ_0 , ε_0 –

магнитная и диэлектрическая абсолютные проницаемости; q_0 – объемная плотность электрических зарядов; $\dot{\mathbf{J}}$ – вектор плотности тока.

Для электромагнитных задач, связанных с нагревом проводящих материалов на низкой частоте и малых напряженностях электрического поля уравнение (2.4) исключается из рассмотрения из-за малого влияния на общее решение.

Для численного решения системы (2.1) - (2.3) целесообразно перейти от векторов напряженности магнитного поля $\mathbf{H}$ и магнитной индукции $\mathbf{B}$ к векторному магнитному потенциалу $\mathbf{A}$. Главная польза от такой замены заключается в существенном упрощении математического описания. В условиях рассматриваемой двумерной плоскопараллельной задачи (когда токи текут вдоль провода) векторный потенциал имеет единственную ненулевую продольную компоненту A_z . Это позволяет свести сложную систему векторных уравнений с множеством пространственных неизвестных к одному дифференциальному уравнению относительно A_z . Такой подход автоматически удовлетворяет закону сохранения магнитного потока и значительно повышает скорость и устойчивость вычислительного процесса методом конечных элементов. С учетом введенного магнитного векторного потенциала $\mathbf{A}$, преобразованная система уравнений, удобная для численной реализации в Comsol, принимает следующий вид [85]:

$$j\omega \cdot \sigma \cdot \mathbf{A} + \nabla(\mu_0^{(-1)} \cdot \mu_r^{(-1)} \cdot \mathbf{A}) = \mathbf{J}_z^e \cdot \mathbf{e}_z; \quad (2.5)$$

$$\mathbf{A} = A_z \cdot \mathbf{e}_z. \quad (2.6)$$

Здесь: μ_r – относительная магнитная проницаемость среды; $\mathbf{J}_z^e$ – плотность внешнего тока; $\mathbf{e}_z$ – электрический потенциал, приложенный к проводнику; z – координатная ось; σ – электропроводность.

Принимаются граничные условия для расчетной области в виде равенства нулю магнитного поля [51]:

$$\mathbf{A}_z = 0. \quad (2.7)$$

Для расчета задаются электрические и магнитные свойства для воздушной среды, алюминиевых жил и стального сердечника. Электропроводность алюминиевых жил принята равной $\sigma = 3,44 \cdot 10^7 \text{ См} / \text{м}$. Некоторое отличие данного параметра от идеальных справочных значений для химически чистого алюминия вызвано снижением эквивалентной продольной проводимости из-за коэффициента укрутки (удлинение проволок в повивах относительно оси провода), а также наличием переходных сопротивлений. Электропроводность стальных жил задана равной $\sigma = 0,7 \cdot 10^7 \text{ См} / \text{м}$ [53, 54].

Магнитные свойства стального сердечника определяются по кривой намагничивания [85].

В результате решения электромагнитной задачи определяется удельная мощность внутренних источников тепла в жилах провода. Полученные значения мощности тепловыделения могут быть непосредственно переданы в модель тепловых процессов в случае использования мультифизической модели или через интегральную величину в случае раздельного решения электромагнитных и тепловых процессов.

2.2. Математическая модель тепловых процессов в системе «провод – ледяная оболочка»

Полученные в результате решения электромагнитной задачи значения погонных потерь мощности выступают в качестве исходных данных для моделирования нестационарных температурных полей. Для корректной постановки тепловой задачи необходимо перейти от интегральных погонных потерь к распределенным источникам объемного тепловыделения внутри

отдельных элементов провода (стального сердечника и алюминиевых повивов).

Расчёт мощности тепловыделения в проводах марки АС при заданных токах плавки является основой для определения параметров нагрева. Для обеспечения высокой точности тепловой модели в качестве исходных данных для расчета объемных источников тепла используются паспортные значения активного сопротивления провода переменному току. Использование справочных значений позволяет корректно учесть сложную геометрию скрутки проволок, поверхностный эффект, а также влияние магнитной проницаемости стального сердечника без решения нелинейной электромагнитной задачи.

Тепловая задача формулируется в виде дифференциального уравнения в частных производных для двумерной области с внутренними источниками тепла [51-52]:

$$\rho C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + w; \quad (2.8)$$

Где: ρ – плотность материала; C_p – удельная теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; T – температура; w – удельная мощность тепловыделения.

В качестве материалов для подобластей используются алюминий (токоведущие жилы), сталь (сердечник), лед (гололедная муфта) и воздух (окружающая среда). Каждой подобласти присвоены индивидуальные теплофизические характеристики, зависящие от температуры. Расчетная область геометрически разделена на соответствующие подобласти.

Начальные условия заданы в виде равномерного распределения температуры, соответствующей температуре окружающей среды:

$$T(x, y, 0) = T_0(x, y). \quad (2.9)$$

В качестве граничных условий на боковой поверхности проводника выступает конвективный теплообмен [51-52]:

$$\lambda \cdot \frac{dT}{dn} = \alpha \cdot (T - T_C). \quad (2.10)$$

Здесь: α - коэффициент конвективного теплообмена; T_C - температура окружающей среды, n – нормальный вектор к линии границы.

Уравнение теплопроводности (2.8) записано в прямоугольной системе координат. В процессе плавки геометрия ледяной оболочки изменяется, а коэффициент конвективного теплообмена α изменяется по периметру провода неравномерно вследствие поперечного обдува провода. Поэтому уравнение теплопроводности решается в плоской двумерной декартовой системе координат. Переход от упрощенной осесимметричной модели к плоской двумерной задаче обусловлен необходимостью получения объективной картины тепломассопереноса с учетом угловой координаты. Таяние льда и стекание воды под действием гравитации происходят асимметрично, что невозможно отразить в двумерной осесимметричной постановке.

Моделирование фазового перехода (таяние ледяной оболочки) реализовано с помощью эффективной теплоемкости. Для обеспечения сходимости численного решения, фазовый переход задается не скачкообразно при одной температуре, а в узком температурном интервале. Для этого задан перепад температуры $\Delta T = T_{nl1} - T_{nl2}$, равный 2 °С, при котором происходит расплавление. Для ввода зависимости эквивалентной теплоемкости от температуры в качестве свойств материала, кроме ввода табличных значений, используется ступенчатая логическая функция в виде аппроксимирующих выражений функции Хевисайда вида [86].

Процесс плавления имитируется с помощью локального увеличения теплоемкости льда, переходящего в жидкое состояние.

$$C = C_{m\phi} \cdot (1 - H(T - T_{nl1})) + \frac{L}{\Delta T} \cdot (H(T - T_{nl1}) - H(T - T_{nl2})) + C_{ж} \cdot H(T - T_{nl2}). \quad (2.11)$$

Здесь: L - теплота плавления льда; $C_{m\phi}$ - теплоемкость льда; $C_{ж}$ - теплоемкость воды; T_{nl1} - начальная температура плавления ледяной оболочки; T_{nl2} - конечная температура плавления ледяной оболочки; H - ступенчатая функция (функция Хевисайда).

Значения коэффициента теплопроводности среды, плотность среды и удельная теплоемкость при постоянном давлении λ, ρ, C_p задаются в виде зависимостей от температуры с учетом перехода от твердого к жидкому состоянию ледяной оболочки. Начальная температура принята равной температуре окружающей среды 268 К (-5 °С).

Разработанная базовая модель позволяет рассчитать распределение температур при неподвижной ледяной оболочке. Однако процесс очистки провода сопровождается изменением геометрии ледяной муфты и ее смещением под действием силы тяжести. Для учета динамики данного процесса требуется модификация математической модели посредством внедрения алгоритма численной имитации проплавления.

2.3. Математическая модель тепловых процессов в системе «провод – ледяная оболочка» с имитацией проплавления

Прямое численное моделирование динамики проплавления ледяной муфты с учетом реальной многопроводочной структуры провода сопряжено с высокой вычислительной трудоемкостью и сложностями при динамическом перестроении конечно-элементной сетки. Для снижения затрат процессорного времени и обеспечения устойчивости сходимости алгоритма осуществлено изменение структуры проводника — переход к

модели сплошного однородного цилиндрического провода с эквивалентными физическими параметрами.

Математическая модель системы «однородный провод – лёд – среда» формулируется как двумерное дифференциальное уравнение теплопроводности с внутренним источником и вертикальной составляющей скорости для учёта движения оболочки [51-52]:

$$\rho_k C_k \frac{\partial T_k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{np} \frac{\partial T_k}{\partial y} \right) - \nu \frac{\partial T_k}{\partial y} + w + b \frac{\partial T_k}{\partial n}; \quad (2.12)$$

где: ρ – плотность материала; C_k – удельная теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; T_k – температура области k ; w – удельная мощность тепловыделения внутренних источников; ν – вертикальная составляющая скорости для учёта движения оболочки; n – вектор, перпендикулярный поверхности раздела фаз; b – скорость движения фронта плавления.

Процесс плавления отражен в уравнении теплоемкости:

$$C = C_0 + \frac{L}{\Delta T} \quad (2.13)$$

Здесь: L – теплота плавления; ΔT – заданный интервал температур плавления от 1 до 5 градусов (в расчетах принято значение 1 градус).

Начальные и граничные условия с конвективным теплообменом [51-52] аналогичны условиям (2.9, 2.10).

Эквивалентные теплофизические свойства (плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности) проводника определяются как средневзвешенные величины по площадям поперечного сечения конструктивных элементов по выражению:

$$X_{eq} = \frac{X_{Al} \cdot S_{Al} + X_{St} \cdot S_{St}}{S_{Al} + S_{St}} \quad (2.14)$$

Где: X_{Al}, X_{St} – теплофизические свойства материалов алюминиевых повивов и стального сердечника соответственно; S_{Al}, S_{St} – суммарные площади их поперечных сечений.

Сформированная тепловая модель моножильного провода позволяет корректно описать внутреннее распределение температур и снизить вычислительную нагрузку. Однако для комплексного математического описания задачи необходимо задать приемлемые граничные условия на внешней поверхности провода. Поскольку эффективность режимов плавки без отключения нагрузки критически зависит от интенсивности ветрового охлаждения, требуется математическое описание параметров конвективного теплообмена.

2.4. Уточнение условий теплообмена провода с окружающей средой

Для корректного прогнозирования времени плавки гололёда в реальных условиях эксплуатации ЛЭП необходимо учитывать нестационарный характер погодных воздействий. Интенсивность конвективного теплообмена поверхности обледенелого провода с окружающим воздухом нелинейно зависит от скорости бокового ветра и температуры воздуха.

Математическая модель теплового процесса в системе «однородный проводник – ледяной слой – окружающая среда», граничные условия и заданы в виде выражений (2.12), (2.9 -2.10).

Ключевым параметром в граничном условии конвективного теплообмена Ньютона-Рихмана выступает коэффициент теплообмена α . Согласно теории тепломассообмена, для цилиндрических тел, обдуваемых поперечным потоком воздуха, коэффициент конвективного теплообмена α определяется через безразмерный критерий Нуссельта Nu .

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{D} \quad (2.15)$$

В свою очередь, критерий Нуссельта зависит от режима течения воздушного потока и определяется по эмпирическим критериальным уравнениям как функция чисел Рейнольдса Re и Прандтля Pr [51-52]:

$$Nu = 0,245 Re^{0,6} \quad (2.16)$$

Определив число Нуссельта, рассчитывается коэффициент конвективного теплообмена [51-52]:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda} \quad (2.17)$$

Числа Рейнольдса и Прандтля характеризуют гидродинамические и теплофизические свойства набегающего потока и вычисляются по известным зависимостям [51-52]:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\eta} \quad (2.18)$$

$$Pr = \frac{\eta \cdot C}{\lambda} \quad (2.19)$$

Где: ρ - плотность; v - скорость движения воздуха; D - диаметр провода (или ледяной оболочки); η - динамическая вязкость; C - удельная теплоемкость; λ - коэффициент теплопроводности.

На основе приведенных уравнений в вычислительной среде Comsol реализован алгоритм расчета коэффициента конвективного теплообмена α для различных скоростей ветра и толщин гололедной муфты.

На практике сетевые компании ограничены пропускной способностью оборудования питающих подстанций, что исключает возможность неограниченного повышения тока плавки для компенсации интенсивного ветрового охлаждения. В связи с этим возникает объективная потребность в исследовании тепловых процессов при лимитированной мощности источника

тепла. Выявление этих пределов необходимо для того, чтобы диспетчерский персонал мог оценить физическую осуществимость плавки заданным током в текущих погодных условиях и принять обоснованное решение о целесообразности её запуска.

2.5. Математическая модель тепловых процессов в системе «провод – ледяная оболочка» при ограниченной мощности

Внедрение систем плавки гололёда без отключения потребителей в действующих сетях 10 кВ часто сопряжено с жесткими ограничениями по пропускной способности питающих трансформаторов. Ограниченная мощность источника не позволяет генерировать токи, достаточные для быстрого и полного расплавления ледяной муфты. В таких условиях стратегия очистки провода базируется на частичном проплавлении внутренней границы льда с последующим сбросом оболочки под действием силы тяжести и ветровых нагрузок.

Для определения времени разрушения ледяной муфты в режиме ограниченной мощности базовая математическая модель теплообмена остается неизменной. Модификации подвергается исключительно вычислительная процедура (алгоритм расчета): внедряется учет изменения геометрии теплового контакта при образовании водяной прослойки и гравитационном смещении льда.

Геометрическая расчетная модель включает две области: металлическую с усреднёнными параметрами и ледяную оболочку, теплофизические характеристики которой зависят от температуры с учетом фазового перехода. При нагреве током ограниченной величины выделяемое тепло передаётся в оболочку, локально расплавляя лед в зоне контакта с проводом. В результате образования жидкой фазы происходит постепенное смещение ледяной муфты вниз. Полного расплавления не требуется:

проплавление внутренней границы и последующий сброс муфты обеспечиваются сфокусированным тепловым воздействием.

Процесс зависит от состояния муфты. При изморози плотность составляет $0,15 - 0,4 \text{ г/см}^3$ [57, 87], при ледяном дожде — около $0,9 \text{ г/см}^3$ [57, 87], при мокром снеге плотность изменяется в широких пределах.

Образующаяся муфта создаёт статические и динамические нагрузки, увеличивает парусность проводов, что приводит к несимметричному распределению температуры.

Коэффициент теплопроводности для снега и рыхлой крошки удобно задавать по формуле М. Штурма [88] для плотности в диапазоне $0,156 - 0,6 \text{ г/см}^3$ [89-90] при средней температуре -15°C .

$$\lambda = 0,138 - 1,01\rho + 3,233\rho^2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)}, \quad (2.20)$$

где: ρ — плотность снега (льда).

Теплоёмкость пористого льда (слежавшегося снега) практически не зависит от плотности и принимается равной $2100 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$ [89-90]. Для сплошного льда при 0°C плотность составляет $916,2 \text{ кг/м}^3$, при -10°C возрастает до $918,9 \text{ кг/м}^3$ [89-90]. Удельная теплоёмкость льда при 0°C равна $2050 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$, при -10°C снижается до $2000 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$ (у воды $4200 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$). Теплопроводность льда при понижении температуры с 0 до -10°C увеличивается с $2,22$ до $2,3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$ (у воды $0,56 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$).

Процессы теплопередачи описываются дифференциальными уравнениями в частных производных. Из-за угловой несимметрии теплообмена при ветре использование осесимметричной модели приведёт к существенной погрешности.

В численной реализации для каждой подобласти (металл, лед) задаются свои параметры. С учётом наличия нескольких сред уравнение

теплопроводности записывается в общем виде, начальные условия не изменяются:

$$\rho_k C_k \frac{\partial T_k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial y} \right) - \rho_k L \frac{\partial b}{\partial t} + w_k, \quad (2.21)$$

Здесь: k – номер материала (1 – алюминий; 2 – лёд); ρ_k – плотность материала; C_k – удельная теплоёмкость; λ_k – коэффициент теплопроводности; T_k – температура; w_k – удельная мощность тепловыделения; L – удельная теплота плавления льда; b – граница между твердой и жидкой фазами.

Начальные условия: температура системы «провод–оболочка» принимается равной температуре окружающей среды (в большинстве расчётов -5°C).

Теплопередача внутри системы осуществляется теплопроводностью. В программном комплексе Comsol геометрия модели неизменна, но свойства элементов могут изменяться. Граничные условия задаются на внешней поверхности ледяной оболочки.

В качестве граничных условий на боковой поверхности $x, y \in L_{нов}$ задан конвективный теплообмен:

$$\lambda_n \cdot \frac{\partial T_n}{\partial n} = \alpha \cdot (T - T_c). \quad (2.22)$$

В Comsol предусмотрено разделение кольцевой границы на четыре сектора, что позволяет задавать различные значения коэффициента конвективного теплообмена на каждом участке.

Процессы плавления и кристаллизации моделируются заменой движения фронта фазового перехода на приращение теплосодержания в выражении (2.21). Теплота плавления приравнивается к произведению интервала температур фазового перехода на добавочную теплоёмкость.

$$L = C^* \cdot \Delta T. \quad (2.23)$$

Теплота плавления льда составляет 330 кДж/кг . При интервале температур фазового перехода 1°C добавка к теплоёмкости равна $330 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$, что создаёт вычислительные трудности и требует уменьшения шага по времени и расширения интервала перехода для улучшения сходимости.

Сложность задачи заключается в одновременном протекании плавления на верхней поверхности провода и кристаллизации в нижней части. Вода стекает вниз, заполняя поры, и провод перемещается вверх относительно оболочки. Скорость перемещения зависит от мощности нагрева и скорости плавления. Учёт перемещения требует перестроения сетки, что трудно реализуемо и неоправданно из-за сильного разброса физических свойств льда.

Для упрощения модели (2.21) теплота плавления добавляется к удельной теплоёмкости в узком диапазоне температур [85]. При интервале 2°C прибавка составляет $165 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$. Зависимость теплоёмкости от температуры задаётся ступенчатой функцией H , обеспечивающей переход от теплоёмкости льда к значению для воды с учётом теплоты плавления (выражение 2.11). Применение данного математического аппарата позволяет исключить необходимость постановки отдельного граничного условия на фронте плавления b . В результате температурное поле во всей расчетной области определяется путем решения единого уравнения теплопроводности с единственной искомой переменной $T(x, y, t)$.

Для учёта перемещения провода относительно ледяной оболочки в уравнение теплопроводности введена вертикальная составляющая вектора скорости:

$$\rho_{np} C_{np} \frac{\partial T_{np}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\lambda_{np} \frac{\partial T_{np}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(\lambda_{np} \frac{\partial T_{np}}{\partial y} \right) - v \frac{\partial T_{np}}{\partial y} + w. \quad (2.24)$$

При отсутствии в модели прямой связи температуры с движением границы фаз удобно использовать упрощённый алгоритм: скорость движения

провода подбирается так, чтобы она соответствовала скорости фронта плавления. Это имитирует реальное перемещение провода в ледяной оболочке экономичным способом, но вносит погрешность из-за изменения толщины льда над проводом.

В компьютерной модели для учёта плавления в верхней части, стекания воды и образования воздушной прослойки под проводом коэффициенты теплопроводности и плотности льда (воды) изменяются в зависимости от температуры и положения (над или под проводом). Под нижней поверхностью образуется слой воздуха с плотностью $1,29 \text{ кг/м}^3$ и теплопроводностью $0,0258 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Мощность тепловыделения должна выбираться с учётом двух условий: недопустимость перегрева провода на участках, уже освободившихся ото льда, и ограничение пропускной способности питающего трансформатора.

Мощность источников тепловыделения сосредоточена исключительно в проводнике. Теплофизические характеристики материалов расчетной области заданы в виде функций от температуры, что необходимо для корректного учета фазового перехода (таяния) в ледяной оболочке.

При разогреве тонкий слой льда на внутренней границе с проводником начинает плавиться. Образующаяся жидкость стекает в нижнюю часть муфты. Изменение геометрии теплового контакта между проводом и льдом за счет появления прослойки воды снижает интенсивность теплопередачи вниз и ускоряет прогрев верхней части оболочки. Данные нелинейные пространственные эффекты учитываются в вычислительном алгоритме.

Анализ процессов при ограниченной мощности источника показал существенное увеличение времени разрушения ледяной муфты. Ситуация дополнительно осложняется тем, что структура отложений (изморозь, ледяной дождь, мокрый снег) напрямую определяет их плотность и теплопроводность. Для учета этого фактора в математической модели предусмотрена возможность задания различных теплофизических

параметров, соответствующих физическим характеристикам конкретного вида атмосферных осадков.

Таким образом, сформированный математический аппарат позволяет детально анализировать пространственно-временное распределение температур с учетом образования жидкой фазы и стока воды. Однако теоретическое подтверждение эффективности режимов плавки в условиях ограниченной мощности требует проведения серии численных экспериментов и апробирования полученных результатов на основе профилей эксплуатации распределительных сетей.

2.6. Математическое моделирования процесса проплавления ледяной оболочки на проводах при различных видах осадков

Необходимость адаптации расчетного алгоритма к различным физико-механическим свойствам гололедно-изморозевых отложений требует проведения систематических численных экспериментов. Для этого на основе ранее разработанной системы связанных уравнений реализуется серия расчетных сценариев.

Для определения параметров процесса плавки при разных условиях выполнено математическое моделирование теплового процесса в проводнике с различной толщиной ледяной оболочки, при различных скоростях ветра и температурах воздуха.

Тепловые процессы в системе «провод – ледяная оболочка – воздух» для упрощения рассмотрены отдельно, математическая модель, граничные условия и ограничения представлены ранее (выражения 2.17-2.19).

Значения коэффициента конвективного теплообмена рассчитываются в соответствии с возможными геометрическими размерами проводников и ледяной оболочки для разных значений скорости ветра (выражения 2.11-2.15).

Процесс плавления и кристаллизации сопровождается поглощением или выделением теплоты плавления. Это явление учтено с помощью модификации теплоемкости [51, 85]. При расчетах принято, что диапазон температуры, в котором лед переходит в жидкое состояние, равен $0 - 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (выражение 2.7).

Учет физических свойств различных видов осадков логически завершил формирование тепловой части модели. Однако предварительный анализ показал, что применение усредненных аналитических уравнений (через критерии Рейнольдса и Нуссельта) для определения коэффициента теплообмена вносит значительную погрешность при сильном ветре. Для точного вычисления локальных тепловых потоков отдельно с наветренной и подветренной сторон провода необходим переход к связанному термогидродинамическому моделированию воздушной среды.

2.7.1. Математическая модель тепловых процессов в воздушной среде в системе плавки гололёда на проводах линии электропередачи

Использование усредненных эмпирических зависимостей (выражения 2.11–2.15) дает приемлемый результат лишь для симметричных форм. Такой подход не позволяет учесть локальную неравномерность отвода тепла по периметру провода, что вносит существенную погрешность при сложной геометрии ледяной муфты и высоких скоростях ветра. Для определения коэффициента конвективной теплоотдачи необходим переход к сопряженной задаче термогидродинамики, в которой воздух, ледяная оболочка и проводник рассматриваются как единая теплофизическая система.

Термогидродинамические процессы существенно влияют на тепловые потоки. Коэффициент теплообмена изменяется в зависимости от скорости ветра и угловой координаты, что усложняет расчёты. Одновременное

моделирование теплопроводности с фазовым переходом и теплообмена с воздухом требует значительных вычислительных ресурсов.

Для корректного определения конвективного теплообмена требуется детальный анализ аэродинамических процессов обтекания провода. Коэффициент теплообмена существенно зависит от скорости ветра, кинематической вязкости воздуха и угловой координаты на поверхности муфты. При обтекании асимметричного профиля отложений интенсивность конвективного теплообмена распределяется неравномерно и является величиной непостоянной по периметру оболочки, что требует совместного решения тепловой и гидродинамической задач.

Стационарное уравнение теплопроводности для системы «лёд – провод – воздух» записывается в общем виде:

$$-\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_k \cdot \frac{\partial T_k}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_k \cdot \frac{\partial T_k}{\partial y}\right) = w_k - \rho_k \langle C_k \cdot u \cdot \left(\frac{\partial T_k}{\partial x} + \frac{\partial T_k}{\partial y}\right) \rangle, \quad (2.25)$$

с начальными условиями, описанными в выражении (2.5).

Здесь: u - вектор скорости, который задается только для воздушной среды.

Начальные условия: температура системы «провод–оболочка» принимается равной температуре окружающей среды (в расчётах -5°C).

Граничные условия на внешних границах (воздух):

- на левом краю

$$T = 268 \text{ K}; \quad (2.26)$$

- на верхней и нижней границах — теплоизоляция

$$(Q = 0); \quad (2.27)$$

на правой границе — конвективный тепловой поток

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_c). \quad (2.28)$$

Формально при движении воздуха задание теплообмена на выходе из расчетной области не влияет на процессы, протекающие в пределах данной

области. С учетом такого подхода размеры области приняты достаточно большими, чтобы не вносить погрешность в расчеты.

Процессы теплообмена между поверхностью ледяной оболочки и воздухом представляют собой комбинацию процессов теплопроводности и переноса тепла с движущейся воздушной средой.

В построенной модели воздух, лед и провод являются компонентами системы. Теплообмен между ними осуществляется путем сложного взаимодействия движущихся и неподвижных сред. В модели тепловых процессов предусмотрены не все виды переноса тепла. Для полноценного учета всех способов требуется взаимодействие с моделями гидродинамики, что весьма усложняет процедуру расчета. Поэтому в большинстве расчетов используется отдельная модель тепловых процессов, а коэффициент теплообмена вычисляется по результатам решения связанной термогидродинамической задачи. Так как задачей является оценка коэффициента конвективного теплообмена, который может иметь разное значение на участках поверхности ледяной оболочки провода, то при моделировании предусмотрено разделение линии окружности на четыре сектора. Это позволяет на каждом участке определять значения тепловых потоков и на их основе находить коэффициенты теплообмена для последующих расчетов процесса плавки гололеда.

Процессы плавления в данном параграфе не рассматриваются. Мощность тепловыделения в проводнике подобрана исходя из условия нагрева не выше нуля градусов.

Для предварительного расчёта коэффициента конвективного теплообмена используется стандартная процедура через критерии Рейнольдса и Нуссельта (2.18, 2.19).

По приведённым соотношениям рассчитываются значения коэффициента конвективного теплообмена для провода заданного сечения в диапазоне скоростей ветра, что позволяет оценить интенсивность

теплообмена. Моделирование теплового процесса определяет мощность и время, необходимые для плавки гололёда.

Недостаток метода — значения являются усреднёнными по поверхности и содержат погрешность. Для более точного определения коэффициентов необходимо численное моделирование связанной термогидродинамической задачи.

2.7.2. Математическая модель гидродинамических процессов в воздушной среде в системе плавки гололёда на проводах линии электропередачи

Выбор модели гидродинамического процесса зависит от режима движения воздуха, определяемого критерием Рейнольдса. При $Re < 2300$ вдоль поверхности формируется ламинарный пограничный слой. При $Re > 2300$ вблизи стенки также образуется ламинарный слой, но за его пределами развивается турбулентный. Критическому числу Re соответствует критическая скорость потока для характерного размера d .

$$v_{kr} = 2300 \cdot \eta / d . \quad (2.29)$$

Здесь: v_{kr} - критическая скорость воздушного потока; 2300 - критическое число Рейнольдса; η - кинематическая вязкость среды; d - внешний диаметр провода с учётом толщины ледяной оболочки.

Для инженерных расчётов практически достаточно знать осреднённые характеристики движения. Применяется подход с уравнениями переноса турбулентных величин и моделированием тройных корреляций. В работе используется $k - \varepsilon$ модель турбулентности — двухпараметрическая модель [51-53]. Для упрощения приняты допущения о постоянстве температуры и плотности воздуха, что вносит незначительную погрешность в рамках данной задачи.

С учетом сказанного задача гидродинамики формулируется в следующем виде:

– уравнение неразрывности:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (2.30)$$

здесь: $\mathbf{v}$ - вектор скорости; ∇ - оператор Набла.

– уравнение Навье – Стокса:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \cdot \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \cdot \nabla p \cdot \eta \cdot \nabla^2 \cdot \mathbf{v}, \quad (2.31)$$

здесь: p - гидродинамическое давление; ρ - плотность воздушной среды; ∇^2 - оператор Лапласа, описывает силы внутреннего вязкого трения воздуха, которые тормозят поток при обтекании провода.

Система уравнений (2.30)–(2.31) не имеет аналитического решения и требует применения численного метода с обоснованными допущениями.

Среди моделей турбулентности используется $k - \varepsilon$ модель, включающая два уравнения: для кинетической энергии турбулентности k и её вязкости ε . Модель описывает генерацию, перенос и рассеивание турбулентных вихрей с введением турбулентной вязкости μ_t , определяемой в ходе решения. Дифференциальные уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \text{div}(\rho \cdot \mathbf{v} \cdot k) = \\ = \text{div} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad}(k) \right) + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb} \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \text{div}(\rho \cdot \mathbf{v} \cdot \varepsilon) = \text{div} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad}(\varepsilon) \right) + \\ + \frac{\varepsilon}{k} \cdot (C_{\varepsilon 1} \cdot P_k - C_{\varepsilon 2} \cdot \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} \cdot P_{\varepsilon b}) \end{aligned} \quad (2.33)$$

где k – кинетическая энергия турбулентности с размерностью $[m^2 / c^2]$; ε – вязкость энергии турбулентности (m^2 / c^3); p - давление (Па); P_k –

мощность потерь на генерацию турбулентности; P_{kb} и $P_{\varepsilon b}$ – слагаемые, учитывающие эффекты гравитации. В случае несжимаемой жидкости генерация энергии турбулентности определяется следующим образом:

$$P_k = \mu_t \cdot \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \cdot \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (2.34)$$

С помощью решения системы уравнений (2.33) и (2.34) рассчитывается распределение величин k и ε на расчетной области, на основании которых затем определяется значение турбулентной вязкости для каждого конечного элемента по формуле:

$$\eta_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (2.35)$$

Уравнения (2.32) и (2.33) включают в свой состав ряд эмпирических констант [91]:

$$C_\mu = 0.09; \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44; \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92; \quad \sigma_k = 1.0; \quad \sigma_\varepsilon = 1.3.$$

Значения констант получаются калибровкой модели по натурным экспериментам. $k - \varepsilon$ модель откалибрована для развитых турбулентных потоков и точна вдали от стенок, но у твёрдых поверхностей возникают проблемы.

В задаче массовые силы не учитываются из-за малой плотности газа ($1,3 \text{ кг/м}^3$).

Уравнения (2.28)–(2.29) справедливы вдали от стенок. Вблизи поверхности турбулентные флуктуации затухают, поэтому используются пристенные функции, формирующие логарифмический профиль скорости. Принимается, что турбулентная энергия полностью рассеивается. Пристенные функции позволяют корректно задать граничные условия для k и ε вблизи твёрдой поверхности.

$$n \cdot \mathbf{v} = 0. \quad (2.36)$$

Для имитации открытого воздушного пространства на верхней и нижней границах расчетной области задаются условия симметрии (условия

свободного проскальзывания потока). В отличие от логарифмических функций стенки, данный математический аппарат исключает учет трения воздуха на границах домена, что позволяет избежать искусственного эффекта течения в трубе. В набор функций входит также выражение вида (2.32). Учитывая, что размеры области довольно велики, и расстояние от провода до верхней и нижней границ принято равным 0,3 м, влияние стенок на характер движения воздуха возле провода будет минимальным.

На левом краю оболочки задается начальное значение скорости:

$$\mathbf{v} = -\mathbf{v}_0 \cdot n. \quad (2.37)$$

На правом краю оболочки в расчетной области задается давление:

$$p = p_0. \quad (2.38)$$

Кроме рассмотренных внешних границ области имеются внутренние границы между воздушной средой и отдельными линиями поверхности ледяной оболочки. Математическая формулировка условий на границе имеет вид:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0; \quad k = (3I_T^2 / 2)(\mathbf{v}_0 \cdot \mathbf{v}_0); \quad \varepsilon = C_\mu^{0.75} k^{1.5} / \left((3I_T^2 / 2)(\mathbf{v}_0 \cdot \mathbf{v}_0) \right)^{1.5} / L_T. \quad (2.39)$$

Здесь: L_T - масштаб длины зоны турбулентности; I_T - интенсивность турбулентности.

Интенсивность турбулентности по умолчанию принята равной 0,01, а масштаб длины турбулентности 0,05. Эти значения весьма малы, что объясняется низким возмущением от провода, помещенного в движущийся воздушный поток.

Приведенные дифференциальные уравнения для среды и граничных условий описывают математическую модель турбулентного движения потока, заложенную в программном пакете Comsol, который использован для проведения дальнейших расчетов.

Предложенный математический аппарат связывает гидродинамическую и тепловую задачи, что позволяет передавать

рассчитанные коэффициенты конвективного теплообмена по периметру оболочки в качестве граничных условий в тепловую модель. Вместе с тем, по мере проплавления значительная часть провода оголяется, и условия теплоотвода кардинально меняются. Чтобы исключить риск термического повреждения и потери механической прочности провода после сброса льда, необходимо смоделировать процесс нагрева уже голого проводника в режиме продолжающегося протекания тока плавки.

2.8. Математическая модель теплового состояния провода после сброса ледяной оболочки в режиме протекания тока плавки

Специфика процесса плавки гололеда на протяженных участках ЛЭП заключается в неравномерности очистки проводов. На практике ледяная муфта разрушается и осыпается каскадами, в результате чего отдельные пролеты могут полностью освободиться ото льда, тогда как на смежных участках процесс плавки еще продолжается.

На очищенных участках протекание высоких токов плавки приводит к интенсивному нагреву голого проводника. Ввиду резкого снижения теплоемкости системы (из-за отсутствия льда) возникает опасность превышения предельно допустимой температуры провода. Это приводит к температурному удлинению жил, недопустимому увеличению стрелы провеса и ускоренному окислению поверхностных слоев металла.

Проблема плавки гололёда заключается в том, что скорость нарастания и таяния льда зависит от погодных условий и плотности осадков. Ледяная муфта формируется быстро (до 2 часов). Для эффективной плавки необходима оперативная информация о толщине льда и предварительный расчёт токовой нагрузки в зависимости от погоды. Математическое моделирование позволяет определить время и энергетически выгодный режим плавки, снижая негативные последствия для электроснабжения.

Для определения допустимого времени нахождения очистки провода от ледяных отложений под воздействием тока плавки необходимо описание нестационарных тепловых процессов в системе «однородный проводник – окружающая среда». Математическая модель системы представлена следующим выражением, начальные и граничные условия с конвективным теплообменом остаются неизменны (2.9 – 2.10).

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q(x, y). \quad (2.40)$$

Здесь: ρ – плотность материала; C_p – удельная теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; T – температура.

Из расчетной области исключается ледяная оболочка, а система сводится к однородному цилиндрическому проводнику.

Сформированная математическая модель позволяет рассчитать критическое время нахождения голого провода при токе плавки, минимизируя риски аварийных ситуаций.

2.9. Математическая модель процесса подогрева проводов для предупреждения образования гололёда на воздушных ЛЭП

Разработанный математический аппарат может быть применен не только для моделирования процессов очистки проводов от уже образовавшихся отложений, но и для расчета режимов защиты ЛЭП. Режим профилактического подогрева подразумевает пропускание по проводам рабочего или искусственно увеличенного тока, тепловыделение от которого достаточно для предотвращения кристаллизации переохлажденной влаги на поверхности.

В отличие от задачи плавки, математическая модель режима профилактики сводится к поиску стационарного теплового баланса, при

котором температура поверхности голого провода поддерживается строго выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ при заданных неблагоприятных метеоусловиях.

Математическая модель системы «однородный проводник – окружающая среда» приведены в выражении (2.36), начальные и граничные условия с конвективным теплообменом представлены в выражениях (2.5-2.6).

Искомым параметром расчета является минимально необходимый ток профилактического подогрева, обеспечивающий поддержание температуры поверхности проводника выше нулевой температуры при различных ветровых нагрузках и температурах воздуха, что физически исключает кристаллизацию осадков и образование гололеда.

2.10. Математическая модель электрического режима участка сети при плавке гололёда

Решение тепловых задач позволяет определить требуемую мощность тепловыделения и величину расчетного тока плавки. Для обеспечения данного тока без отключения нагрузки необходимо математическое описание параметров электрического режима контура плавки 10 кВ при наложении дополнительных реактивных токов.

Для реализации системы плавки гололёда без отключения потребителей необходимо не только рассчитать требуемые тепловые режимы, но и обеспечить стабильные параметры электрического режима. Электрические процессы в системе «трансформатор – линия электропередачи – нагрузочный реактор – конденсаторные батареи» описываются системой уравнений, базирующейся на законах Кирхгофа и теории цепей переменного тока [86].

В общем случае реальная распределительная сеть 10 кВ представляет собой магистраль с множеством ответвлений. В соответствии с первым и

вторым законами Кирхгофа, распределение узловых напряжений $\underline{U}_i$ и токовых нагрузок для i -го узла цепи описывается в комплексной форме [92]:

$$\underline{I}_{Л,i} = \underline{I}_{Л,i+1} + \underline{I}_{Н,i}; \quad (2.41)$$

$$\underline{U}_i = \underline{U}_{i-1} - \underline{I}_{Л,i} \underline{Z}_{Л,i}, \quad (2.42)$$

Здесь: $\underline{I}_{Л,i}$ - ток i -го участка линии; $\underline{I}_{Н,i}$ - ток i -го электроприемника (зависящий от импеданса нагрузки узла); $\underline{U}_i$ - напряжение в i -м узле; $\underline{Z}_{Л,i}$ - комплексное сопротивление i -го участка магистрали.

Для проведения аналитического расчета и визуализации процессов разработана эквивалентная схема замещения электротехнического комплекса системы плавки гололеда (рисунок 2.1).

Питающий центр моделируется источником напряжения U_1 и эквивалентным индуктивным сопротивлением энергосистемы $X_{ЭС}$. В начале магистрали (Узел 2) подключена ветвь поперечной емкостной компенсации, представленная параметрами $X_{С1}$ и R_1 , по которой протекает ток I_2 . Воздушная линия электропередачи совместно с установкой продольной компенсации описывается последовательно соединенными индуктивностью провода $X_{Л}$, его активным сопротивлением $R_{Л}$ и емкостным сопротивлением конденсаторной батареи $X_{С2}$. По данному участку протекает суммарный ток плавки I_3 . В конце магистрали (Узел 3) параллельно ветви комплексной нагрузки потребителя (параметры $X_{Н}$, $R_{Н}$, ток I_5) подключен токоограничивающий реактор (параметры $X_{Р}$, $R_{Р}$, ток I_4), обеспечивающий генерацию необходимого добавочного индуктивного тока.

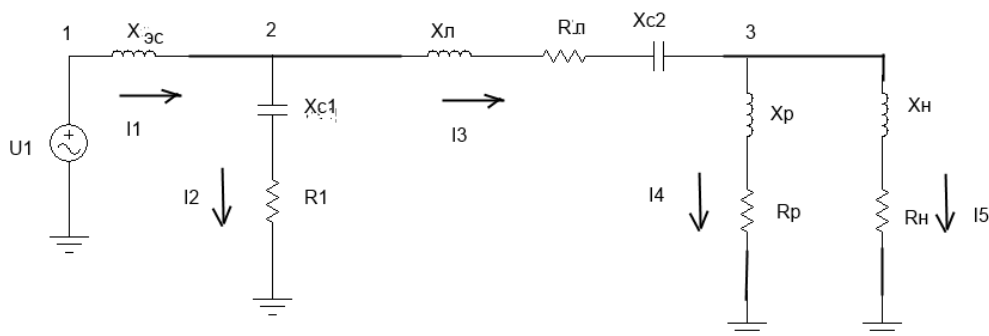


Рисунок 2.1. Эквивалентная схема замещения электротехнического комплекса системы плавки гололеда.

Разработанная математическая модель предназначена для расчета распределения токов и узловых напряжений в режиме плавки, определения номиналов компенсирующих устройств и индуктивной нагрузки, а также для аналитического описания условий возникновения последовательного резонанса напряжений.

Для анализа электрических процессов формируется эквивалентная схема замещения участка распределительной сети, включающая следующие сосредоточенные элементы: источник питания с заданным номинальным напряжением и эквивалентным сопротивлением системы (для учета падения напряжения на шинах центра питания); линию электропередачи, представленную сосредоточенными параметрами (эквивалентным активным R_L и индуктивным X_L сопротивлениями); нагрузку потребителей $Z_{нагр}$, имеющую активно-индуктивный характер и описываемую комплексным сопротивлением (импедансом); токоограничивающий (нагрузочный) реактор с индуктивностью L_p ; установку поперечной компенсации (конденсаторную батарею) на шинах подстанции для компенсации реактивной мощности C_1 ; установку продольной компенсации C_2 , включенную последовательно в линию для компенсации индуктивного падения напряжения.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа, для эквивалентной последовательной цепи переменного тока полное комплексное сопротивление контура плавки определяется выражением [92]:

$$\dot{Z} = R + j(X_L - X_C), \quad (2.43)$$

где: R - эквивалентное активное сопротивление контура (с учётом сопротивления проводов ЛЭП и активных потерь в реакторе), Ом;
 $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_p + X_0 \cdot l$ - суммарное индуктивное сопротивление линии и реактора, Ом; $X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_2}$ - ёмкостное сопротивление установки продольной компенсации, Ом; f - промышленная частота сети; X_0 - погонное индуктивное сопротивление провода, Ом/км; l - длина участка плавки, км.

Ток в линии определяется по закону Ома [92]:

$$I = \frac{U}{Z}. \quad (2.44)$$

Действующее значение тока в линии вычисляется:

$$I = \frac{U_{nom}}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad (2.45)$$

Продольная составляющая падения напряжения в линии (без учета поперечной составляющей ввиду ее малости для распределительных сетей) рассчитывается как [93]:

$$\Delta U_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{нл}} (R_{\text{л}} \cos \varphi + X_{\text{л}} \sin \varphi), \quad (2.46)$$

где: $\cos \varphi$ - коэффициент мощности эквивалентной нагрузки; $X_{\text{л}}$ - результирующее реактивное сопротивление контура.

Фактическое напряжение на зажимах потребителя в конце линии составит:

$$U_{\text{кон}} = U_{\text{ном}} - \Delta U. \quad (2.47)$$

Для компенсации значительного падения напряжения, вызванного протеканием высоких токов плавки через индуктивное сопротивление реактора, система предусматривает настройку контура в режим, близкий к

последовательному резонансу напряжений. Условие резонанса достигается при достижении соотношения:

$$X_L = X_C \quad (2.44)$$

При выполнении этого условия ток в линии достигает максимального значения, так как сумма реактивных сопротивлений с учетом знаков равна нулю. Падение напряжения на индуктивности и емкости по отдельности становятся больше, но их суммарное значение из-за противоположных знаков минимально. В реальных цепях активная составляющая сопротивлений остается конечной величиной и значения резонансного тока и напряжения также являются конечными величинами.

Ёмкость конденсаторной батареи, необходимая для достижения резонанса [93]:

$$C_{рез} = \frac{1}{(2\pi f)^2 L}, \quad (2.45)$$

где: L - эквивалентная индуктивность контура.

Для обеспечения требуемого тока плавки целесообразно применение продольной компенсации, переводящей линию в околорезонансный режим. Однако для решения данной практической задачи необходимо учитывать условия, максимально приближенные к реальным, и возникающие аппаратные ограничения. В частности, взаимная компенсация реактивных сопротивлений ведет к резкому росту тока в цепи, что требует обязательного контроля допустимой токовой нагрузки на силовой трансформатор питающей подстанции. Кроме того, согласно теории электрических цепей, в таком режиме существует высокий риск возникновения локальных перенапряжений, их учет критически важен при дальнейшем выборе аппаратного исполнения конденсаторных установок.

Мощность тепловыделения P , определяющая интенсивность нагрева провода, рассчитывается на основе закона Джоуля-Ленца:

$$P = I^2 R, \quad (2.46)$$

где: R - активное сопротивление проводов линии.

Данное уравнение является связующим звеном между электрической моделью сети и тепловой моделью системы «провод – ледяная оболочка», описанной в параграфах 2.2–2.9.

Учет всех возникающих ограничений и взаимовлияний в многоузловой сети затруднен. Поэтому процедура расчета параметров электрооборудования реализуется с применением моделирования в программной среде Multisim. Данный подход позволяет воспроизвести реальную топологию сети и проконтролировать как токи в ветвях, так и узловые перенапряжения. Учет данных ограничений важен при дальнейшем выборе аппаратного исполнения силового оборудования.

Таким образом, разработанная математическая модель электрического режима участка сети выполняет важнейшую связующую роль между физикой теплового разрушения гололёда и параметрами электрической сети. Главная цель разработки данной модели — создание практического инструментария для обоснования параметров силового оборудования (токоограничивающих реакторов и установок продольной и поперечной компенсации). Модель позволяет математически доказать возможность протекания токов плавки требуемой величины при одновременном сохранении нормативных уровней напряжения у потребителей, что является основой разрабатываемого комплекса.

2.11. Обоснование математических моделей тепловых и электрических процессов при плавке гололеда

Базовые математические уравнения теплового баланса, описывающие процесс проплавления ледяной оболочки, опираются на фундаментальные законы теории теплообмена и теплопередачи, изложенные в классических трудах М.А. Михеева, И.М. Михеевой [51] и С.С. Кутателадзе [52].

Энергетический баланс системы строится на строгом равенстве подводимого джоулева тепла и суммы теплотрат на нагрев провода, фазовый переход льда (плавление), а также конвективные потери в окружающую среду. Этот принцип структурно согласуется с методическими указаниями В.В. Бургсдорфа [54] и трудами Р.М. Рудаковой [55].

Для описания процесса теплопередачи в современных исследованиях применяются различные аналитические подходы. В частности, в математической модели К.С. Егорова и С.И. Каськова [94] расчет строится на основе балансового соотношения энергии. Однако существенным отличием разработанной в диссертации математической модели является отказ от ряда традиционных упрощающих допущений. Если в аналитической модели К.С. Егорова и С.И. Каськова [94] для упрощения решения вводится допущение о стационарности процесса, а теплота, расходуемая на нагрев ледяной муфты в проплавленной канавке, математически не учитывается, то в представленном исследовании введена система дифференциальных уравнений, учитывающая нестационарность фазового перехода. Более того, аэродинамика обтекания провода ветром рассчитывается не через усредненные эмпирические критерии, а с применением $k - \varepsilon$ модели турбулентности, основы которой описаны И.А. Беловым и С.А. Исаевым [53]. Также математически описано динамическое изменение геометрии расчетной области при гравитационном смещении провода внутри муфты, что позволяет перейти от приближенных аналитических расчетов к высокоточному сопряженному компьютерному моделированию.

В части описания электрических режимов примененный математический аппарат для расчета эквивалентных сопротивлений ветвей и падений напряжения в комплексной форме, концептуально коррелирует с математическими постановками, применяемыми для расчетов систем предупредительного подогрева проводов (И.И. Бандурин, И.Н. Козырев, В.М. Коробов, С.В. Тращенко, А.Ю. Хаймин [95]) и систем плавки реактивными токами (А.Г. Лютов, В.В. Карташов, Г.Э. Рахматуллина [23-25]).

При этом существует принципиальная разница в формулировании граничных условий и целевых функций. Математическая модель И.И. Бандурина и др. [95] сводится к задаче нелинейного программирования для режима профилактического подогрева и математически ограничена диапазоном токов из-за жесткого лимита по падению напряжения в линии. Модель А.Г. Лютова и др. [23-25], в свою очередь, базируется на уравнениях обобщенного колебательного контура для изолированного участка линии, где не учитывается влияние стабилизирующих устройств на смежные узлы сети.

В отличие от указанных подходов, предложенная в диссертации математическая постановка дополнена сложной системой уравнений-ограничений для всей многоузловой распределительной сети. Произведен ввод математических условий возникновения последовательного резонанса напряжений, при которых функция тока плавки максимизируется (для расплавления уже образовавшейся муфты), а функция потери напряжения у конечных потребителей строго удерживается в нормативных пределах за счет расчета требуемых емкостей продольно-поперечной компенсации.

2.12. Выводы по главе 2

- Разработан комплекс математических моделей, образующий теоретическую основу для исследования процесса плавки гололёда, в которые вошли:
 - совокупность взаимосвязанных моделей нестационарного теплообмена для системы «провод – ледяная оболочка – окружающая среда», учитывающая фазовые переходы «лёд–вода»;
 - уравнения теплового баланса, связывающие параметры нагрева с геометрией провода, теплофизическими свойствами льда и климатическими факторами (температурой окружающей среды, скоростью бокового ветра);

- сопряженная термогидродинамическая модель для определения уточнённых коэффициентов конвективного теплообмена между обледеневшим проводом и воздушным потоком;

- математическое описание электрического режима участка сети, которое выполняет связующую роль между требуемым током плавки (определяемым по тепловой модели) и параметрами распределительной сети;

- теоретически обоснованы условия работы линии в околорезонансном режиме для сохранения нормативного напряжения у потребителей, что служит базой для последующего определения параметров компенсирующих устройств методами имитационного моделирования.

- Разработанные модели представлены в виде систем дифференциальных уравнений в частных производных с заданными граничными условиями, пригодны для реализации в программных средах (COMSOL Multiphysics, Multisim), что обеспечивает переход от теоретического описания к проведению комплексного компьютерного моделирования.

3. МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПЛАВКЕ ГОЛОЛЁДА НА ВОЗДУШНОЙ ЛЭП

В данной главе осуществляется реализация математических моделей, разработанных во второй главе, в виде численных расчетов в программной среде COMSOL Multiphysics. Целью моделирования является определение уточненных коэффициентов конвективного теплообмена на границах ледяной оболочки, временного распределения температур в системе «провод – ледяная оболочка – воздушный поток», расчет необходимых значений токов плавки, а также определение времени полного расплавления ледяной муфты при различных погодно-климатических условиях.

3.1. Моделирование электромагнитных процессов в системе «фазный провод – ледяная оболочка – окружающая среда»

Для определения точных параметров источников тепла, необходимых для последующего расчета температурных полей, выполняется численное моделирование электромагнитных процессов в фазном проводе (рис.3.1). В качестве объекта исследования выбран сталеалюминиевый провод марки АС-50/8 [96], широко применяемый в распределительных сетях 10 кВ. Паспортные геометрические и электрические характеристики провода представлены в таблице 3.1.

Несмотря на директиву ПАО «Россети» о применении исключительно проводов СИП-3 при новом строительстве и реконструкции ВЛ 6–20 кВ, доля неизолированных сталеалюминиевых проводов (АС) в действующем фонде распределительных сетей РФ остается доминирующей. По оценкам экспертов, доля неизолированных проводов в существующем фонде распределительных сетей 10 кВ превышает 70–80 % от их общей

протяженности и тотальная реновация сотен тысяч километров ВЛ 10 кВ требует десятилетий, что делает рассмотрение проводов марки АС при разработке систем плавки актуальной [97].

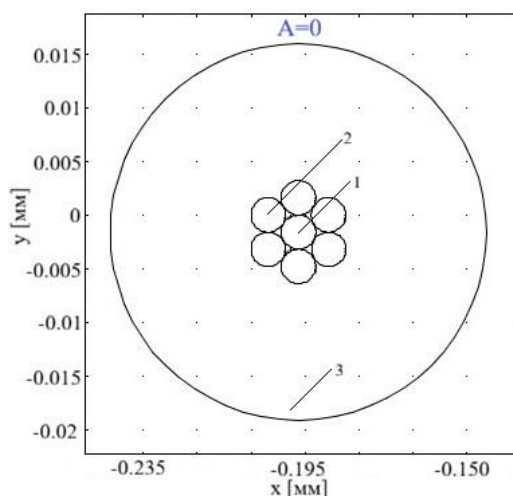


Рисунок 3.1. Геометрическая модель сталеалюминиевого провода АС-50/8.

1 – алюминиевая проволока; 2 – стальная проволока; 3 – воздушная среда.

Таблица 3.1

Параметры сталеалюминевых проводов

$S, \text{мм}^2$	$d, \text{мм}$	$d_1, \text{мм}$	$d_2, \text{мм}$	$R_0, \text{Ом/км}$	$X_0, \text{Ом/км}$
50/8	9,6	3,2	3,2	0,602	0,382

В таблице принято: S – поперечное сечение проводника; d – наружный диаметр проводника; d_1 – диаметр одной жилы стального сердечника проводника; d_2 – диаметр одной жилы алюминиевых повивов проводника, R_0 – активное сопротивление проводника, X_0 – индуктивное сопротивление проводника, взятые из справочных материалов.

Для оценки теплового состояния провода рассматриваются два базовых режима: протекание длительно-допустимого тока и режим плавки гололеда. Учитывая интенсивный теплоотвод при гололедообразовании (низкая температура воздуха, высокая скорость ветра), для достижения температуры плавления льда требуется существенное увеличение тепловыделения. В расчетах принята кратность тока плавки, равная 2 по отношению к длительно-допустимому значению. В работе не рассматривалась процедура определения более рационального значения тока при плавке. Вариантов

может быть много с учетом возможностей проводов и силовых трансформаторов на ГПП. Исходные параметры токовых нагрузок для исследуемых режимов систематизированы в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Длительно-допустимые и расчетные токи для проводов ЛЭП

$S, \text{мм}^2$	$I_{\text{до}}, \text{А}$	$I_p, \text{А}$
50/8	210	420

Оценка суммарной погонной мощности тепловыделения на основе справочного сопротивления рассчитывается по закону Джоуля-Ленца:

$$P = \frac{(I^2 \cdot R_0)}{1000} \quad (3.1)$$

Суммарные потери мощности для рассматриваемых режимов занесены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3

Мощность тепловыделения на 1 метр длины провода

I, А	210	420
P, Вт/м	26,54	106,19

Для реализации тепловой модели в COMSOL Multiphysics расчета суммарных погонных потерь недостаточно. Требуется задание объемной мощности тепловыделения непосредственно в расчетных подобластях стального сердечника и повивов алюминиевых жил с учетом неравномерности распределения плотности тока.

Для получения этих расчетных величин в среде COMSOL Multiphysics реализована модель электромагнитных процессов. Двумерная геометрическая модель точно повторяет сечение провода АС-50/8 (1 стальная и 6 алюминиевых проволок). В качестве источников заданы токовые нагрузки (210 А и 420 А) и магнитная проницаемость материалов (для стали в виде кривой намагничивания). По результатам решения уравнений электромагнитного поля определены точные значения объемного тепловыделения в каждой жиле (Таблица 3.4).

Объемная мощность для стальных и алюминиевых жил рассчитывается как отношение тепловых потерь в жиле к её объему на длине 1 метр:

$$V = \pi \cdot R^2 \cdot h; \quad (3.2)$$

$$Q = \frac{P}{V}. \quad (3.3)$$

Таблица 3.4

Расчетные данные параметров провода

Режим плавки	ΔP_{Al}^1 , Вт / м	ΔP_{Fe}^1 , Вт / м	V , м ³	Q_{Al} , Вт / м ³	Q_{Fe} , Вт / м ³	N_{Al} , шт	N_{Fe} , шт	$\Delta P_{сум}$, Вт / м	δ , %
$I = I_{\partial\partial}$	4,18	0,96	0,00000804	519901	119403	6	1	26,05	1,85
$I = 2I_{\partial\partial}$	16,78	4,06	0,00000804	2087065	504975	6	1	104,82	1,29

В таблице обозначено: S – поперечное сечение проводника, ΔP_{Al}^1 – потери мощность в одной алюминиевой жиле; ΔP_{Fe}^1 – потери мощность в одной стальной жиле, $\Delta P_{сум}$ – суммарная мощность тепловыделения многожильного провода; V – объем одной стальной/алюминиевой жилы, N_{Al} – количество алюминиевых жил в проводнике, N_{Fe} – количество стальных жил в проводнике; δ – относительная погрешность мощностей при моделировании режимов плавки относительно расчетных.

Сравнение суммарной погонной мощности, полученной в результате численного моделирования (26,05 Вт/м и 104,82 Вт/м), с результатами аналитического расчета по формуле (3.1) показывает расхождение не более 1,9%. Возникающая незначительная погрешность носит систематический характер и обусловлена идеализацией геометрии провода в двухмерной постановке (отсутствие учета скрутки многопроволочной конструкции).

Близкие значения результатов аналитического и численного расчетов объясняются малой величиной диаметров проводящих жил, малым числом слоев, что исключает затухание плотности тока и обеспечивает близкие значения плотности тока и мощности тепловыделения в алюминиевых и стальных жилах в отдельности. Полученные значения объемного

тепловыделения (Таблица 3.4) являются корректными исходными данными для перехода к моделированию нестационарных тепловых процессов в системе «провод – ледяная оболочка» и оценке времени достижения температуры плавления льда.

3.2. Моделирование тепловых процессов в системе «провод ледяная оболочка»

Для исследования динамики плавления разработана компьютерная модель в программной среде COMSOL Multiphysics. Целью моделирования является определение временного распределения температур в проводе и ледяной муфте, а также оценка времени достижения температуры плавления на границе раздела сред при различных погодно-климатических условиях.

Алгоритм расчёта включает: подготовку исходных данных; построение геометрической модели; задание теплофизических параметров подобластей и граничных условий; численное решение; обработку результатов. В расчётах рассмотрен сталеалюминиевый провод АС-50/8 [96].

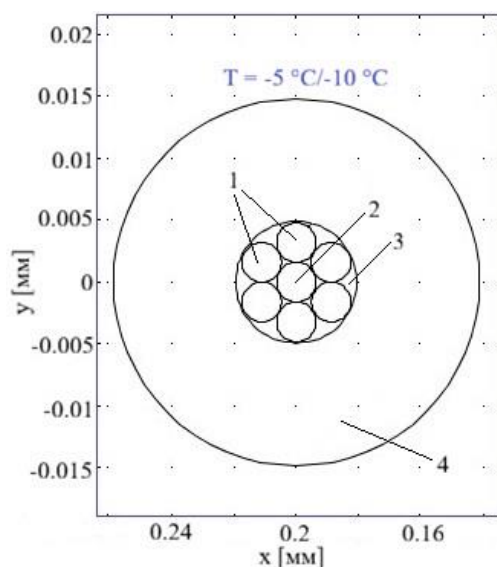


Рисунок 3.2. Геометрическая модель сталеалюминиевого провода АС-50/8.

Тепловая задача. 1 – алюминиевые проволоки; 2 – стальная проволока;
3 – воздушный зазор; 4 – ледяная оболочка.

Геометрическая модель создана с учётом реальной топологии сечения (алюминиевые проволоки, стальной сердечник, воздушные зазоры) и слоя ледяной оболочки толщиной 20 мм.

Усредненные теплофизические свойства материалов представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5

Физические свойства материалов провода.

	$\lambda, Вт / (м \cdot К)$	$c, Дж / (кг \cdot К)$	$\gamma, кг / м^3$
алюминий	200	880	2700
сталь	40	500	7900
воздух	0,05	1000	1,225

Свойства воды в области температур плавления-кристаллизации сильно изменяются и для их описания используются комбинации линейных и ступенчатых функций:

$$\lambda_{лед} = 2,24 - 1,68 \cdot H(T - 273,1) Вт / (м \cdot К); \quad (3.4)$$

$$\rho_{лед} = 917 + 83 \cdot H(T - 273) кг / м^3; \quad (3.5)$$

$$C_{p,лед} = 2120 - 165000 \cdot H(T - 273,1) Дж / (кг \cdot К). \quad (3.6)$$

В качестве источников тепла в расчетных областях жил задана объемная мощность тепловыделения, значения которых определены по результатам электромагнитного моделирования (Таблица 3.4) для длительно-допустимого и удвоенного токов плавки. В алюминиевых жилах расчетное значение равно $Q = 519901 Вт / м^3$, в стальном сердечнике $Q = 119403 Вт / м^3$.

Для корректного задания граничных условий на поверхности раздела «лед – воздух» рассчитаны по выражениям (2.17) значения коэффициента конвективного теплообмена для каждого значения скорости ветра. Расчетные данные подтверждают нелинейный характер роста интенсивности охлаждения при увеличении внешнего диаметра обледенелого провода. Графические зависимости для провода АС-50/8 представлены на рисунке 3.3.

Для режима при нулевой скорости коэффициент теплообмена принят постоянным и равным $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, который принят одинаковым по всей поверхности провода.

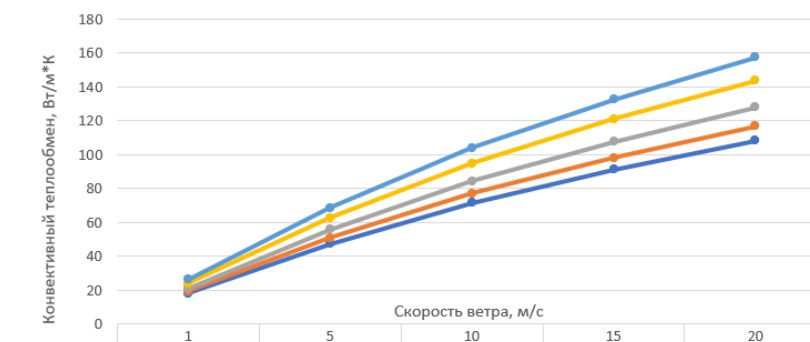


Рисунок 3.3. Зависимости коэффициентов конвективного теплообмена для проводника с различной толщиной ледяной оболочки

— d=20 мм; — d=15 мм; — d=10 мм; — d=5 мм; — d=2 мм.

При наличии ветра коэффициент теплообмена определяется скоростью воздушного потока: для скоростей от 2 до 20 м/с его значения составляют от 18 до 158 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и изменяется в зависимости от наличия и толщины ледяной оболочки, диаметра провода.

Результаты расчёта температурных полей в нестационарной постановке для провода АС-50/8 представлены на рисунке 3.4 (распределение температуры) и рисунке 3.5 (временные диаграммы для контрольных точек).

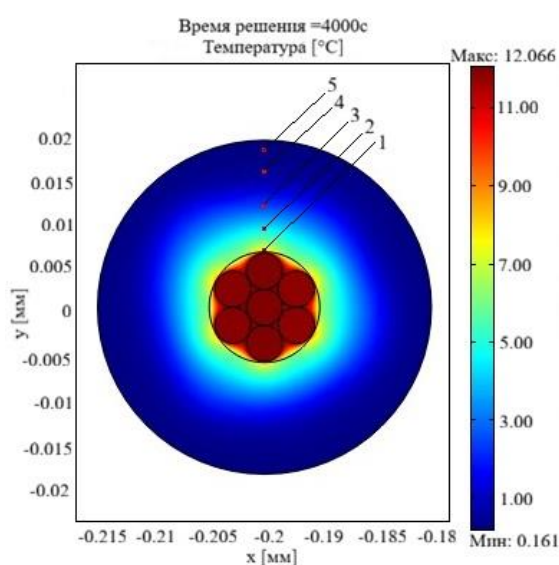


Рисунок 3.4. Распределение температуры в проводе АС-50/8 с толщиной ледяной оболочки 20 мм в момент времени $t=4000\text{с}$, нулевой скорости ветра, температура воздуха -5°С , мощностью $26,45 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

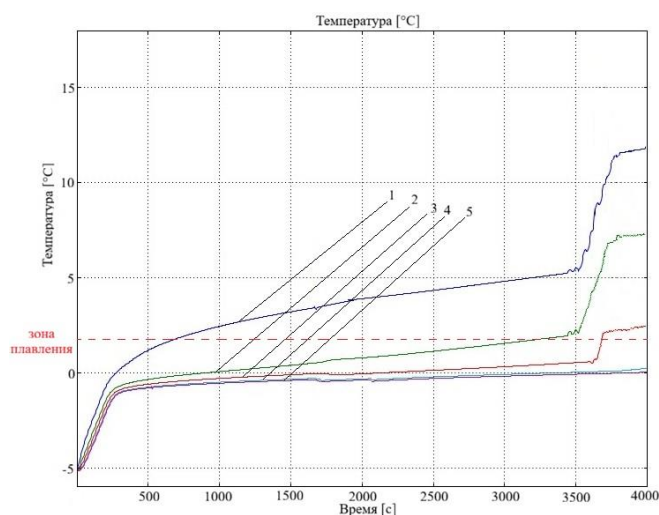


Рисунок 3.5. Диаграммы температуры в проводе и ледяной оболочке от времени в точках: 1 - поверхность провода; 2 - на расстоянии 5 мм от поверхности провода; 3 - на расстоянии 10 мм от поверхности провода; 4 - на расстоянии 16 мм от поверхности провода; 5 - на расстоянии 18 мм от поверхности провода.

На рисунке 3.4 показано распределение температуры в проводе АС-50/8 с ледяной оболочкой толщиной 20 мм в момент времени 4000 с. Температура в проводе достигает 12,1 °C (красная зона). На границе раздела «провод – лёд» температура составляет 7–9 °C. На расстоянии 5 мм от поверхности провода температура снижается до 6–7 °C, на 10 мм – до 4–5 °C, на 16 мм – до 2–3 °C, на 18 мм – до 1,5 °C. На внешней поверхности оболочки (19–20 мм) температура составляет 0,16 °C. Таким образом, вся ледяная оболочка прогрета выше 0 °C, что свидетельствует о её плавлении.

На рисунке 3.5 представлены временные диаграммы температуры в пяти контрольных точках: точка 1 (граница провода и оболочки) достигает 0 °C на 250-й секунде; точка 2 (5 мм от провода) – на 1000-й секунде; точка 3 (10 мм от провода) – на 2250-й секунде; точки 4 и 5 (16 и 18 мм от провода) достигают 0 °C на 3500-й секунде.

В интервале времени от 3500 до 3750 с наблюдается резкий рост температуры в точках, вблизи провода. В точке 1 температура возрастает с 5 до 12 °C, в точке 2 – с 2 до 7 °C. В точке 3 за 100 с (с 3600 по 3700 с) температура поднимается с 0,5 до 2 °C, затем плавно растёт до 2,5 °C к концу расчёта. В точках 4 и 5 температура к концу расчёта достигает 0,1–0,3 °C, возрастая незначительно и плавно.

Такой характер кривых объясняется последовательным распространением тепла от провода к внешним слоям оболочки. Резкое ускорение нагрева в интервале 3500 – 3750 с связано с тем, что к этому моменту вся оболочка прогрета до 0 °С и начинается активное плавление.

Положительный тепловой баланс обеспечивает прогрев оболочки выше 0 °С и создаёт условия для её полного расплавления.

Оценка возможности полного расплавления ледяной оболочки выполнена с использованием стационарной постановки тепловой задачи. Фазовый переход и зависимость теплоёмкости от температуры в стационарной задаче не учитываются, так как их влияние отражается на динамике процесса, а в стационарном режиме время отсутствует. Результат расчета представлен на рисунке 3.6.

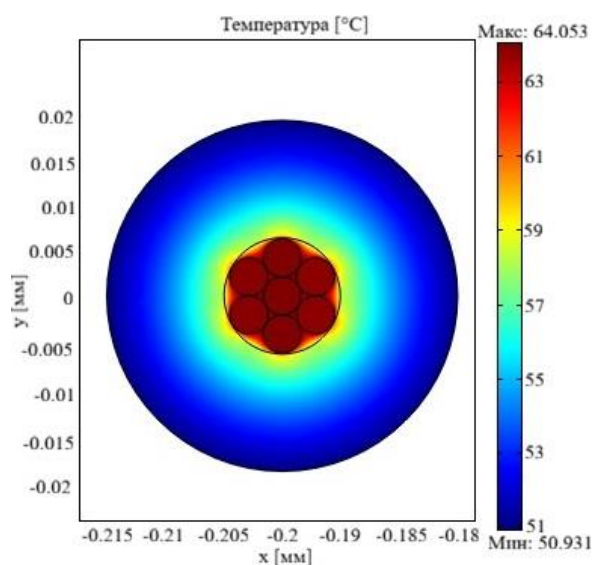


Рисунок 3.6. Распределение температуры в проводе АС-50/8 с оболочкой при стационарном решении задачи.

Согласно полученному распределению температуры, максимальная температура в проводе составляет 64,1 °С. На границе раздела «провод – лёд» температура достигает 59 °С. На расстоянии 5 мм от поверхности провода температура снижается до 57 °С, на расстоянии 10 мм – до 55 °С, на расстоянии 16 мм – до 53 °С, на расстоянии 18 мм и вплоть до внешней границы оболочки (20 мм) – до 51 °С. Минимальная температура на внешней поверхности оболочки составляет 50,9 °С.

Таким образом, в стационарном режиме вся ледяная оболочка прогрета значительно выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (на $50 - 60\text{ }^{\circ}\text{C}$), что гарантирует её полное расплавление при достаточном времени нагрева.

Аналогичные расчёты выполнены для провода АС-50/8 при увеличенном токе (420 А) и мощности тепловыделения $104,71\text{ Вт/м}$, и температурах окружающей среды $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результаты приведены в таблице 3.6.

Полученные значения температуры и мощности позволяют оценить эффективность подогрева ледяной оболочки в рассматриваемых условиях.

Таблица 3.6

Результаты расчета нагрева ледяной оболочки при температуре воздуха $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Скорость ветра, м/с	$t, \text{с}$	$T_{\text{раз}},\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{стац}},\text{ }^{\circ}\text{C}$	$q, \text{Вт/м}$
$I_{\text{до}}, d_{\text{лед.обл.}} = 20\text{ мм}$				
0	4000	$0,16 \div 12$	$50 \div 64$	0,41
5	9000	$-1,5 \div 10$	$0,9 \div 14$	19,07
10	9000	$-2,7 \div 10$	$-2,9 \div 8,7$	24,26
20	13000	$-3,56 \div 4,21$	$-3,56 \div 4,21$	25,29
$I_p = 2 \cdot I_{\text{до}}, d_{\text{лед.обл.}} = 20\text{ мм}$				
0	700	$-2,2 \div 33,76$	$220 \div 272,8$	2,18
5	900	$-2,92 \div 36,51$	$18,73 \div 71,42$	20,38
10	1050	$-2,94 \div 36,58$	$10,63 \div 63,30$	28,25
20	1200	$-3,79 \div 32,91$	$5,30 \div 57,94$	31,74

В таблице приняты обозначения: t - время нагрева (нестационарный режим); $T_{\text{раз}}$ - перепад температур по толщине ледяной оболочки по вертикали и горизонтали; $T_{\text{стац}}$ - диапазон температур в ледяной оболочке и проводе в стационарном режиме; q - интегральный тепловой поток с поверхности оболочки.

Для обоснования выбранного режима плавки и оценки влияния климатических факторов (температуры воздуха и скорости ветра) на динамику прогрева, по результатам расчетов построены графические зависимости (рисунках 3.7 – 3.9). Массивы численных данных для

температуры $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и направленного бокового обдува вынесены в Приложение Б (Таблицы ПБ.1 – ПБ.3).

Как наглядно демонстрирует анализ стационарных температур (рисунке 3.7, таблица 3.6), протекание длительно-допустимого тока 210 A не способно обеспечить условия для сброса ледяной муфты при наличии ветрового охлаждения. Уже при скорости ветра 5 м/с максимальная установившаяся температура в центре провода не превышает $14\text{ }^{\circ}\text{C}$, что обуславливает сохранение устойчивых отрицательных температур в толще льда. Таким образом, режим при номинальном токе непригоден для плавки при скорости ветра более 0 м/с .



Рисунок 3.7. Диаграммы температуры в проводе при разных токах плавки гололеда.

Переход к удвоенному току (420 A) обеспечивает достижение температуры провода в диапазоне $58\div 71\text{ }^{\circ}\text{C}$ при скорости ветра $5\div 20\text{ м/с}$, что гарантирует прогрев границы раздела сред до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вместе с тем, анализ данных (рисунок 3.7, таблица 3.6) выявляет опасность режима плавки при токе 420 A при полном безветрии (нулевой скорости ветра). Ввиду малых конвективных потоков из-за снижения площади поверхности ледяной оболочки температура провода в стационарном режиме может достичь $272,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Данный факт требует строгого ограничения времени протекания тока для предотвращения термического разрушения провода.

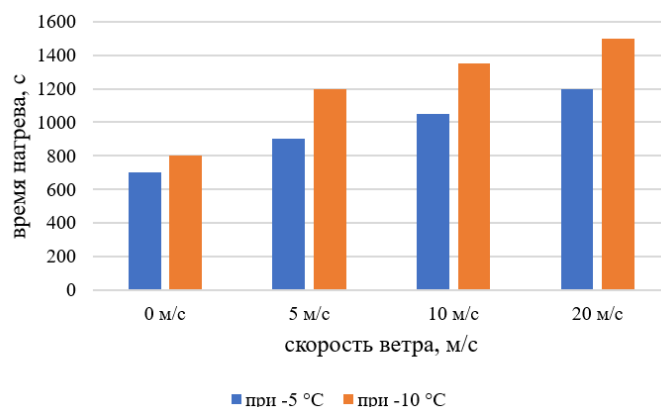


Рисунок 3.8. Зависимости времени нагрева от скорости ветра при разной температуре воздуха.

Снижение температуры окружающего воздуха с $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рисунок 3.8, таблица ПБ.1) приводит к закономерному увеличению времени прогрева ледяной муфты. Например, при рабочем токе 420 А и отсутствии ветра время достижения температуры $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ на границе провода возрастает с 700 с до 800 с.

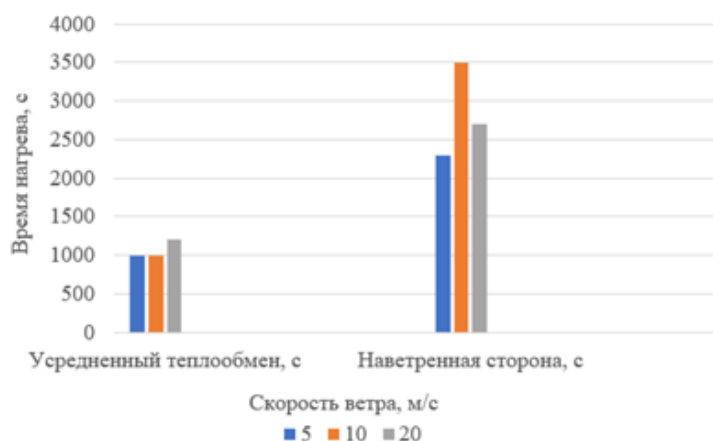


Рисунок 3.9. Диаграмма сравнения моделей с усредненным теплообменом и боковым теплообменом.

Для уточнения процессов охлаждения в программном комплексе была реализована модель с заданием конвективного теплообмена в виде функции угловой координаты (имитация направленного бокового ветра). Сравнение расчетных моделей (рисунок 3.9, таблицы 3.6 и ПБ.2) подтверждает существенную пространственную неравномерность охлаждения. В отличие от модели с усредненным по окружности коэффициентом теплоотдачи, учет реального бокового ветра показывает, что наветренная сторона охлаждается

значительно интенсивнее. Время достижения $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ на наветренной стороне при скорости ветра 5 м/с возрастает более чем в 2 раза: с 1000 с до 2300 с (таблица ПБ.2).

Обобщая результаты численных экспериментов, можно утверждать, что ток величиной 420 А является энергетически достаточным для инициации процесса плавки. Однако, как доказано уточненной моделью бокового обдува, на практике расплавление происходит асимметрично: подветренная сторона прогревается значительно быстрее наветренной.

В реализованной постановке тепловой задачи предполагается, что ледяная муфта неподвижна, а нагрев длится вплоть до полного термического проплавления всей ее толщины. В реальных условиях эксплуатации такое проплавление не требуется. По мере достижения $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ на границе «провод – лед» образуется водяная пленка, муфта теряет сцепление с проводом, начинает смещаться вниз под действием гравитационных сил и сбрасывается. Поэтому для определения фактического времени очистки провода необходимо перейти от статической тепловой задачи к динамической, имитирующей механическое смещение ледяного слоя.

3.3. Имитационное моделирование тепловых процессов проплавления в системе «провод – ледяная оболочка»

3.3.1. Моделирование проплавления с фиксированной скоростью оболочки

Моделирование процессов проплавления сопряжено с высокими вычислительными затратами. Использование детальной многопроводочной геометрии при расчете приводит к сильному искажению формы конечных

элементов и плохой сходимости решения. В связи с этим был осуществлен переход к эквивалентной моножильной модели провода.

На основе разработанных ранее математических моделей в программном комплексе COMSOL Multiphysics [85] выполнено моделирование нестационарных тепловых процессов проплавления ледяной оболочки для сталеалюминиевого провода АС-50/8 [96, 98]. Геометрические и электрические параметры провода (таблица 3.1) приняты по паспортным данным [96]. Эквивалентные свойства моножильной модели получены методом объёмного усреднения (выражение 2.10) реальной геометрии многожильного провода (с учетом алюминиевых жил, стального сердечника и воздушных зазоров).

Таблица 3.7

Расчетные параметры провода АС-50/8

$S, \text{мм}^2$	$k, \text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$	$C_p, \text{Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$	$\rho, \text{кг} / \text{м}^3$	$Q_{I\partial\partial}, \text{Вт} / \text{м}^3$	$Q_{Ip}, \text{Вт} / \text{м}^3$
50/8	177	826	3443	350687	1390052

В таблице принято: ρ - плотность; C_p - удельная теплоёмкость; k - теплопроводность; $Q_{I\partial\partial}$ - мощность тепловыделения длительно-допустимом токе; Q_{Ip} - мощность тепловыделения при удвоенном токе.

Приемлемость перехода к моножильной модели подтверждается сравнением погонных мощностей тепловыделения. В многожильной модели при длительно-допустимом токе (210 А) мощность составила 26,03 Вт/м, в эквивалентной моножильной — 26,45 Вт/м (расхождение 1,6 %). При удвоенном токе (420 А) мощности составили 104,82 Вт/м и 104,85 Вт/м соответственно (расхождение 0,03 %). Данная погрешность является приемлемой для инженерных расчётов.

На первом этапе анализа нестационарных процессов вертикальная скорость задавалась перемещением самой ледяной оболочки. Эта скорость была задана постоянной. Ее величина определялась аналитически из среднего времени оттаивания муфты в рассматриваемых режимах плавки.

Результаты моделирования представлены в виде распределения температур (рисунок 3.10) и временных диаграмм для четырёх контрольных точек на поверхности однородного проводника и в ледяной оболочке (рисунок 3.11).

На рисунке 3.10 показано распределение температуры в однородном проводе АС-50/8 с ледяной оболочкой толщиной 20 мм в момент времени 5100 с. Максимальная температура (в проводе) составляет 7 °С, минимальная (на внешней границе оболочки) – 0,4 °С.

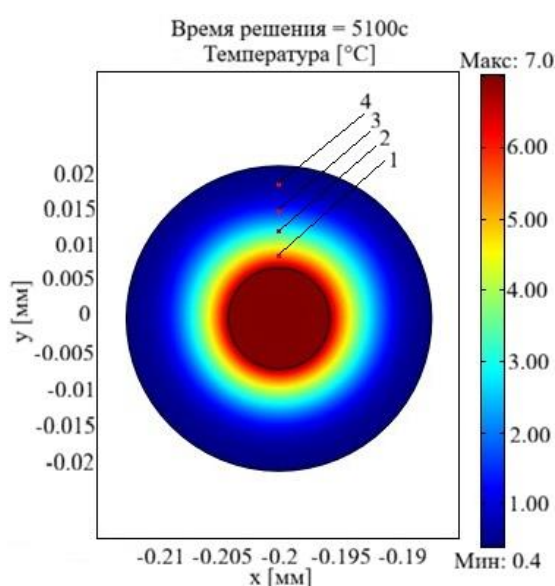


Рисунок 3.10. Распределение температуры в однородном проводе АС-50/8 с ледяной оболочкой 20 мм при подогреве.

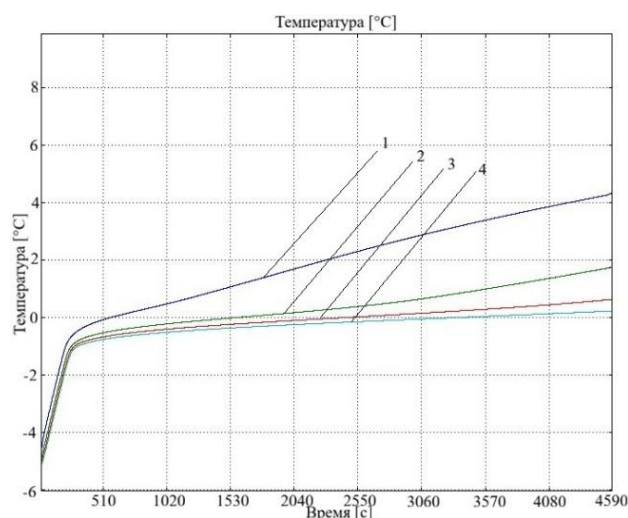


Рисунок 3.11. Временные диаграммы температуры в контрольных точках на расстоянии 3, 7, 12 и 17 мм от поверхности провода АС-50/8.

К моменту времени 5100 с температура в точке 1 достигла $4,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, в точке 2 – $2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, в точке 3 – $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, в точке 4 – $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Диаграммы (рисунок 3.11) показывают, что температура $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ достигается: в точке 1 – через 510 с, в точке 2 – через 1785 с, в точке 3 – через 2295 с, в точке 4 – через 3060 с. Рост температуры во всех точках происходит плавно, что свидетельствует о равномерном распространении тепла от провода к внешним слоям оболочки.

Количественные результаты для упрощенной модели: мощность тепловыделения $26,45\text{ Вт/м}$, тепловой поток с поверхности ледяной оболочки – $2,45\text{ Вт/м}$, с поверхности провода – $0,77\text{ Вт/м}$, общий тепловой поток – $1,68\text{ Вт/м}$. Отрицательное значение теплового потока с поверхности провода указывает на направление тепла наружу.

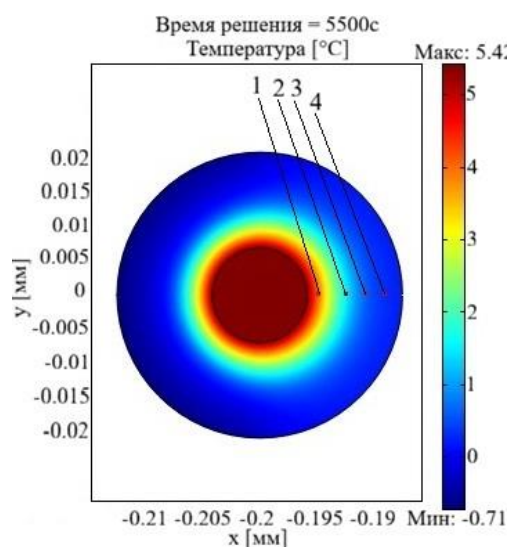


Рисунок 3.12. Распределение температуры в однородном проводе АС-50/8 с ледяной оболочкой 20 мм при подогреве и боковом ветре 5 м/с.

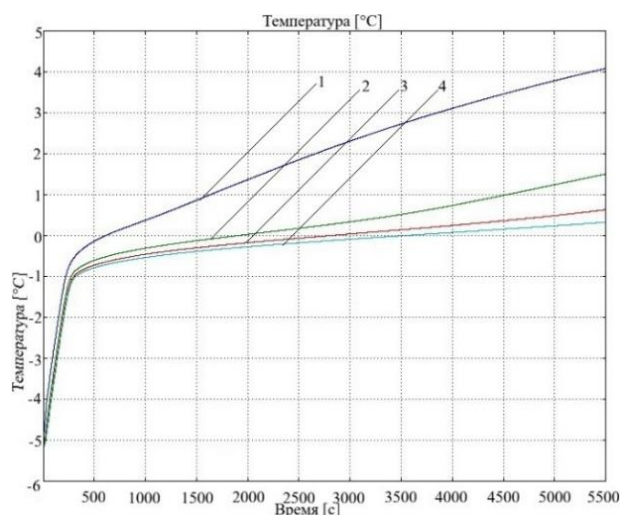


Рисунок 3.13. Временные диаграммы температуры в ледяной оболочке при подогреве и боковом ветре 5 м/с в точках на расстоянии от провода:
1 – 3 мм; 2 – 7 мм; 3 – 12 мм; 4 – 17 мм.

Полные массивы результатов моделирования нагрева ледяной оболочки без учёта её перемещения приведены в Приложении В. Установлено, что при усреднённом теплообмене (таблицы ПВ.1, ПВ.2) длительно-допустимый ток (210 А) обеспечивает оттаивание только при -5°C и скорости ветра до 5 м/с. При направленном боковом теплообмене (таблица ПВ.3) при температуре окружающей среды -5°C наблюдается прогрев внутренних слоев льда при всех рассматриваемых скоростях ветра, хотя на внешней границе сохраняются отрицательные значения температур. При -10°C (таблица ПВ.4) процесс оттаивания при токе 210 А практически не инициируется.

Учет бокового обдува (таблицы ПВ.3, ПВ.4) показывает, что ток 420 А обеспечивает прогрев внутренних слоев льда как при -5°C , так и при -10°C для всего диапазона скоростей ветра, при этом минимальная температура оболочки (при -10°C и 20 м/с) не опускается ниже $-2,2^{\circ}\text{C}$ (таблица ПВ.4).

При моделировании процесса плавки необходимо учитывать относительное смещение ледяной муфты, вызванное гравитацией при образовании водяной пленки на границе раздела. Вертикальная скорость опускания оболочки была задана постоянной: при длительно-допустимом токе $\vartheta = -0,000005 \text{ м/с}$, при удвоенном токе $\vartheta = -0,000001 \text{ м/с}$.

Результаты моделирования с учётом движения оболочки представлены на рисунках 3.14 и 3.15.

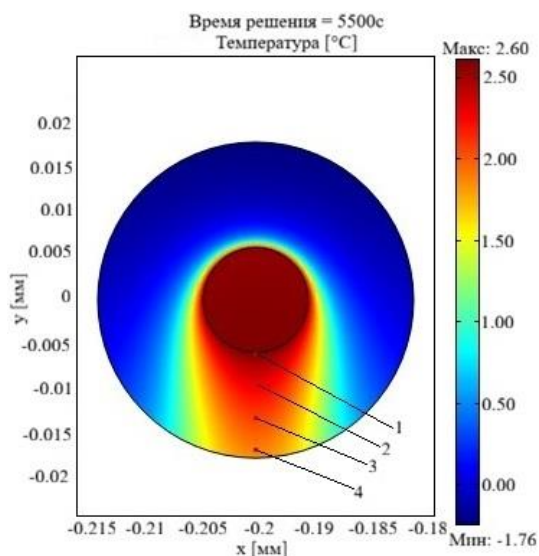


Рисунок 3.14. Распределение температуры в однородном проводе АС-50/8 с ледяной оболочкой 20 мм при скорости ветра 0 м/с, температуре воздуха -5 °С, мощности 26,45 Вт/м².

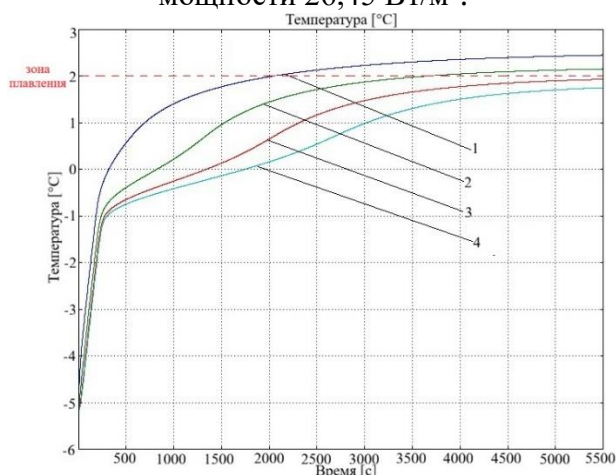


Рисунок 3.15. Временные диаграммы температуры в ледяной оболочке в точках на расстоянии от провода: 1 – 0 мм, 2 – 7 мм, 3 – 14 мм, 4 – 19 мм.

На рисунке 3.14 показано распределение температуры в момент времени 5500 с. Максимальная температура (в проводе) составляет 2,60 °С, минимальная (на внешней границе оболочки) — -1,76 °С. Температурное поле наглядно демонстрирует ярко выраженную вертикальную асимметрию, обусловленную процессом плавления: под действием гравитации ледяная муфта смещается вниз. Вследствие этого плотный тепловой контакт обеспечивается в верхней части оболочки, где и идет активное плавление

(провод «прорезает» лед вверх). В нижней же части оболочки образуется зазор, поэтому там сохраняются отрицательные температуры.

На рисунке 3.15 представлены временные диаграммы температур. В зоне контакта (точка 1) температура достигает $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ через 350 с, на расстоянии 7 мм (точка 2) – через 800 с, на 14 мм (точка 3) – через 1300 с, на внешней границе (точка 4) – через 1750 с. Изменение температуры во времени носит выраженный нелинейный характер: в точках 1 и 2 наблюдается высокая скорость нагрева (значительный градиент по времени) в первые 2000 с, после чего градиент температуры снижается. В более удаленных точках (3 и 4) функция температуры возрастает плавно на протяжении всего расчетного интервала.

Сводные результаты моделирования проплавления (с заданным смещением оболочки) представлены в Приложении Г. Анализ данных (таблицы ПГ.1–ПГ.4) позволяет сделать следующие выводы: при усреднённом теплообмене процесс оттаивания при токе 210 А возможен только при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скорости ветра не более 10 м/с; при токе 420 А положительные температуры во внутренних слоях достигаются во всех рассмотренных сценариях. При учете бокового теплообмена ток 210 А обеспечивает плавление при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также при $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (при скоростях ветра до 10 м/с). Ток 420 А гарантирует проплавление контактного слоя во всем диапазоне климатических параметров.

Таким образом, для процесса плавления ледяной муфты при ветре 20 м/с и температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ требуется применение удвоенного тока (420 А), при этом в инженерных расчетах необходимо строго учитывать реальный боковой ветер, создающий неравномерный теплообмен. Однако четырехкратный рост тепловыделения при токе 420 А существенно повышает риск перегрева провода, что требует поиска промежуточного, энергетически рационального режима. Переход к анализу такого режима, а также устранение математического допущения о фиксированной скорости

смещения муфты, реализованы в модифицированной модели с движущимся проводом (параграф 3.3.2).

3.3.2. Моделирование проплавления с движущимся проводом

Для более точной имитации реальной физики процесса была разработана модифицированная динамическая модель. В отличие от подхода, реализованного в параграфе 3.3.1 (где вертикальная скорость задавалась в ледяной оболочке), в настоящей модели скорость перемещения задана для провода. Это позволяет имитировать реальный физический процесс. По мере расплавления льда под действием силы тяжести провод поднимается вверх относительно оболочки.

Скорость провода описывается с помощью функции Хевисайда $v = v_0 \cdot H(t - t_1)$. До момента времени t_1 провод неподвижен, происходит его нагрев и плавление прилегающего слоя льда. После начала движения при $t = t_1$ $t_1 = 4000\text{с}$ провод перемещается сквозь оболочку, что позволяет отследить динамику изменения температурного поля. Визуализация результатов выполнена с использованием цветового градиента поля температур, где контурные линии обозначают изотермы.

Для оценки влияния теплообмена с окружающей средой на процесс плавления выполнен параметрический анализ тепловых процессов при задании скорости движения провода в диапазоне от 0,1 до 2 мм/с. Коэффициент конвективного теплообмена соответствует боковому обдуву при скорости ветра 5 м/с. Динамика этого процесса наглядно представлена на рисунке 3.16 в различные моменты времени (1250, 2500, 3750 и 5000 с). Визуализация результатов выполнена с использованием непрерывного цветового градиента поля температур. Смещение провода из

геометрического центра муфты отчетливо фиксируется на рисунках «в» и «г».

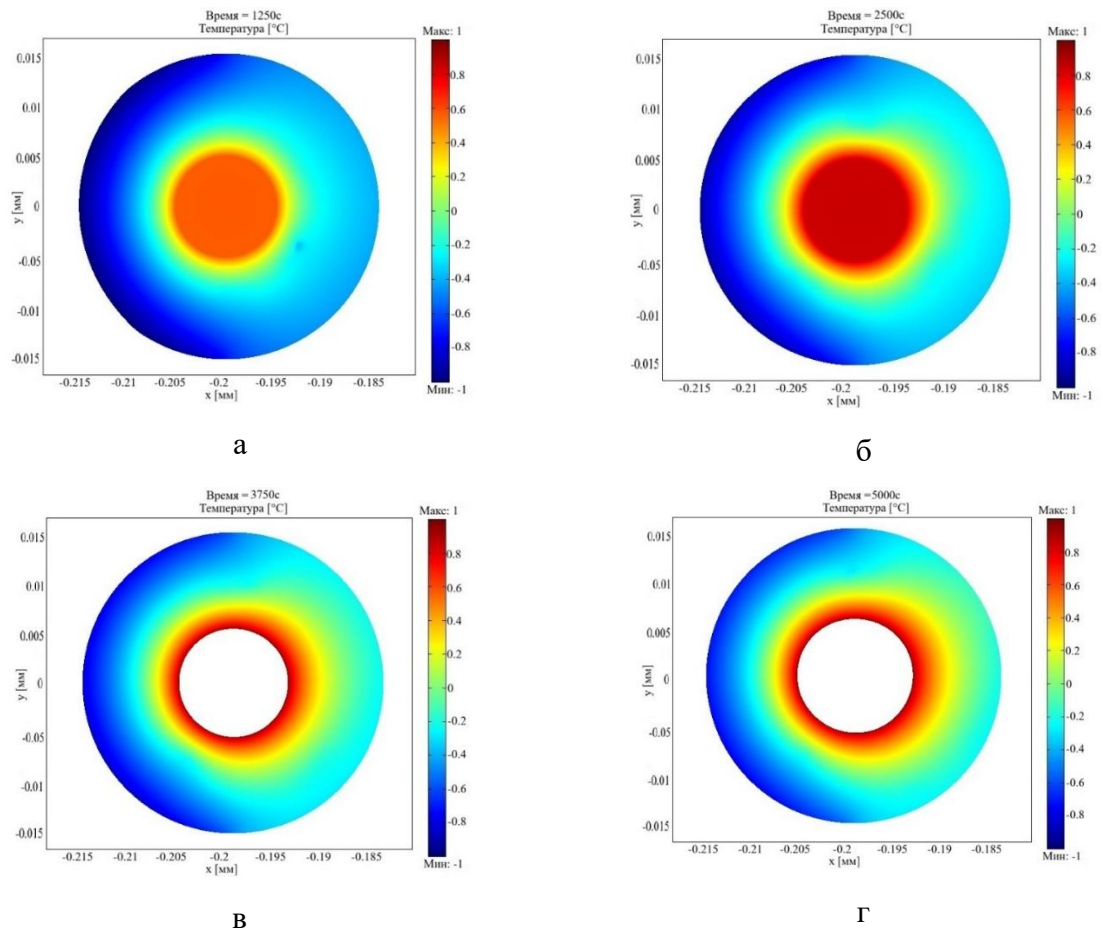


Рисунок 3.16. Распределение температуры в проводе с ледяной оболочкой при имитации движения провода в моменты времени процесса подогрева и проплавления: а – 1250с; б - 2500с; в - 3750с; г - 5000с.

На рисунках 3.17 и 3.18 проиллюстрированы результаты расчета для одной скорости перемещения провода (0,1 мм/с).

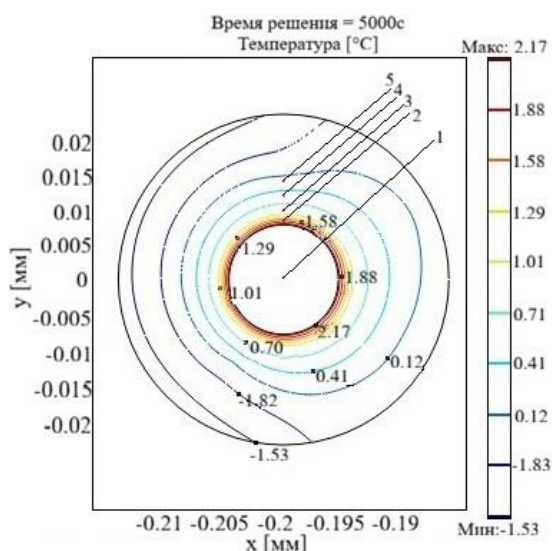


Рисунок 3.17. Распределение температуры в проводе и ледяной оболочке при скорости перемещения провода 0,1 мм/с, скорости бокового ветра 5 м/с в момент времени 5000 с.

На рисунке 3.16 показано распределение температуры в расчётной области в моменты времени 1250с, 2500с, 3750с, 5000с. Максимальная температура (2,17 °С) наблюдается в проводе. На границе раздела «провод - лёд» температура составляет около 1,88 °С. На расстоянии 2 мм от провода со стороны наветренной (охлаждаемой) части температура снижается до 1,01–1,29 °С, с подветренной стороны - до 1,58 °С. Ближе к внешней границе оболочки (8-10 мм) температура составляет около 0,4 °С. Однако наветренная сторона оболочки охлаждена сильнее, температура достигает - 1,82 ÷ -1,53 °С. Подветренная сторона при этом имеет положительные значения (0,12 °С). Данная асимметрия обусловлена неравномерным конвективным охлаждением.

На рисунке 3.18 представлены временные диаграммы температуры в контрольных точках ледяной оболочки для базового режима (ток в проводе 210 А, скорость 0,1 мм/с). Анализ диаграмм показывает, что точка 1 (0,1 мм) достигает 0 °С через 500 с; точка 2 (2 мм) – через 510 с; точка 3 (4 мм) – через 700 с; точка 4 (7 мм) – через 1350 с.

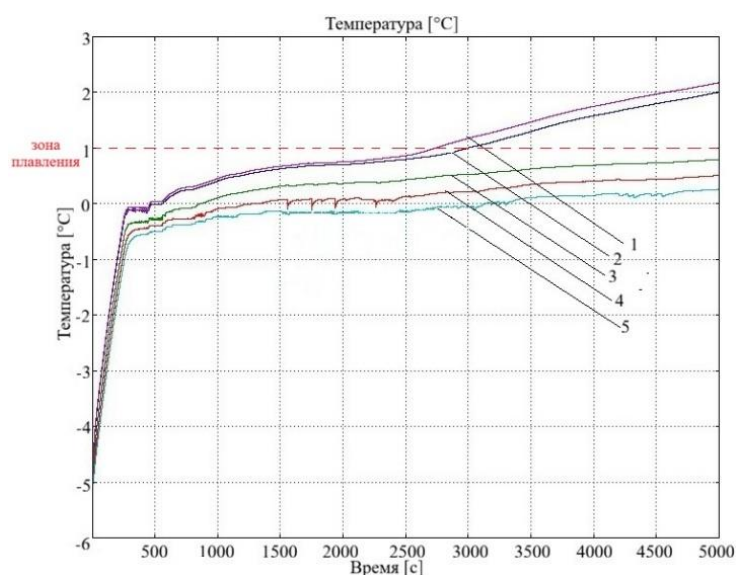


Рисунок 3.18. Временные диаграммы температуры в ледяной оболочке на расстоянии от поверхности провода: 1 – 0,1 мм, 2 – 2 мм, 3 – 4 мм, 4 – 7 мм.

Полные численные данные для всего исследованного диапазона скоростей приведены в Приложении Д (таблица ПД.1).

Анализ данных таблицы ПД.1 для режима плавки при длительно-допустимом токе (210 А) позволяет сделать следующие выводы. При скорости перемещения провода 0,1 мм/с процесс плавления протекает стабильно (длительность 5000 с), температура в контактной зоне достигает 2,17 °С. Однако при задании более высоких скоростей (0,2 мм/с и 1 мм/с) время контакта провода с конкретным слоем льда резко сокращается (моделирование завершается за 3000 с). Вследствие этого тепло не успевает передаться вглубь муфты, и температурные диапазоны на внешней границе для обеих скоростей оказываются отрицательными (-1,39 ÷ -1,46 °С). Это доказывает, что при токе 210А механическое увеличение скорости движения провода ухудшает условия теплопередачи, и полного проплавления муфты не происходит.

Для эффективной плавки гололёда недостаточно просто удвоить ток (что дало бы $I = 420 \text{ А}$ и погонную мощность $P_{\text{пог}} = 104 \text{ Вт / м}$). Однако прямое удвоение тока приведет, согласно закону Джоуля-Ленца, к четырехкратному росту выделяемой мощности, что создает риск термического повреждения провода. В связи с этим осуществлен переход к

режиму расчетного тока плавки с I_p удвоенной тепловой погонной мощностью $P_p = 2 \cdot P_{I_{дд}} = 2 \cdot 26,45 = 52,9 \text{ Вт} / \text{м}$. Из условия удвоения мощности тепловыделения и из известного активного сопротивления провода АС-50/8, соответствующее значение тока находится из соотношения

$$I_p = \sqrt{\frac{P_p}{R}} = \sqrt{\frac{52,9}{0,0005951}} \approx 298 \text{ А}.$$

Анализ данных таблицы ПД.1 для режима плавки при расчетном токе (298 А) подтверждает эффективность данного решения. При скоростях перемещения провода относительно ледяной оболочки 1 мм/с и 2 мм/с в плотном льду достигается стабильно положительная температура в зоне контакта (до $8,98 \div 9,21$ °С), что обеспечивает условия для формирования устойчивой водяной пленки. Дополнительный расчёт для рыхлого льда (плотность 400 кг/м³) при скорости 2 мм/с показывает достижение еще более высоких температур (до 17,27 °С), что свидетельствует о меньших затратах тепловой энергии на расплавление пористых отложений.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на расширение параметрического диапазона (скорости ветра $10 \div 20$ м/с, температура окружающей среды -10 °С) и детальный учёт неравномерности теплообмена по окружности провода. Тем не менее, уже при текущих ограничениях получены важные количественные оценки, достаточные для обоснования выбора режима плавки. Предложенный подход (выбор тока из условия удвоения тепловой мощности, а не самого тока) позволяет существенно снизить общие энергозатраты на плавку и избежать опасного перегрева провода.

В реальных условиях скорость смещения провода сквозь ледяную муфту не является независимой константой, а определяется условием физического баланса - равенством скоростей продвижения фронта расплава и скорости механического перемещения под действием гравитационных сил. Разработанная динамическая модель позволяет обосновать скорости

протекания процесса, при которых этот баланс соблюдается. Однако на практике мощность, необходимая для поддержания расчетных параметров, часто ограничена техническими характеристиками трансформаторов питающих подстанций. В связи с этим, необходим анализ динамики разрушения льда с учетом реальных эксплуатационных ограничений по тепловой мощности.

3.4. Моделирование тепловых процессов в системе «провод ледяная оболочка» с определением времени разрушения ледяного слоя в условиях ограниченной мощности

Задачей данного этапа моделирования является определение минимально необходимого уровня тепловой мощности, достаточного для гарантированного разрушения ледяной муфты (или предотвращения её образования), а также анализ тепловых режимов провода после сброса льда.

Для расширения области применения результатов и оценки влияния дефицита мощности, базовые параметры модели были скорректированы: рассмотрен проводник увеличенного сечения с эквивалентным диаметром 15 мм (АС-185) и толщиной ледяной оболочки 10 мм; коэффициент конвективного теплообмена между поверхностью ледяной оболочки и воздухом имеет значения от 5 до 25 $Вт / (м^2 \cdot град)$; мощность тепловыделения в проводнике – 33 $Вт / м$; длина проводника - 1 м. Тепловыделение в проводнике соответствует протеканию длительно-допустимого тока.

Для определения теплового баланса между поверхностью провода, покрытого слоем льда, и окружающим воздухом произведены расчеты для стационарного режима, когда сформировано установившееся распределение температуры. Процессы плавления и кристаллизации в данном случае не

учитываются. Тепловая задача с неподвижным проводником в ледяной оболочке рассмотрена при разных коэффициентах конвективного теплообмена между поверхностью ледяной оболочки провода и окружающей средой. На рисунке 3.19 представлены диаграммы температуры, соответствующие значениям коэффициента теплообмена от 5 до 25 $Вт / (м^2 \cdot град)$. На рисунке отсчет координат ведется сверху вниз. По сравнению с последующими расчетами для нестационарных процессов картина выглядит нереально из-за высоких значений температуры, при которых вода находится в жидком состоянии.

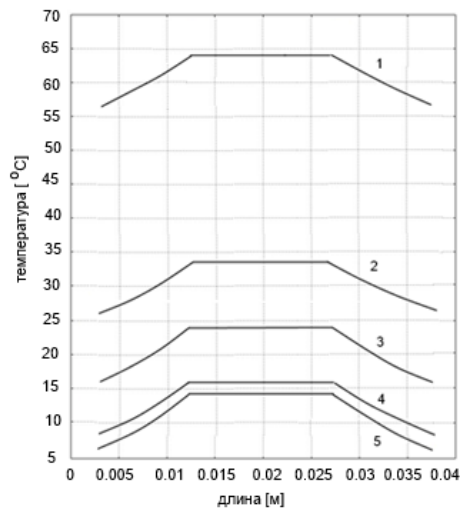


Рисунок 3.19. Диаграммы температуры вдоль горизонтальной осевой линии провода при коэффициенте конвективного теплообмена: 1 – 5 $Вт / (м^2 \cdot град)$; 2 – 10 $Вт / (м^2 \cdot град)$; 3 – 15 $Вт / (м^2 \cdot град)$; 4 – 20 $Вт / (м^2 \cdot град)$; 5 – 25 $Вт / (м^2 \cdot град)$.

Кроме учета радиуса проводника или ледяной оболочки необходимо рассмотрение подветренной и наветренной сторон по отдельности, а также режимов движения воздуха. При порывистом ветре среднее значение скорости приводит к другим значениям эквивалентного коэффициента теплообмена в отличие от спокойного характера движения воздуха.

На рисунке горизонтальные участки диаграмм температуры соответствует проводнику, а наклонные участки характеризуют перепад температуры по толщине ледяной муфты. Как видно из диаграмм, их вид мало изменяется с ростом температуры проводника. Мощность,

выделяющаяся в проводнике, обеспечивает полное расплавление ледяной муфты при условии, что процесс образования ледяной муфты не является более интенсивным.

Расчеты на модели нестационарного процесса нагрева провода с ледяной оболочкой показали, что при коэффициенте теплообмена, равном $5 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$, постоянная времени составляет 3650 секунд, а при коэффициенте теплообмена, равном $25 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$, постоянная времени равна 760 секунд. Тепловой процесс довольно инерционный, даже без учета процесса плавления.

Оценка параметров процесса плавки гололеда выполняется путем расчетов на модели, учитывающей переход льда из твердого в жидкое состояние и обратно, а также образование воздушной прослойки под проводом в ледяном слое. В данном случае имеется в виду оценка соответствия двух параметров – скорости перемещения провода относительно оболочки и скорости движения фронта положительной температуры над проводом. При совпадении этих величин в любой момент времени над проводом наблюдается постоянная толщина прослойки с положительной температурой. При этом учитываются затраты энергии на процесс плавления. В ходе численных экспериментов определено значение мощности, равное 106 Вт, которое обеспечивает формирование области с положительной температурой над проводом при скорости перемещения проводника $v = 0,1 \text{ мм/с}$. После разогрева в течение 900 секунд начинается процесс проплавления. Расчетное время прохождения проводом ледяной оболочки при скорости перемещения проводника $0,1 \text{ мм/с}$ и толщине муфты льда $\Delta H = 10 \text{ мм}$ определяется по формуле $\Delta t = \Delta H / v$ и составляет 100 с. Коэффициент теплообмена задан равным $5 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$. После проведения расчетов значение скорости может быть скорректировано так же, как и момент начала движения.

Согласно диаграммам, показанным на рисунке 3.20, проводник и

прилегающий к нему слой водно-ледяной оболочки переходят в область положительных температур в моменты времени 450 и 560 секунд. В связи с ограничениями модели принято условное название для оболочки, предполагающее в указанной геометрической области твердое или жидкое состояние воды. Положительные значения температуры относятся только к жидкой фазе. За этим следует перемещение проводника относительно оболочки. Можно говорить о том, что в момент времени 700 секунд провод проходит сквозь оболочку и освобождается от нее.

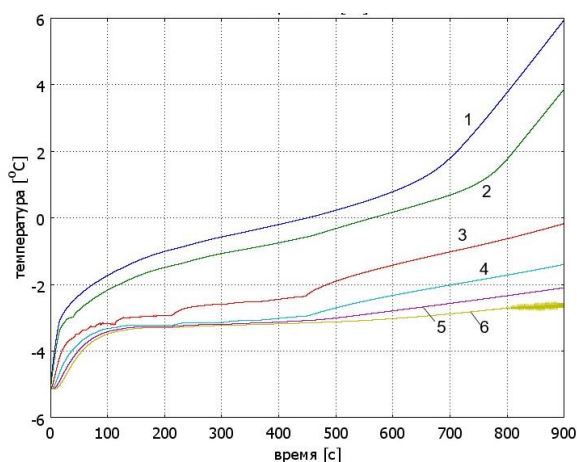


Рисунок 3.20. Временные диаграммы температуры в оболочке на расстоянии от поверхности провода: 1 - 0 мм; 2 - 0,5 мм; 3 - 2,5 мм; 4 - 4,5 мм; 5 - 6,5 мм; 6 - 10 мм.

На рисунке 3.21 изображено распределение температуры в проводнике и в слое льда в момент времени 900 с. Несимметрия в картине распределения незначительна.

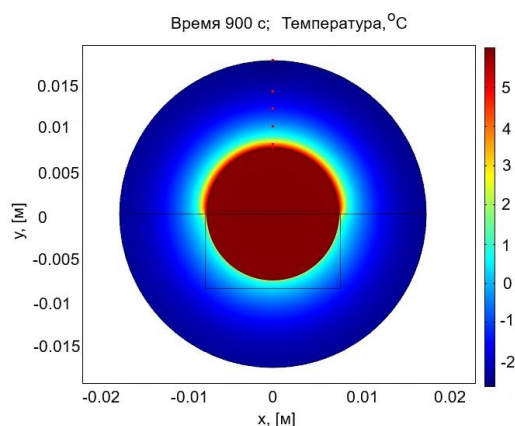


Рисунок 3.21. Распределение температуры в проводе с ледяной оболочкой при плотности 900 кг/м^3 в момент времени 900 с.

Диаграммы температуры в системе «провод – лёд» вдоль вертикальной линии представлены на рисунке 3.22. Несимметрия диаграмм характеризуется разницей температур не более 0,3 градуса.

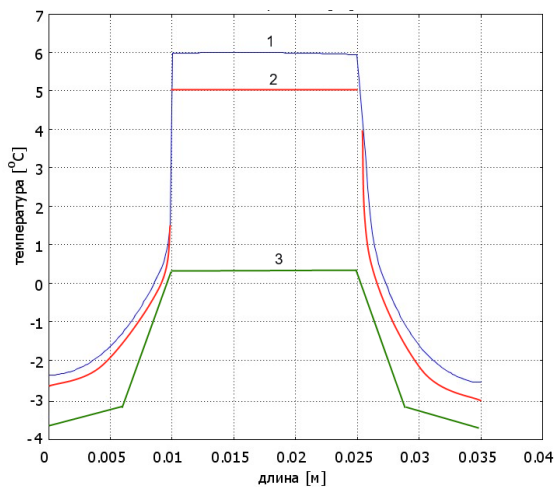


Рисунок 3.22. Диаграммы температуры по высоте в проводе с оболочкой при коэффициенте теплообмена: 1 – $5 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$; 2 – $25 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$; 3 – $125 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$.

Рассмотрены два типа отложений: плотный лёд ($\rho = 900 \text{ кг} / \text{м}^3$) и рыхлый лёд ($\rho = 400 \text{ кг} / \text{м}^3$). Моделирование показало, что снижение плотности с 900 до $400 \text{ кг} / \text{м}^3$ уменьшает время нагрева до начала плавления (рисунок 3.13). При $\rho = 400 \text{ кг} / \text{м}^3$ положительная температура на расстоянии 0,5 мм от провода достигается уже через 100 с, а мощность тепловыделения может быть снижена со 106 до 88 Вт.

Согласно диаграммам (рисунок 3.23), температура в точке ледяной оболочки на расстоянии 6,5 мм от провода становится положительной через 650 с, что означает начало плавления в этой зоне. Положительные температуры соответствуют жидкой фазе.

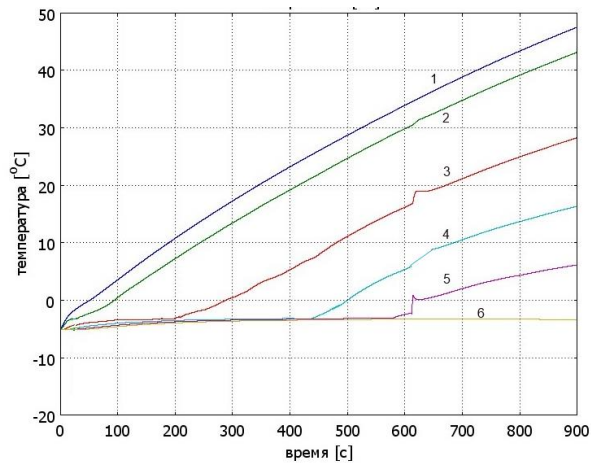


Рисунок 3.23. Временные диаграммы температуры в оболочке на расстоянии от поверхности провода: 1 - 0 мм; 2 - 0,5 мм; 3 - 2,5 мм; 4 - 4,5 мм; 5 - 6,5 мм; 6 - 10 мм.

На рисунке 3.24 показано распределение температуры в системе «провод – лёд (вода)» для рыхлой ледяной оболочки ($\rho = 400 \text{ кг/м}^3$) при мощности тепловыделения $Q = 88 \text{ Вт/м}$ в момент времени $t = 900 \text{ с}$. По сравнению с предыдущим расчётом для плотного льда ($\rho = 900 \text{ кг/м}^3$, $Q = 106 \text{ Вт/м}$, рисунок 3.21) на рисунке 3.24 наблюдаются значительные изменения: область положительных температур имеет более высокие значения, распределение температуры становится выражено несимметричным (верхняя часть холоднее нижней, под проводом образуется воздушная прослойка, которая уменьшает толщину области положительных температур и снижает передачу тепла вниз. При плавлении рыхлой структуры, характеризующейся пониженной мощностью $Q = 88 \text{ Вт/м}$ вместо $Q = 106 \text{ Вт/м}$, и механическом смещении муфты вниз, под проводом образуется воздушная прослойка. Она выступает в роли локального теплоизолятора, ограничивая передачу тепла вниз и препятствуя проплавлению нижней части муфты, тогда как в верхней части (в зоне контакта) наблюдаются более высокие температуры.

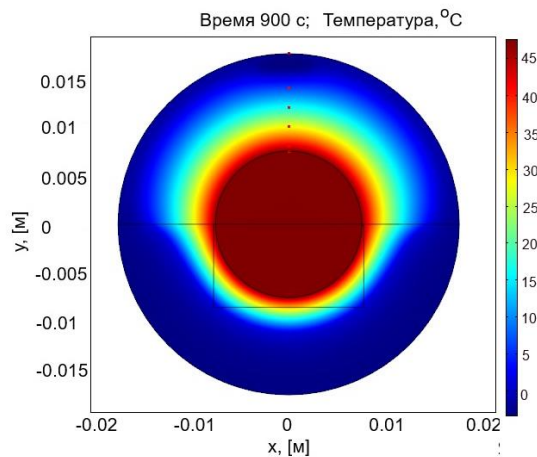


Рисунок 3.24. Распределение температуры в проводе с ледяной оболочкой при плотности 400 кг/м^3 мощности тепловыделения 88 Вт/м в момент времени 900 с .

При коэффициенте теплообмена $\alpha = 25 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ результаты моделирования (как распределение температуры по толщине оболочки, так и временные зависимости в контрольных точках) практически совпадают с приведёнными на рисунке 3.25. Это объясняется слабым влиянием внешнего термического сопротивления (конвекции) по сравнению с внутренним (теплопроводностью льда): при значениях коэффициента теплообмена α свыше $25 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ дальнейшего существенного изменения перепада температуры в самой оболочке не происходит.

При плавлении оболочки с низкой плотностью (рыхлый лёд, $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$), структура которого обладает пониженной теплопроводностью, диаграммы распределения температуры вдоль вертикальной оси (рисунок 3.25) приобретают выраженную несимметрию. Поскольку под действием гравитации муфта опускается, под проводом образуется воздушная прослойка. Вследствие этого нижняя часть оболочки остается более холодной (воздух выступает теплоизолятором, препятствуя передаче тепла вниз), тогда как в верхней части, где обеспечивается плотный тепловой контакт с проводом, концентрируются более высокие температуры.

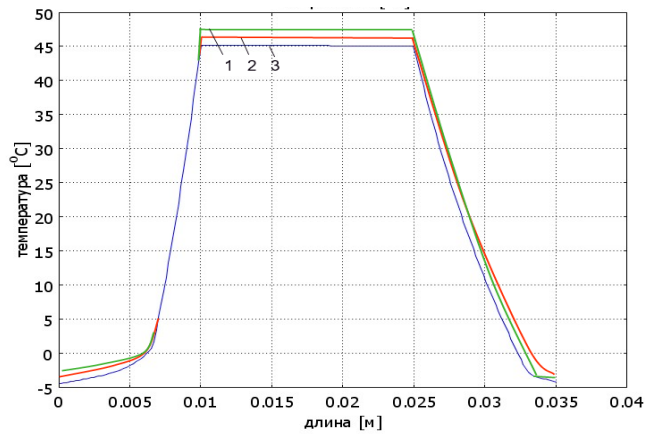


Рисунок 3.25. Диаграммы температуры по вертикали высоте в проводе с ледяной (рыхлой) оболочкой при коэффициенте теплообмена:

1 – $5 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$; 2 – $25 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$; 3 – $125 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$.

Освобождение провода ото льда меняет условия теплообмена: теперь тепло отводится непосредственно с поверхности провода, а не через ледяную оболочку. При этом площадь поверхности теплообмена уменьшается (так как диаметр провода меньше диаметра ледяной оболочки), что снижает тепловой поток в окружающую среду и приводит к существенному росту температуры провода. Результаты представлены в таблице 3.8 и на рисунке 3.26.

Таблица 3.8

Результаты проведенных расчетов

№	$P, \text{ Вт}$	$\alpha, \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$	$\tau, \text{ с}$	$T_{\text{max}}, \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{10}, \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{30}, \text{ } ^\circ\text{C}$
1	106	5	1700	440	110	280
2	106	25	366	85	64	84
3	106	125	75	12,8	12,8	12,8
4	88	5	1800	365	100	230
5	88	25	350	69	56	69
6	88	125	90	9,8	9,8	9,8

В таблице обозначены: τ - время нагрева провода; T_{max} - максимальная установившаяся температура провода; T_{10} и T_{30} - температуры провода через 10 и 30 минут (600 и 1800 с) соответственно после сброса льда.

В таблице отображены значения температуры в моменты времени 10 и 30 минут для того, чтобы определить необходимость проведения каких-либо действий.

Временные диаграммы температуры голого провода позволяют оценить риск перегрева проводника при неравномерном покрытии поверхности провода ледяной оболочкой во время плавки гололёда. На основании анализа табличных данных и диаграмм видно, что даже при довольно невысоких мощностях тепловыделения нагрев голого провода приводит к недопустимому перегреву, если вовремя не снизить ток линии. Можно сделать вывод о том, что при коэффициентах конвективного теплообмена $5 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$ при подогреве провода в течение времени свыше 500 секунд, проводник разогревается до недопустимых температур. При заданном коэффициенте теплообмена предпочтительнее выглядит краткосрочный режим плавки с заданным временем, когда температуры в проводе не превышают 100°C . При коэффициентах конвективного теплообмена $25 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$ и $125 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$, даже при длительности нагрева более 2000 секунд, диапазон конечных значений температуры не превышает 100°C . При таких погодных условиях длительный режим не приводит к перегреву и является более безопасным.

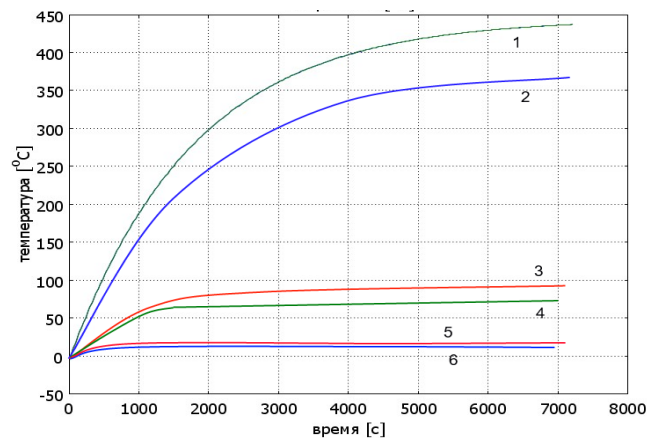


Рисунок 3.26. Временные диаграммы температуры провода без ледяной муфты:
 1 – мощность 106 Вт, коэффициент теплообмена $5 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$; 2 – мощность 88 Вт, коэффициент теплообмена $5 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$; 3 – мощность 106 Вт, коэффициент теплообмена $25 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$; 4 – мощность 88 Вт, коэффициент теплообмена $25 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$; 5 – мощность 106 Вт, коэффициент теплообмена $125 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$; 6 – мощность 88 Вт, коэффициент теплообмена $125 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$.

Сопоставление результатов стационарных и нестационарных расчетов показало, что они решают разные, но взаимодополняющие задачи: расчет стационарного режима позволяет оценить принципиальную энергетическую возможность расплавления оболочки, тогда как динамические (нестационарные) модели выявляют критический риск перегрева голого провода после сброса льда.

При слабом ветре температура очищенного от гололеда провода быстро достигает недопустимых пределов. В этих условиях необходим строгий контроль наличия льда на проводах или аппаратное ограничение времени протекания тока плавки на основе показаний анемометров. При сильном ветре перегрев исключён, однако возрастает риск нецелесообразного перерасхода электрической энергии, что также требует диспетчерского регулирования.

Применение нестационарных моделей позволяет уточнить параметры плавки (мощность, время) по сравнению с упрощёнными расчетами на стационарных моделях. На их основе можно определить режимы загрузки линии реактивными токами, обеспечивающие эффективную плавку без превышения допустимой нагрузки трансформаторов. Выбор конкретного режима (тока, времени) в каждом случае требует отдельного расчёта.

Выявление критических порогов минимальной мощности показало, что эффективность процесса плавки в таких режимах напрямую зависит от интенсивности конвективного теплообмена. Величина рассеиваемого теплового потока во многом определяется теплопроводностью и плотностью ледяной оболочки. Для получения достоверных количественных оценок процесса возникает необходимость перехода к исследованию влияния проплавления при различных значениях толщины муфты и структуры льда (от рыхлой изморози до плотного ледяного дождя).

3.5. Моделирование проплавления ледяной оболочки в зависимости от её физических свойств и толщины

Моделирование проплавления ледяной оболочки требует учёта перемещения провода внутри льда с изменением агрегатного состояния льда (фазовый переход «лёд–вода»). Для решения этой задачи применен упрощённый подход - имитация движения провода с заданной скоростью, равной скорости распространения фронта плавления.

В расчётах принято, что фронт плавления находится на расстоянии 1 мм от верхней поверхности провода и соответствует температуре 2 °С. (Последнее обусловлено дискретностью модели фазового перехода, принятой в алгоритме расчёта.) Для провода АС-50/8 диаметром 9,6 мм с ледяной оболочкой толщиной от 2 до 15 мм и при скорости ветра от 1 до 20 м/с коэффициент конвективного теплообмена изменяется в диапазоне от 20 до $160 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Эти значения коэффициентов используются в тепловой задаче как граничные условия на внешней поверхности ледяной оболочки. Нижняя граница (0-1 м/с) позволяет оценить термическую стойкость (вероятность перегрева) провода в условиях минимального конвективного охлаждения. Верхняя граница (20 м/с) позволяет смоделировать охлаждения провода в процессе плавки при наиболее тяжелом ветровом давлении. Зависимости коэффициента теплообмена от скорости ветра для проводов с разной толщиной оболочки представлены на рисунке 3.3.

Теплофизические свойства льда (плотность, теплопроводность, удельная теплоёмкость) заданы в модели как функции температуры с учетом фазового перехода «лёд–вода» с помощью ступенчатой функции.

Для более точного контроля температуры внутри оболочки вблизи поверхности провода ледяная оболочка разделена на две подобласти: внутреннюю (толщиной 5 мм) и внешнюю (толщиной 15 мм). Свойства льда в обеих подобластях одинаковы; такое разбиение позволяет задать точку

контроля температуры на фиксированном расстоянии 2 мм от провода. В дальнейшем варьируется полная толщина ледяной оболочки в диапазоне от 2 до 15 мм (т.е. изменяются геометрические размеры модели).

Прежде чем перейти к параметрическому исследованию влияния толщины оболочки, на первом этапе рассмотрен базовый случай с оболочкой толщиной 20 мм. Этот расчёт выполнен для сопоставления с результатами параграфов 3.2–3.4. Далее толщина оболочки варьируется в диапазоне от 2 до 15 мм (шаг 2, 5, 10, 15 мм). Модель с оболочкой 20 мм используется только в этом одном случае. Нижняя граница (2 мм) соответствует моменту раннего обнаружения льда датчиками автоматизированной системы мониторинга. Верхняя граница (20 мм) является предаварийным пределом, при котором пропускная способность сетей 10 кВ еще позволяет провести плавку без отключения конечных потребителей и без разрушения провода. Расчёт проведен для тока плавки 298 А, величина которого обоснована в п. 3.3.

Даже небольшое обледенение может значительно увеличить механические нагрузки на все элементы воздушных линий. При образовании на данном проводе ледяной муфты с нормативной толщиной стенки 30-40 мм и выше, общий диаметр провода с учетом отложений увеличится в 7-8 и более раз. Пропорционально возрастающие ветровое давление и весовая нагрузка приведут к механическому разрушению провода еще до того момента, как комплекс плавки сможет прогреть ледяную муфту такого объема.

На рисунке 3.27 показано распределение температуры в проводе и ледяной оболочке в момент времени 3000 с (слабый ветер, скорость горизонтального проплавления 0,1 мм/с, мощность 52,9 Вт/м). Максимальная температура (7,34 °С) достигается в проводе, минимальная (0,11 °С) – на внешней границе оболочки. Наблюдаемая на рисунках (а и б) незначительная асимметрия температурного поля (левая и правая части оболочки отличаются не более чем на 1-2 °С) обусловлена малыми

значениями скорости ветра и горизонтальной скоростью перемещения провода в оболочке.

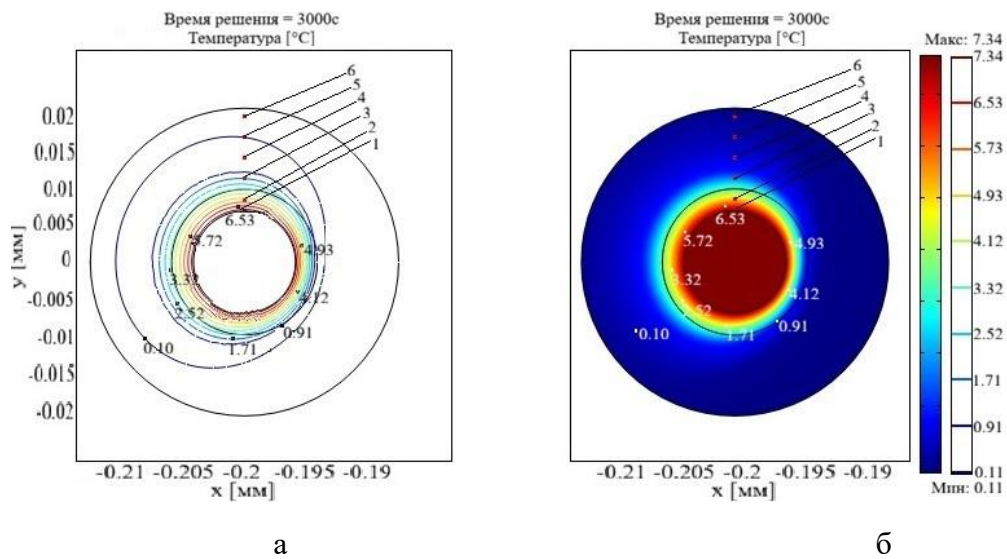


Рисунок 3.27. Распределение температуры в однородном проводе с ледяной оболочкой в момент времени 3000 секунд при мощности 52.9 Вт/м и скорости проплавления 0.1 мм/сек: а – изотермы в ледяной оболочке; б – распределение температуры в проводе и ледяной оболочке.

На рисунке 3.28 представлены временные диаграммы температуры для шести контрольных точек на расстояниях 0 (граница провода), 0,5; 4; 8; 14 и 19 мм от поверхности провода. В точке 1 (граница) температура достигает значения 0 °C через 100 с, к моменту времени 1500 с температура достигает значения 4 °C, к моменту времени 3000 с температура становится равной 6,7 °C. В точке 2 (0,5 мм) температура достигает 0 °C через 250 с, медленно растёт до 1 °C до момента времени 1400 с, затем резко возрастает до значения 4,6 °C. В точке 3 (4 мм) график температуры пересекает значение 0 °C через 750 с и плавно растёт до значения 1,9 °C. В точке 4 (8 мм) температура достигает 0 °C через 1400 с и далее очень медленно увеличивается до 0,3 °C. В точке 5 (14 мм) температура достигает 0 °C только через 2400 с, а конечная температура равна 0,1 °C. В точке 6 (19 мм) температура колеблется в диапазоне от -0,1 до 0,2 °C, не достигая устойчивого положительного значения.

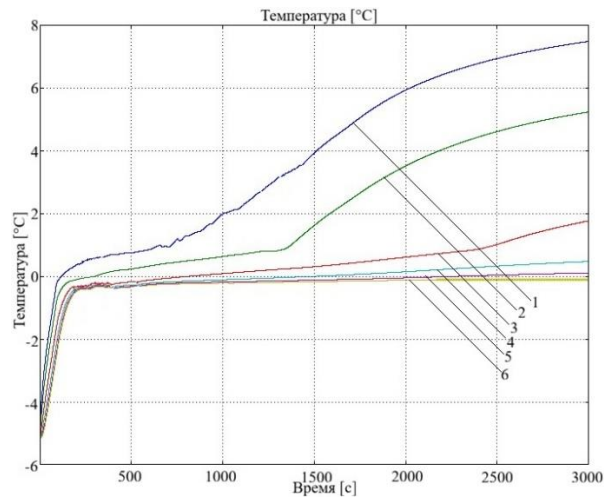


Рисунок 3.28. Диаграммы температур от времени в точках на расстоянии от провода: 1 – граница провода, 2 – 0.5 мм, 3 – 4 мм, 4 – 8 мм, 5 – 14 мм, 6 – 19 мм.

На рисунке 3.29 приведены диаграмма температуры вдоль вертикальной оси провода с оболочкой в различные моменты времени. Наблюдается заметная асимметрия: температура в верхней части ниже, чем в нижней.

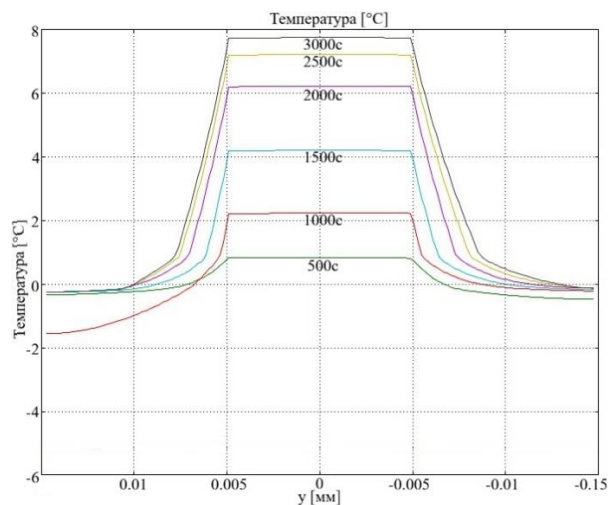


Рисунок 3.29. Диаграммы температуры в однородном проводе с ледяной оболочкой вдоль вертикальной осевой линии в моменты времени 500 ÷ 3000 секунд.

Это свидетельствует о неравномерном прогреве, связанном с направлением движения провода относительно оболочки (провод смещается вверх, его верхняя сторона дольше контактирует с более холодными слоями, что может приводить к локальному перераспределению температур). Количественный анализ асимметрии позволяет оценить скорость проплавления.

Анализ результатов расчётов (Приложение Е, Таблица ПЕ.1) показывает, что скорость перемещения провода сквозь лед не является произвольной величиной, а строго детерминирована балансом выделяемой тепловой мощности и интенсивности теплоотвода. При длительно-допустимом токе (210 А) скорость продвижения температурного фронта расплава недостаточна: внешняя граница муфты сохраняет отрицательные температуры (от -1,99 до -1,28 °С). При расчетном токе 298 А условие физического баланса выполняется: устойчивое полное проплавление контактной зоны достигается при расчетной скорости фронта 0,5 мм/с. Именно для этого режима на рисунках 3.27–3.29 приведены детальные иллюстрации.

Для исследования влияния толщины ледяной оболочки на процесс проплавления (при фиксированной скорости 0,5 мм/с, ветре 5 м/с, расчетном токе 298 А, температуре окружающей среды -5 °С) выполнены расчёты для плотного льда ($\rho = 900 \text{ кг/м}^3$) толщиной 5, 10 и 15 мм, а также для рыхлого льда ($\rho = 400 \text{ кг/м}^3$) толщиной 5 мм. Результаты представлены на рисунках 3.30-3.31 и в таблице 3.9.

На рисунках 3.30 (а–г) представлена динамика распределения температурного поля для провода с оболочкой из плотного льда толщиной 5 мм. Визуализация выполнена с помощью изотерм для последовательных моментов времени: 600, 1200, 2000 и 3100 с.

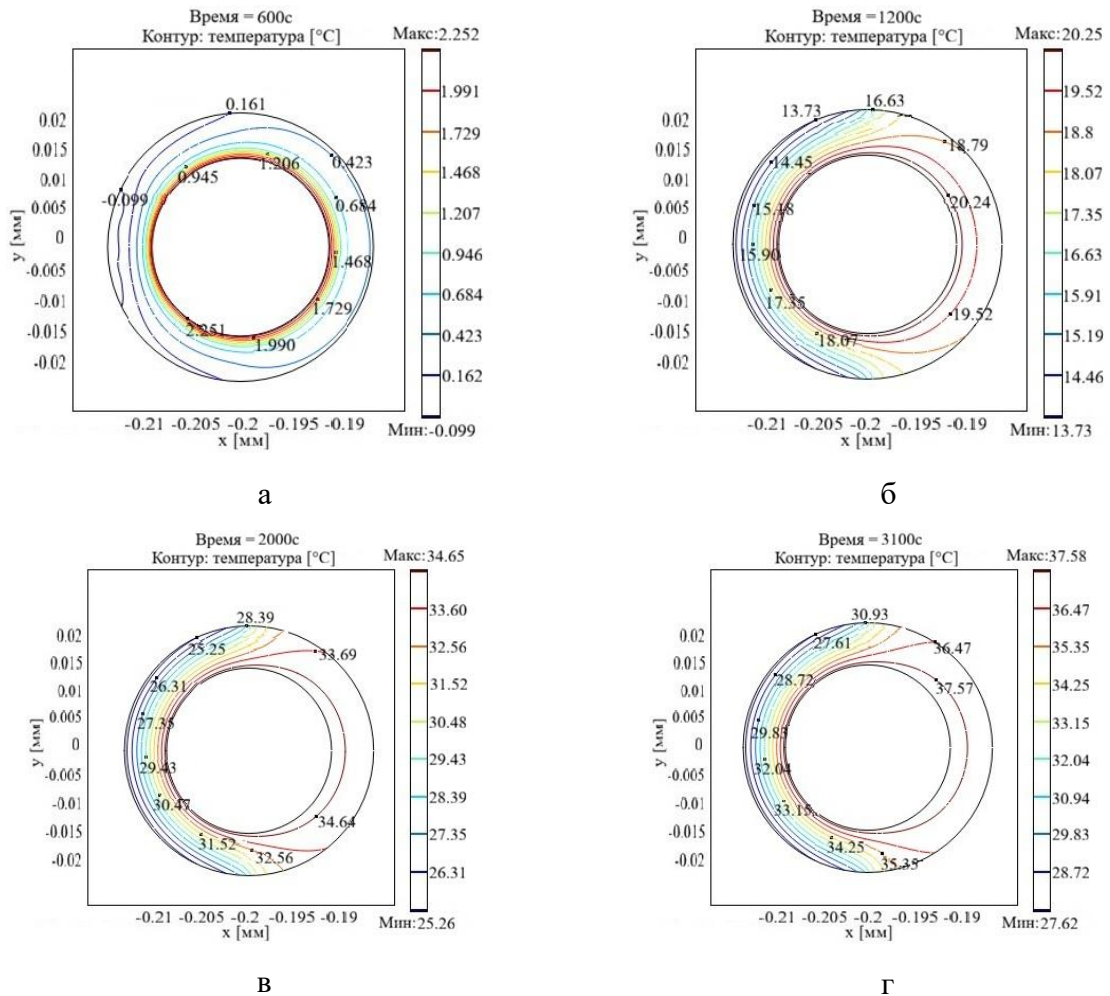


Рисунок 3.30. Изотермы в однородном проводе с ледяной оболочкой из плотного льда 5 мм, в моменты времени 600, 1200, 2000 и 3100 секунд при токе 298 А и скорости плавления 0.5 мм/сек.

На рисунке 3.31 показано распределение температуры для оболочки толщиной 5 мм из плотного льда в моменты времени 600, 1200, 2000 и 3100 с. Максимальная температура (37,58 °С) достигается в проводе и оболочке с подветренной стороны, минимальная (27,61 °С) - на наветренной стороне. Нереальные положительные значения температуры оболочки объясняются тем, что процесс изменения агрегатного состояния в данном случае не учитывается, так же, как и перемещение провода относительно оболочки.

На рисунке 3.32 представлены временные диаграммы температуры в процессе плавления для шести контрольных точек (1 – правая граница провода, 2 – в ледяной оболочке на расстоянии 2 мм от поверхности провода, 3 – на расстоянии 5 мм от поверхности провода, 4 – на внешней границе

оболочки, 5 – на расстоянии 2 мм от левой стороны провода, 6 - на расстоянии 5 мм от левой стороны). Температуры в точках 1 и 2 достигают значения 0 °C через 200 с, в точках 3 и 4 - через 520 с, в точке 5 - через 780 с, в точке 6 - через 1200 с. На рисунке показан только начальный участок (до достижения температуры 5 °C); более полная картина роста температуры (до 37-39 °C), показана в таблице 3.9.

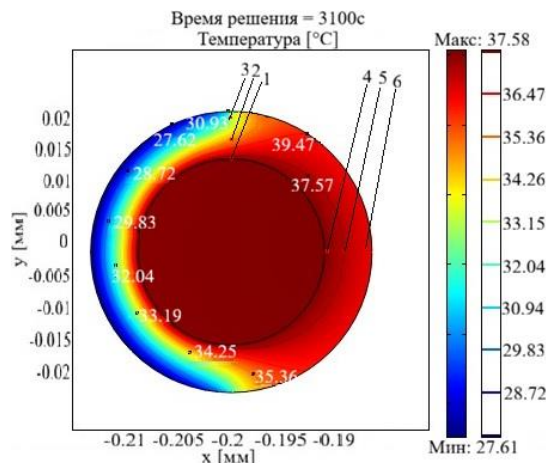


Рисунок 3.31. Распределение температуры в однородном проводе с ледяной оболочкой из плотного льда 5 мм, в момент времени 3100 секунд при токе 298 А и скорости плавления 0.5 мм/сек.

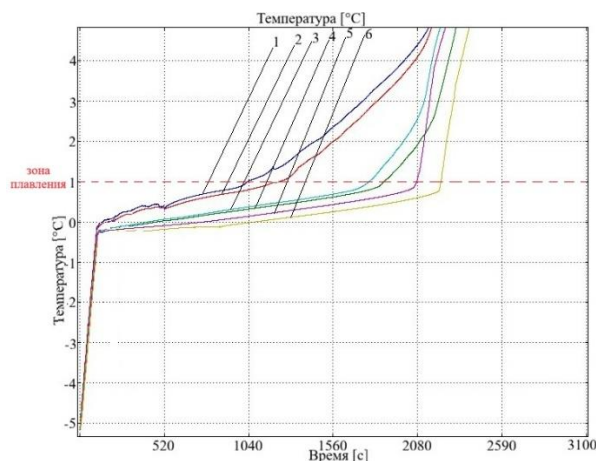


Рисунок 3.32. Диаграммы температуры для точек в ледяной оболочке на расстоянии от правой границы провода: 1 – 0 мм; 2 – 2 мм; 3 – 5 мм; 4 – 6 мм; от левой границы провода: 5 – 2 мм; 6 – 5 мм.

В таблице 3.9 приведены результаты расчета для оболочек разной толщины. Видно, что при одинаковой толщине (5 мм) плотный лёд прогревается до существенно более высокой температуры (38 °C), чем рыхлый (20 °C). С увеличением толщины оболочки (5, 10, 15 мм)

максимальная температура снижается (38, 37, 21,5 °C), а время полного проплавления растёт (3100, 4500, 5500 с).

Таблица 3.9

Влияние толщины оболочки на время плавления

<i>Толщина оболочки, [мм]</i>	<i>Состояние льда</i>	$T_{min}, [^{\circ}C]$	$T_{max}, [^{\circ}C]$	$t_{плавки}, [с]$
5	плотный	32	38	3100
5	рыхлый	16	20	3100
10	плотный	26	37	4500
15	плотный	12,5	21,5	5500

Полные массивы результатов расчетов при различных значениях скорости ветра приведены в Приложении Е (Таблицы ПЕ.2–ПЕ.5). Сравнение результатов показывает, что разница во времени проплавления плотной и рыхлой структур нелинейно зависит от толщины оболочки и интенсивности обдува. Например, при нулевой скорости при толщине 2 мм рыхлый лёд оттаивает быстрее плотного (время плавки снижается с 700 до 500 с). Однако при скорости ветра 5 м/с время плавки для обеих структур выравнивается, а при усилении обдува до 10–20 м/с рыхлая структура проплавляется медленнее плотной. Общие выявленные тенденции подтверждают, что с увеличением скорости ветра или толщины стенки муфты требуемое время плавки возрастает, а максимальная достигаемая температура снижается.

В нестационарной тепловой задаче подведённая электрическая мощность расходуется на нагрев провода и оболочки, а также на компенсацию скрытой теплоты фазового перехода «лёд-вода». Вследствие этого интегральный тепловой поток, рассеиваемый с внешней поверхности оболочки в окружающую среду, математически не равен мощности джоулевых потерь, а строго меньше неё на величину поглощенной энергии. Строгое соблюдение данного энергетического баланса, включая учет скрытой теплоты плавления, автоматически обеспечивается решателем программного комплекса COMSOL Multiphysics на каждом временном шаге с использованием метода эффективной теплоемкости.

Выполненный анализ выявил существенные различия в динамике оттаивания рыхлой и плотной структур. Как было установлено в параграфе 3.4, образующаяся при плавлении изморози воздушная прослойка выступает в роли внутреннего теплоизолятора. В сочетании с интенсивным боковым ветром, охлаждающим внешнюю границу, это приводит к тому, что процесс сквозного проплавления рыхлой оболочки существенно замедляется по сравнению с плотным льдом. Это подтверждает вывод о том, что интенсивность конвективного теплообмена является определяющим параметром, от которого зависит успешность и время плавки. Для минимизации расчетной погрешности и перехода от усредненных коэффициентов теплообмена к уточненным локальным значениям далее применяется сопряженная термогидродинамическая модель аэродинамического обтекания провода, математическое описание которой была представлено в параграфе 2.4 Главы 2.

3.6. Моделирование термогидродинамических процессов в воздушной среде в системе плавки гололёда на проводах линии электропередачи

Целью данного параграфа является исследование термогидродинамических процессов в системе «провод – ледяная оболочка – окружающая среда» для уточнения параметров плавки гололеда на проводах линий электропередачи и обоснования методики расчета конвективного теплообмена с минимальной вычислительной погрешностью.

Решение поставленной задачи достигается путем вычисления тепловых потоков с внешней поверхности ледяной оболочки при различных погодных условиях и нахождения мощности тепловыделения в проводе, достаточной для его полного очищения от льда.

Модель объединяет тепловую и гидродинамическую задачи для трёх сред: воздух, сталеалюминевый провод, ледяная оболочка. Для всех сред заданы плотность и динамическая вязкость; в тепловой задаче дополнительно — теплопроводность, теплоёмкость и мощность тепловыделения в проводе. Задача решается в стационарном режиме.

Для решения сопряженной термогидродинамической задачи применялись расчетные модули программного комплекса COMSOL Multiphysics: модуль теплопередачи (Heat Transfer) и модуль течения слабосжимаемой жидкости (Weakly Compressible Navier-Stokes).

Коэффициент теплообмена рассчитывается с учетом геометрических размеров проводника и ледяной оболочки. Результаты вычислений по формулам (2.11) – (2.15) для провода АС-50/8 (диаметр с оболочкой 20 мм, температура $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$) приведены на диаграммах рисунка 3.3.

Базовые параметры для расчета: сечение провода $50,26\text{ мм}^2$, диаметр провода $0,008\text{ м}$, диаметр оболочки $0,02\text{ м}$, мощность $5,026\text{ Вт}$ (при длительно-допустимом токе). Физические свойства заданы при температуре $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Параметры воздуха приняты по физическому справочнику [89-90]: динамическая вязкость $\mu = 1,7 \cdot 10^{-5}\text{ Па}\cdot\text{с}$, плотность воздуха $\rho = 1,318\text{ кг/м}^3$, коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,024\text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$. Расчёты выполнены для значений скорости ветра от 1 до 10 м/с. Критерий Рейнольдса Re для каждого режима рассчитан аналитически (таблица 3.10).

Для провода и ледяной оболочки в гидродинамическом модуле задано граничное условие «неподвижная стенка» (No Slip) и вязкость принята равной $100\text{ Па}\cdot\text{с}$. Данное условие исключает влияние твердых тел на кинематику потока внутри самих областей, обеспечивая формирование корректного пограничного слоя на границе раздела сред и устойчивость вычислительного процесса гидродинамической задачи.

Таблица 3.10

Расчетные значения параметров при различных скоростях ветра

$v, \text{ м / с}$	марка провода	$d, \text{ мм}$	Re	Nu	$\alpha_{ан}, \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{°C)}$
1	АС-50/8	0,02	1551	20,11	24,13
5			7606	52,22	62,67
10			15180	79,04	94,85

При использовании стационарной термогидродинамической модели наблюдались отклонения в балансе между мощностью тепловыделения в проводе и суммарным тепловым потоком с поверхности оболочки. Погрешность рассчитывалась как $\varepsilon = 100 \cdot (Q_{\text{сум}} - P) / P$ относительно интегрального значения мощности тепловыделения в проводе $P = 5,026 \text{ Вт}$.

Для сокращения вычислительных ресурсов использовался алгоритм раздельного (Segregated) поочередного решения тепловой и гидродинамической задач. Данный метод сокращает время расчета, требует контроля сходимости для минимизации вычислительной погрешности.

На рисунках 3.32, 3.33 представлены распределения температуры при скорости ветра 1 и 10 м/с, из которых видно, что тепловой шлейф наблюдается в виде узкой полосы.

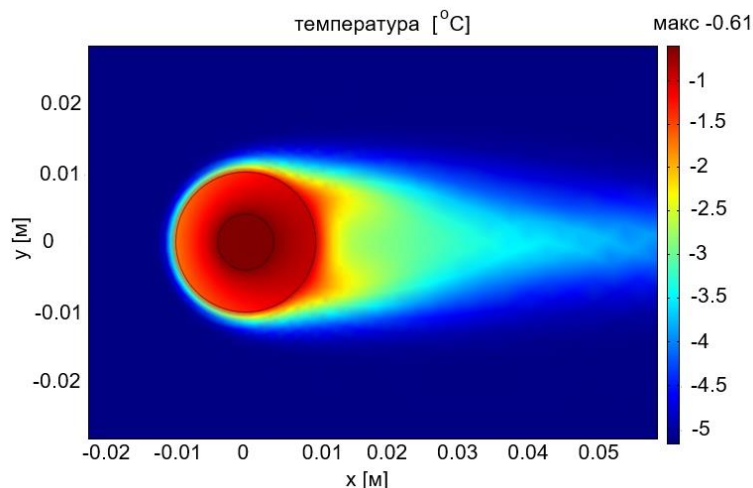


Рисунок 3.32. Распределение температуры при скорости ветра 1 м/с при ламинарном характере движения.

Коэффициенты конвективного теплообмена определены по результатам термогидродинамического расчёта с разбиением периметра

ледяной оболочки на четыре сектора. Интегрирование векторных величин (например, теплового потока) по всем секторам сразу даёт результат, близкий к нулю, поэтому расчёт выполнялся отдельно для каждого участка с последующим суммированием с учётом знаков чисел.

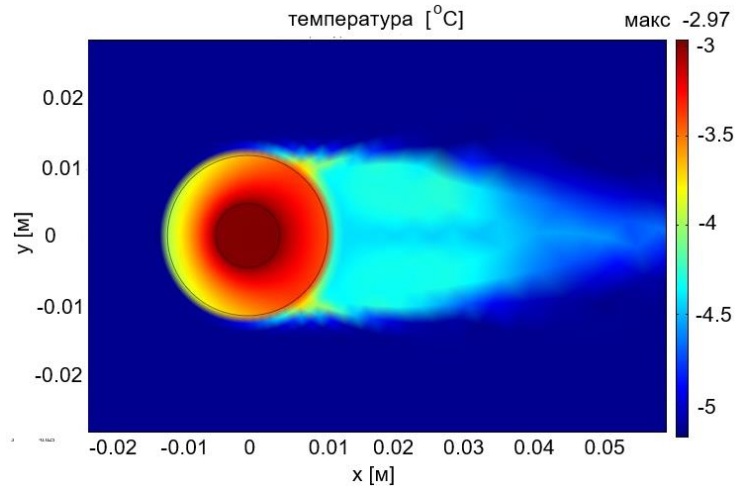


Рисунок 3.33. Распределение температуры при скорости ветра 10 м/с при турбулентном характере движения.

При расчетах задано движение воздушного потока слева направо. Поэтому два сектора - левый верхний и левый нижний – испытывают большее воздействие, чем два сектора, находящиеся с правой стороны провода. Значения средних значений тепловых потоков и температуры могут быть определены через специальные процедуры при численном решении, а также вручную при обработке диаграмм температуры и плотности теплового потока по линии окружности. Для выявления особенностей теплообмена между поверхностью ледяной оболочки и движущимся воздухом отдельно рассчитаны значения для левой и правой стороны поверхности.

Площадь боковой поверхности половины ледяной оболочки (при длине 1 м) составляет:

$$S_{\delta} = \pi \frac{d}{2} L_{np} = 0.0314 \text{ м}^2 \quad (3.3)$$

Тепловые потоки на левой и правой дугах внешней поверхности ледяной оболочки определены интегрированием величин по длине дуги с использованием встроенной процедуры.

$$Q_{инт} = \int_0^{L_D} q(x) dx. \quad (3.4)$$

Для определения коэффициента теплообмена нужно определить температуру поверхности. Для этого выполняется интегрирование распределения температуры на дуге линии поверхности с последующим делением результата на длину дуги.

$$T_{инт} = \frac{4}{\pi D} \int_0^{\pi/2} T(x) dx. \quad (3.5)$$

Интегрирование выполняется для длины дуги L_D , соответствующей четверти окружности внешней поверхности ледяной оболочки. Альтернативный способ предполагает разбиение дуги на небольшие участки, определение средней плотности теплового потока и умножение на L_D .

$$q_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N q_n; \quad (3.6)$$

$$Q_{cp} = q_{cp} \frac{\pi D}{4}. \quad (3.7)$$

Аналогичная процедура используется при определении средней температуры на поверхности ледяной оболочки.

$$T_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N T_n. \quad (3.8)$$

Значения тепловых потоков, определяемые с помощью двух способов расчета, совпадают с небольшими отклонениями, и можно принять

$$Q_{инт} = Q_{cp}. \quad (3.9)$$

Далее будем обозначать эти величины, как интегральные, с указанием стороны дуги – левая или правая.

$$Q_{инт}^l = 3.87 \text{ Вт}, \quad Q_{инт}^r = 1.234 \text{ Вт}.$$

Суммарное значение теплового потока с поверхности ледяной оболочки составляет $Q_{сум} = 5.26 \text{ Вт}$.

По результатам обработки диаграмм с разбиением на участки определены средние значения температуры поверхности и плотности теплового потока, зафиксированные в 8 дискретных контрольных точках на поверхности оболочки. Результаты приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11

Расчетные значения температуры и плотности теплового потока при разбиении
линии окружности на участки при скорости ветра 1 м/с

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_n^l, ^\circ C$	-1.68	-1.66	-1.62	-1.56	-1.53	-1.46	-1.4	-1.33
$T_n^r, ^\circ C$	-1.25	-1.16	-1.1	-1.03	-0.96	-0.93	-0.91	-0.9
$q_n^l, Bm / m^2$	148	145	136	130	120	110	104	94
$q_n^r, Bm / m^2$	79	61	45	30	20	20	28	31

В таблице принято: T_n^l - интегральная температура левой дуги; T_n^r - интегральная температура правой дуги; q_n^l - интегральная по длине плотность теплового потока левой дуги; q_n^r - интегральная по длине плотность теплового потока правой дуги.

По формулам (3.6) и (3.8) определены средние температуры и плотности теплового потока на левой и правой дугах, затем вычислены соответствующие коэффициенты конвективного теплообмена.

$$\alpha = \frac{q_{cp}}{T_{cp} - T_{oc}}. \quad (3.10)$$

При средних значениях температуры на левой и правой дугах $T_{cp}^l = -1.53 ^\circ C$ и $T_{cp}^r = -1.03 ^\circ C$ найдены значения коэффициентов теплообмена: для левой верхней дуги: $\alpha = 35.6 Bm / (m^2 \cdot ^\circ C)$; для правой верхней дуги: $\alpha = 9.6 Bm / (m^2 \cdot ^\circ C)$; среднее значение $\alpha = 22.6 Bm / (m^2 \cdot ^\circ C)$.

По методике расчета коэффициентов теплообмена [51] при температуре $-5 ^\circ C$ и скорости ветра 1 м/с коэффициент теплообмена составляет 24,135 Вт/(м²·К). Расхождение с численным расчётом - 6,7 %.

Аналогичные расчёты выполнены для скоростей ветра 5 и 10 м/с. Построены диаграммы распределения плотности теплового потока и температуры вдоль дуги (рисунки 3.34 и 3.35).

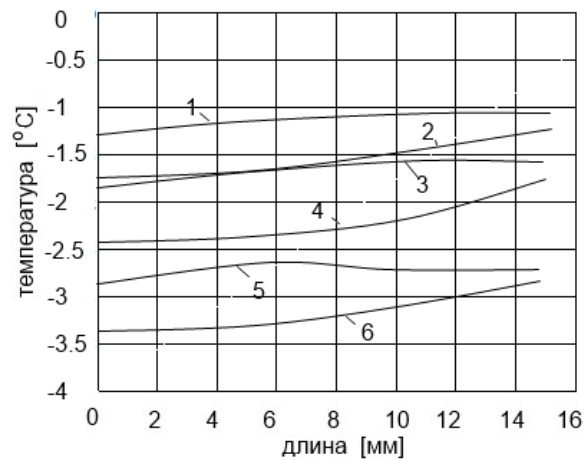


Рисунок 3.34. Диаграммы температуры на поверхности провода при скорости ветра левая верхняя дуга: 1 - 1 м/с; 3 - 5 м/с; 5 - 10 м/с; правая верхняя дуга: 2 - 1 м/с; 4 - 5 м/с; 6 - 10 м/с.

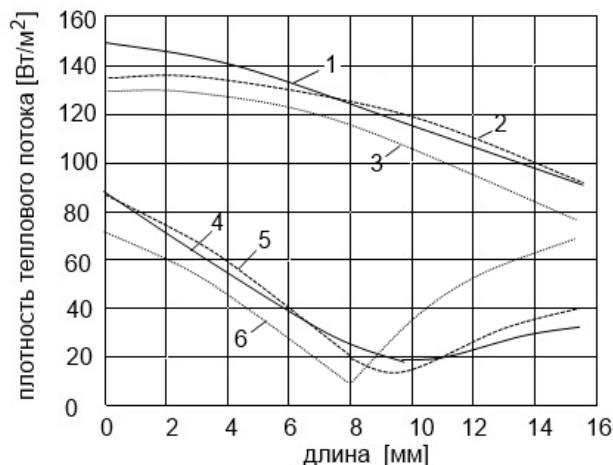


Рисунок 3.35. Диаграммы плотности теплового потока на поверхности провода при скорости ветра левая верхняя дуга: 1 - 1 м/с; 2 - 5 м/с; 3 - 10 м/с; правая верхняя дуга: 4 - 1 м/с; 5 - 5 м/с; 6 - 10 м/с.

При скорости ветра 5 м/с тепловые потоки: на левой дуге $Q_{инт}^l = 3,638 \text{ Вт}$, на правой дуге $Q_{инт}^r = 1,322 \text{ Вт}$; суммарное значение $Q_{\Sigma} = 4.96 \text{ Вт}$.

При скорости 10 м/с: на левой дуге - $Q_{инт}^l = 3,79 \text{ Вт}$, на правой дуге $Q_{инт}^r = 1,33 \text{ Вт}$; Суммарное значение $Q_{\Sigma} = 5.12 \text{ Вт}$.

Средние температуры и плотности теплового потока определены по участкам диаграмм; результаты приведены в таблицах 3.12 и 3.13.

Таблица 3.12

Расчетные значения температуры и плотности теплового потока при разбиении линии окружности на участки при скорости ветра 5 м/с

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_n^l, ^\circ C$	-2.38	-2.35	-2.31	-2.24	-2.16	-2.07	-1.96	-1.85
$T_n^r, ^\circ C$	-1.8	-1.73	-1.65	-1.6	-1.54	-1.5	-1.49	-1.48
$q_n^l, Bm / m^2$	135	135	132	130	122	114	105	93
$q_n^r, Bm / m^2$	80	65	48	30	16	27	34	39

По данным таблицы 3.12 определены: средняя температура левой дуги $T_{cp}^l = -2.165^\circ C$, правой дуги $T_{cp}^r = -1.599^\circ C$; коэффициенты теплообмена: для левой дуги $\alpha = 42.6 Bm / m^2 \cdot ^\circ C$, для правой $\alpha = 12.6 Bm / m^2 \cdot ^\circ C$ Средний коэффициент по всей поверхности $\alpha = 27.6 Bm / m^2 \cdot ^\circ C$.

Таблица 3.13

Расчетные значения температуры и плотности теплового потока при разбиении линии окружности на участки при скорости ветра 10 м/с

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_n^l, ^\circ C$	-3.29	-3.26	-3.2	-3.14	-3.06	-3.01	-2.94	-2.86
$T_n^r, ^\circ C$	-2.76	-2.67	-2.61	-2.58	-2.6	-2.61	-2.63	-2.64
$q_n^l, Bm / m^2$	134	135	131	125	115	108	93	82
$q_n^r, Bm / m^2$	72	48	23	15	34	50	59	67

По аналитической методике расчет коэффициента теплообмена [53] дает значение $47.16 Bm / m^2 \cdot ^\circ C$, что на 70,8% выше среднего значения численного расчета. Коэффициент теплообмена, определенный аналитически, превышает даже максимальное значение, найденное при численном расчете. Данное расхождение объясняется ограничениями эмпирических критериальных формул, которые изначально выведены для идеальных гладких цилиндров и не способны корректно учесть сложную

гидродинамику турбулентного следа (отрыв пограничного слоя, вихреобразование) на подветренной стороне реального обледенелого провода. При малой скорости воздуха критерий Рейнольдса соответствует ламинарному режиму движения.

По значениям из таблицы 3.13 определены: средняя температура левой дуги $T_{cp}^l = -3.21^\circ\text{C}$, правой - $T_{cp}^r = -2.7^\circ\text{C}$; коэффициенты теплообмена: для левой дуги $\alpha = 67.45 \text{ Bm} / \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, для правой $\alpha = 18.5 \text{ Bm} / \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Средний коэффициент по всей поверхности $\alpha = 43 \text{ Bm} / \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Полученные значения существенно расходятся с рассчитанными по аналитической методике с помощью критериев Рейнольдса и Нуссельта. Для сравнения приведён альтернативный расчёт средствами Comsol. Средняя температура дуги определяется интегрированием по линии с последующим делением на длину дуги.

$$T_{cp} = \frac{4}{\pi D} \int_0^{\pi/2} T(x) dx. \quad (3.11)$$

Коэффициент конвективного теплообмена рассчитывается по той же формуле, но с использованием немодифицированного значения теплового потока с поверхности ледяной оболочки.

$$\alpha = \frac{Q}{(T - T_c) S_{бок}}. \quad (3.12)$$

Здесь площадь боковой поверхности ледяной оболочки определяется для сектора углом 90 градусов $S_{бок} = \pi DL / 4 = 0.015708 \text{ m}^2$. Результаты расчета сведены в таблицу 3.14.

Таблица 3.14

Расчетные значения параметров процесса теплообмена средствами Comsol

№	v, м/с	T_{cp}^l , °C	T_{cp}^r , °C	Q^l , Bm	Q^r , Bm	Q_Σ , Bm	α^l , $\frac{\text{Bm}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$	α^r , $\frac{\text{Bm}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$	$\alpha_{cp.1}$, $\frac{\text{Bm}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$	$\alpha_{ан}$, $\frac{\text{Bm}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$	ε_α , %
1	1	273.8	274.4	4	1.2	5.2	21.9	5.99	13.9	24.1	-9.2
2	5	271	271.6	3.73	1.26	4.97	37.7	11.1	24.4	63.4	-40
3	10	270.1	270.5	3.66	1.47	5.11	50.95	18.5	34.7	96	-47

В таблице принято: v - скорость набегающего ветрового потока; T_{cp}^l и T_{cp}^r - средняя температура левой (наветренной) и правой (подветренной) дуг соответственно; Q^l, Q^r - мощность конвективного теплообмена (тепловой поток) с левой и правой дуг; Q_{Σ} - суммарная отводимая тепловая мощность; α^l, α^r - коэффициенты теплообмена для левой и правой дуг; $\alpha_{cp.1}$ - среднее значение коэффициента конвективного теплообмена, найденное при использовании стандартных средств Comsol; α_{an} - аналитическое значение коэффициента теплообмена (по критериальным уравнениям); ε_{α} - относительная погрешность аналитического расчета по сравнению с численным.

Для сопоставления результатов расчета коэффициента конвективного теплообмена, найденных разными способами, все полученные значения представлены в таблице 3.15.

Таблица 3.15

Расчетные значения параметров процесса теплообмена средствами Comsol с разбиением дуги окружности ледяной оболочки

№	v , м/с	Q^l , Вт	Q^r , Вт	Q_{Σ} , Вт	$\frac{\alpha^l,}{Bm}$ $\frac{1}{m^2 \cdot ^\circ C}$	$\frac{\alpha^r,}{Bm}$ $\frac{1}{m^2 \cdot ^\circ C}$	$\frac{\alpha_{cp.2},}{Bm}$ $\frac{1}{m^2 \cdot ^\circ C}$	$\frac{\alpha_{cp.1},}{Bm}$ $\frac{1}{m^2 \cdot ^\circ C}$	$\frac{\alpha_{an},}{Bm}$ $\frac{1}{m^2 \cdot ^\circ C}$
1	1	3.87	1.23	5.1	35.6	9.94	22.7	13.9	24.1
2	5	3.64	1.32	4.96	42.6	12.6	27.6	24.4	63.4
3	10	3.79	1.33	5.09	67.45	18.5	42.98	34.7	96

В таблице принято: v - скорость ветра; Q^l, Q^r - мощность конвективного теплообмена (тепловой поток) на левой и правой дугах; Q_{Σ} - суммарная отводимая тепловая мощность; α^l, α^r - коэффициенты теплообмена для левой и правой дуг; $\alpha_{cp.1}, \alpha_{cp.2}$ - средние коэффициенты теплообмена, рассчитанные различными численными методами (среднее значение коэффициента конвективного теплообмена, найденное при использовании стандартных средств Comsol и средний коэффициент

теплообмена, найденный при разбиении дуги на участки); $\alpha_{ан}$ - аналитическое значение коэффициента теплообмена (по критериальным выражениям).

Значения коэффициентов конвективного теплообмена, полученные тремя способами (аналитическим расчетом по критериальным уравнениям, интегральным и дискретным численным суммированием), имеют существенные расхождения. Проведение натурного физического эксперимента для апробирования затруднено из-за малых геометрических размеров оболочки и неизбежного искажения температурного поля, вносимого датчиками. В связи с этим основным инструментом исследования остается численное моделирование, требующее тонкой настройки параметров гидродинамической задачи для корректного описания турбулентного пограничного слоя.

Проведенное исследование разных способов определения коэффициента конвективного теплообмена между поверхностью проводов и воздушным потоком показало значительное влияние скорости ветра не только на величину коэффициента теплообмена, но и на возможность использования упрощенных процедур расчета тепловых процессов в системе «воздушная среда – ледяная оболочка – провод». При малой скорости ветра (1 м/с) использование формул для расчета коэффициента теплообмена приводит к допустимым значениям погрешности (менее 10%). При увеличении скорости до 5 м/с и более приводит к значительному ухудшению точности расчетов. Погрешность возрастает до десятков процентов.

Использование таких усредненных и завышенных граничных условий при расчете системы «ледяная оболочка – провод» вносит значительную вычислительную ошибку. В условиях ограниченного резерва мощности тепловыделения некорректно заданный конвективный отвод тепла может привести к ошибочному выводу об успешности процесса плавки. Таким образом, предварительный расчет термогидродинамических процессов является строго необходимым этапом. Только после численного определения

коэффициентов теплообмена при различных параметрах обледенения и скорости ветра можно переходить к основной тепловой задаче — расчету времени разрушения муфты.

Как подтверждают данные численного моделирования средствами COMSOL (Таблица 3.13), относительная погрешность аналитического расчета нелинейно возрастает с увеличением скорости ветра: от 9,2 % при 1 м/с до 47 % при 10 м/с. Расчеты с применением метода разбиения дуги на участки (Таблица 3.14) также демонстрируют кратные расхождения между усредненными аналитическими и уточненными коэффициентами.

Расчет термогидродинамических процессов в системе «провод – воздух» показывает, что упрощенные аналитические формулы сильно завышают теплообмен на подветренной стороне. Использование в расчетах уточненных коэффициентов конвективного теплообмена позволило добиться снижения погрешности моделирования теплового процесса.

Теперь, опираясь на корректные данные о времени гарантированного разрушения льда (параграф 3.2-3.5), необходимо оценить безопасность самого режима плавки для проводов. Важно подтвердить, не приведут ли протекающие по линии расчетные токи к недопустимому перегреву провода на участках, уже освобожденных от ледяной муфты.

3.7. Моделирование теплового состояния провода после сброса ледяной оболочки в режиме протекания тока плавки

Задачей данного параграфа является оценка теплового состояния участков провода, первыми освободившихся от ледяной оболочки в процессе плавки, для предотвращения их термического повреждения и подтверждения безопасности выбранных токовых режимов.

При неравномерном проплавлении ледяной оболочки на проводе могут возникать участки, полностью освобождённые ото льда. На таких участках

теплоотвод в окружающую среду ухудшается (из-за меньшего диаметра провода и отсутствия теплоизолирующего слоя льда), что может привести к локальному перегреву. Поэтому необходимо оценить температуру голого провода в режимах, соответствующих работе системы плавки, и убедиться, что она не превышает допустимых $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (паспортное значение для провода АС-50/8) [96].

Для голого провода АС-50/8 выполнено моделирование нагрева при скоростях ветра 5-20 м/с и температурах окружающей среды $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Рассмотрены четыре режима тепловыделения:
 $P = 13,22\text{ Вт/м}$, $I = 0,5 \cdot I_{\text{до}} = 105\text{ А}$ (режим уменьшенного тока);
 $P = 26,45\text{ Вт/м}$, $I = I_{\text{до}} = 210\text{ А}$ (режим длительно-допустимого тока);
 $P = 52,90\text{ Вт/м}$, $I = I_p = 298 \cdot I_{\text{до}} = 298\text{ А}$ (режим расчетного тока плавки); $P = 104,85\text{ Вт/м}$, $I = 2 \cdot I_{\text{до}} = 420\text{ А}$ (режим удвоенного длительно-допустимого тока приведён для оценки запаса).

Для провода АС-50/8 при скоростях ветра 5–20 м/с коэффициенты конвективного теплообмена, рассчитанные через критерии Рейнольдса и Нуссельта, приведены в таблице 3.16 (выражения 2.11 – 2.15).

Таблица 3.16

Расчетные значения критериев и коэффициентов конвективного теплообмена при разной скорости ветра для провода АС-50/8

$\nu, \text{ м/с}$	$d_{np}, \text{ м}$	Pr	Re	Nu	$\frac{\alpha, \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$
$t_{окр.ср.} = -5^\circ\text{C}$					
5	0,0096	0,725	3721,4	30,1	74,0
10			7442,8	45,6	112,2
15			11164,2	58,2	143,1
20			14855,6	69,2	170,0
$t_{окр.ср.} = -10^\circ\text{C}$					
5	0,0096	0,714	3857,2	30,6	75,2
10			7714,5	46,3	113,9
15			11571,7	59,1	145,3
20			15429,0	70,2	172,7

На рисунке 3.36 показано распределение температуры в однородном проводе без ледяной оболочки при нагреве длительно-допустимом током $I_{\text{дд}}=210$ А, температуре окружающей среды -5 °С и скорости ветра 5 м/с в момент времени 5000 с.

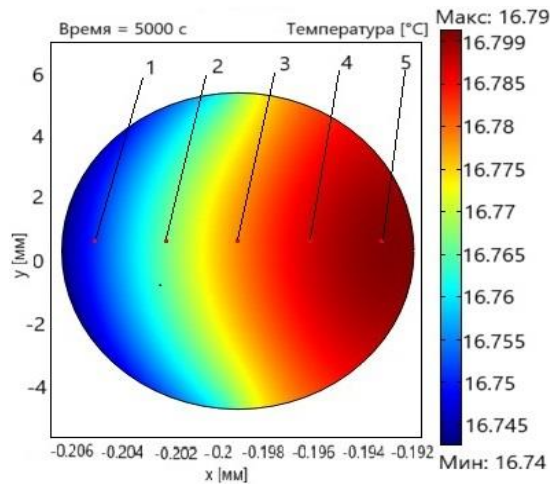


Рисунок 3.36. Распределение температуры в однородном проводе, температура окружающей среды -5 °С.

На рисунке 3.37 приведены временные диаграммы температуры в пяти характерных точках (на радиальном расстоянии 1,5; 4; 5; 7 и 8,5 мм от центра провода). На начальном участке (до 900 с) температура быстро растёт от 0 до $16,5$ °С. В интервале 900–2200 с температура продолжает медленно увеличиваться, достигая $16,65$ °С к 2200 с. После этого (до момента времени 5000 с) температура остаётся практически постоянной (наступает установившийся режим).

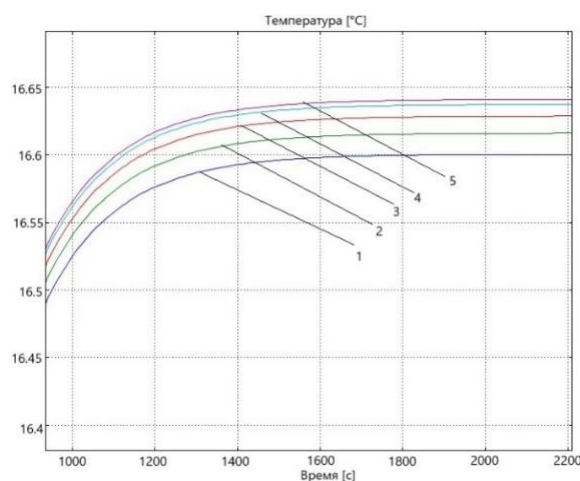


Рисунок 3.37. Диаграммы температуры от времени в точках на расстоянии от поверхности: 1 – 1.5 мм, 2 – 4 мм, 3 – 5 мм, 4 – 7 мм, 5 – 8.5 мм (по диаметру провода).

Графики для разных точек визуально почти совпадают; радиальные различия видны только при сильном масштабировании. Установившееся значение температуры провода составляет 16,8 °C. Время достижения установившегося теплового состояния (около 900 с) свидетельствует о сравнительно малой тепловой инерции голого провода.

Полные результаты моделирования нагрева голого провода для всех режимов, скоростей ветра (5–20 м/с) и температур окружающей среды (-5 °C, -10 °C) приведены в Приложении Ж (Таблицы ПЖ.1–ПЖ.4).

Режим уменьшенного тока (Таблица ПЖ.1): при скорости ветра 5 м/с и температуре -5 °C температура провода достигает 5,9 °C; при -10 °C она составляет 0,74 °C. При увеличении скорости ветра температура снижается и при 15–20 м/с становится отрицательной. Следовательно, профилактический подогрев эффективен только при ветре до 10 м/с и температуре окружающего воздуха не ниже -10 °C.

Режим длительно-допустимого тока (Таблица ПЖ.2): при температуре воздуха -5 °C и скорости ветра 5 м/с температура провода составляет 16,8 °C; при температуре воздуха -10 °C температура провода составляет 11,5 °C. Температура остаётся положительной в диапазоне скоростей ветра 5–15 м/с. При скорости ветра 20 м/с температура становится отрицательной,

следовательно, в качестве режима предупреждения обледенения он эффективен при скоростях ветра до 15 м/с.

Режим удвоенного длительно-допустимого тока (Таблица ПЖ.3): при температуре воздуха $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скорости ветра 5 м/с температура достигает $81,4\text{ }^{\circ}\text{C}$; при температуре воздуха $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скорости ветра 5 м/с температура провода равна $75,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это максимальные зафиксированные значения, однако они остаются ниже критической отметки. Данный режим является избыточным по мощности и не рекомендуется для длительного применения, но его анализ математически подтверждает наличие запаса по температуре.

Режим расчетного тока плавки (Таблица ПЖ.4): при температуре воздуха $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скорости ветра 5 м/с температура провода достигает $38,6\text{ }^{\circ}\text{C}$; при температуре воздуха $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ скорости ветра 5 м/с температура провода равна $32,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. С ростом скорости ветра потери тепла увеличиваются, и температура снижается (при 20 м/с температура провода составляет $14,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ при температуре воздуха $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и составляет $9,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ при температуре воздуха $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$), оставаясь положительной во всех рассмотренных случаях.

Во всех рассмотренных режимах температура голого провода не превышает $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, что подтверждает безопасность выбранных параметров для работы системы плавки (в том числе на участках, освободившихся ото льда).

Таким образом, использование выбранных режимов для плавки гололёда не приводит к перегреву провода на участках, освободившихся ото льда. Режим при $P_{\text{ног}} = 52,90\text{ Вт} / \text{м}$, $I_p = 298\text{ А}$ обеспечивает достаточный нагрев для плавки и безопасен для провода. Моделирование позволило определить время выхода на стационарный режим и средние температуры. Выбор режима позволяет сократить энергозатраты и проводить профилактический нагрев без риска для провода.

Обобщая полученные результаты численного моделирования (параграфы 3.1-3.8), завершением исследования является переход к формированию детализированных алгоритмов (методик) моделирования

тепловых и термогидродинамических процессов. Данные методики, включающие описание исходных параметров, настроек решателей и процедур обработки результатов, вынесены в Приложение 3 (3.1 и 3.2) и пригодны для непосредственного использования в проектной практике для расчета режимов плавки.

3.8. Верификация результатов компьютерного моделирования и сопоставление с данными независимых исследований

Адекватность разработанных цифровых моделей в среде COMSOL Multiphysics подтверждается сходимостью полученных результатов с параметрами независимых физических и натурных экспериментов, опубликованных в современной профильной литературе, а также с нормативными графиками отраслевых руководящих документов.

Согласно проведенному комплексному моделированию для провода АС-50/8, расчетный ток плавки 298 А (при погонной мощности тепловыделения 52,9 Вт/м) обеспечивает удаление ледяной оболочки за 1–1,5 часа при наихудших условиях: скорости ветра 20 м/с и температуре -10 °С.

Полученные в модели токовые режимы (298–420 А) полностью верифицируются таблицами отраслевого стандарта РД 34.20.512 (СО 153-34.20.512) [87]. Согласно нормативной таблице допустимых токов плавки для провода АС-50, при температуре -10 °С требуемый ток составляет 416 А (при эквивалентной скорости обдува 2 м/с) и 490 А (при обдуве 4 м/с) [87]. Расчетный максимальный ток плавки (420 А) строго укладывается в данный нормативный физический диапазон.

Кроме того, высокая физическая точность тепловой модели COMSOL подтверждается совпадением с графиками нагрева голого провода [87]. Согласно нормативной кривой, протекание тока свыше 400 А по неизолированному проводу АС-50 приводит к его нагреву до предельных 90

°С менее чем за 300 секунд. Проведенное компьютерное моделирование дало идентичный результат: при токе 420 А и отсутствии ледяной муфты провод быстро достигает критических температур, что доказывает адекватность модели и требует строгого контроля времени плавки.

Особого внимания заслуживает сопоставление динамики времени плавки с расширенными номограммами РД 34.20.512 для монолитного гололеда (плотность 0,9 г/см³). На нормативных графиках зафиксирована жесткая нелинейная зависимость времени таяния от конвективного охлаждения [87]. В частности, для муфты с внешним диаметром 30 мм при температуре -10 °С и токе порядка 300 А время плавки при скорости ветра 5 м/с составляет около 10 минут [87]. Однако при увеличении скорости ветра до 15 м/с кривая времени плавки масштабируется, и время воздействия возрастает до 35–40 минут [87].

С учетом данной зависимости, дальнейшее увеличение скорости ветра до значений 20 м/с, смоделированное в среде COMSOL, физически обоснованно смещает необходимое время плавки в диапазон 50–90 минут. Таким образом, компьютерная модель с допустимой погрешностью воспроизводит закономерности, заложенные в отраслевых стандартах для плотного льда.

Также, данные результаты согласуются с утверждениями В.Р. Меладзе и Е.В. Стрикаловой, что для расплавления муфты ток должен в 1,5–2 раза превышать длительно допустимый рабочий ток при времени воздействия около 1 часа [74]. В исследованиях И.И. Бандурина, И.Н. Козырева и др. [95] утверждается, что для неизолированных проводов сетей 6–35 кВ в зимний период характерна низкая токовая загрузка, из-за чего температура провода равна температуре среды (-5...+5 °С), создавая идеальные условия для обледенения. Рассматривалась система профилактического подогрева с проводом АС-50 и током до 330 А при допустимой потере напряжения 500В. При этом сборка классической схемы плавки переменным током путем оперативных переключений занимает 6–7 часов, что в условиях быстро

развивающегося циклона недопустимо долго. Расчетный ток 298 А и время плавки находятся в допустимом соответствии с исследованиями указанных авторов.

Точность математической модели проплавления сопоставима с физическим экспериментом К.С. Егорова и С.И. Каськова: в опытах авторов, при токе 350 А и температуре воздуха -7°C фактическое время плавки для провода АС-95/16 составило 46 минут [94]. Полученный временной диапазон (1–1,5 часа) для провода меньшего сечения, но при ветровом охлаждении до 20 м/с, физически обоснован и доказывает сходимость результатов тепловых расчетов в COMSOL.

3.9. Выводы по главе 3

- Комплексное компьютерное моделирование подтвердило и позволило детально исследовать физические процессы, протекающие при плавке гололеда на проводах ЛЭП.
- Сравнение результатов численных расчетов мощности тепловыделения в многопроволочных проводах с аналитическими решениями, полученными во второй главе, а также с паспортными характеристиками проводов показало малую погрешность. Расхождение расчётных мощностей тепловыделения с табличными данными составило 1,85 % (*при $I_{\text{до}}$*) и 1,29 % (*при $2I_{\text{до}}$*) (таблица 3.4).
- Установлены закономерности процесса плавления гололеда на проводах и влияние перемещения оболочки в процессе плавки на распределение температуры и время освобождения провода от ледяной оболочки. Получены количественные зависимости времени разогрева и полного проплавления ледяной оболочки от её толщины, температуры

воздуха и скорости ветра (Таблицы ПБ.1–ПБ.3, ПВ.1–ПВ.4, ПГ.1–ПГ.4, ПД.1–ПД.4, ПЕ.1–ПЕ.4).

- Определены параметры системы плавки для наихудших погодных условий. При температуре воздуха $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорости ветра 20 м/с и толщина стенки ледяной оболочки 20 мм установлен расчетный ток плавки -298 А для провода АС-50 (при погонной мощности тепловыделения $52,9\text{ Вт/м}$). Время плавки составляет $1\text{--}1,5$ часа.

- Обоснована термическая безопасность голых участков провода, первыми освободившихся ото льда. Показано, что при расчетном токе плавки $I = I_{\text{ДД}} \cdot 1,4$ и скорости ветра более 5 м/с установившаяся температура не превышает предельно допустимого значения $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Таблицы ПЖ.1–ПЖ.4). Риск перегрева возникает только при режимах с удвоенный током плавки в сочетании со слабым ветром ($\leq 5\text{ м/с}$), что требует строгого контроля времени нагрева.

- Доказана необходимость термогидродинамического моделирования. Сопряженное моделирование воздушного потока ($k-\varepsilon$ модель турбулентности, скорости ветра $1\text{--}20\text{ м/с}$) выявило, что аналитический расчет коэффициента конвективного теплообмена α по классическим критериальным формулам дает погрешность от 9% до 47% (при скорости ветра 5 м/с) из-за завышения теплообмена с подветренной стороны (параграф 3.6). Это полностью обосновывает отказ от упрощенных формул в пользу численных методов.

- Сформирована инженерно-методическая база (Приложение И, И.1, И.2). Разработанные и апробированные методики моделирования тепловых и термогидродинамических процессов создают надежную научно-обоснованную базу для проектирования систем плавки гололёда. Они позволяют рационально выбирать токовые режимы, минимизировать время плавки и энергозатраты, а также формулировать точные требования к силовому оборудованию.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНИИ 10 КВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕЖИМА ПЛАВКИ

Для практической реализации разработанного метода плавки гололеда без отключения потребителей необходимо решить ряд взаимосвязанных электротехнических задач: обеспечить требуемую мощность тепловыделения, минимизировать потери энергии, а также сохранить нормативное качество напряжения у конечных потребителей. В данной главе обосновывается аппаратная схема комплекса и определяются параметры режимов его работы, гарантирующие надежность функционирования распределительной сети 10 кВ.

4.1. Исследование параметров системы плавки гололёда

Главный принцип работы предлагаемой системы заключается в искусственном увеличении токовой нагрузки на линию для достижения требуемой мощности тепловыделения. Для повышения тепловыделения линия дополнительно загружается реактивным током с помощью нагрузочного реактора (L) в конце линии. Ток плавки складывается из тока нагрузки и тока реактора. В начале линии устанавливается регулируемая конденсаторная батарея (C_1), компенсирующая реактивную мощность и разгружающая трансформатор от индуктивного тока [99].

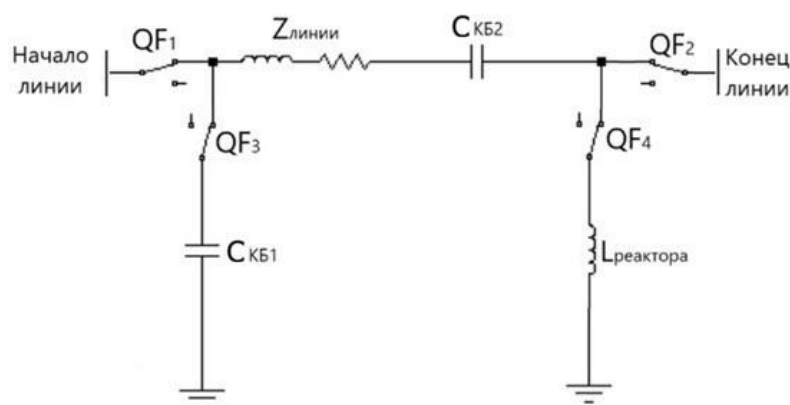


Рисунок 4.1. Упрощенная схема системы плавки гололёда на проводах ЛЭП 10 кВ на линии потребителя. QF₁-QF₄ – коммутационные аппараты; C_{КБ1-2} – конденсаторные батареи; L_{реактора} – нагрузочный реактор.

При значительном росте тока возникает недопустимое падение напряжения в конце линии. Для решения этой проблемы - для его компенсации, последовательно с линией включается ёмкость (C₂), с помощью которой достигается режим, близкий к последовательному резонансу.

4.2. Определение потерь напряжения в линии при плавке гололёда

Увеличение тока плавки закономерно повышает нагрузку на питающий трансформатор и вызывает существенный рост потерь напряжения в ЛЭП, что напрямую влияет на качество электроэнергии у потребителей. Поэтому требуется точно определить допустимые режимы работы линии с учётом её длины и исходной нагрузки.

Влияние тока плавки на потери напряжения и мощность тепловыделения рассмотрено на примере провода АС-50/8 по данным [96, 100].

Полученные значения потерь напряжения в линии (полученные по выражению 2.40) представлены в виде диаграмм (рисунок 4.1). Рост потерь прямо пропорционален длине линии.

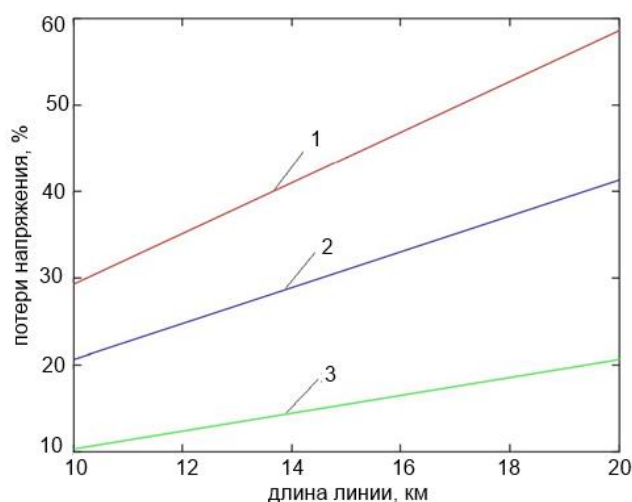


Рисунок 4.2. Потери напряжения в линии с проводом АС-50 при токе:
1 - 298А; 2- 210А; 3 - 105А.

Анализ диаграмм показывает, что для линий 10 кВ при токах 105 А, и более, потери напряжения превышают допустимые отклонения и требуют компенсации. На линиях меньшей длины или при менее тяжёлых условиях ток плавки ниже, потери меньше, и компенсация может не понадобиться.

Проведенное моделирование позволило определить параметры оборудования и режимов работы при дополнительной реактивной нагрузке: коэффициент загрузки трансформатора и требуемую ёмкость конденсатора для поддержания напряжения в конце линии.

4.3. Исходные параметры питающей сети

Для обоснования выбора силового оборудования и оценки режимов работы системы плавки необходимо рассмотреть питающую сеть, к которой подключается защищаемая линия. Схема электроснабжения районной подстанции 35/10 кВ приведена на рисунке 4.3. Питание осуществляется от двух трансформаторов ТДНС-10000/35/11 [101]. На стороне 10 кВ применена смешанная схема с 14 отходящими фидерами. В РУ установлены батареи компенсации реактивной мощности на каждой секции, трансформаторы собственных нужд и измерительные трансформаторы напряжения.

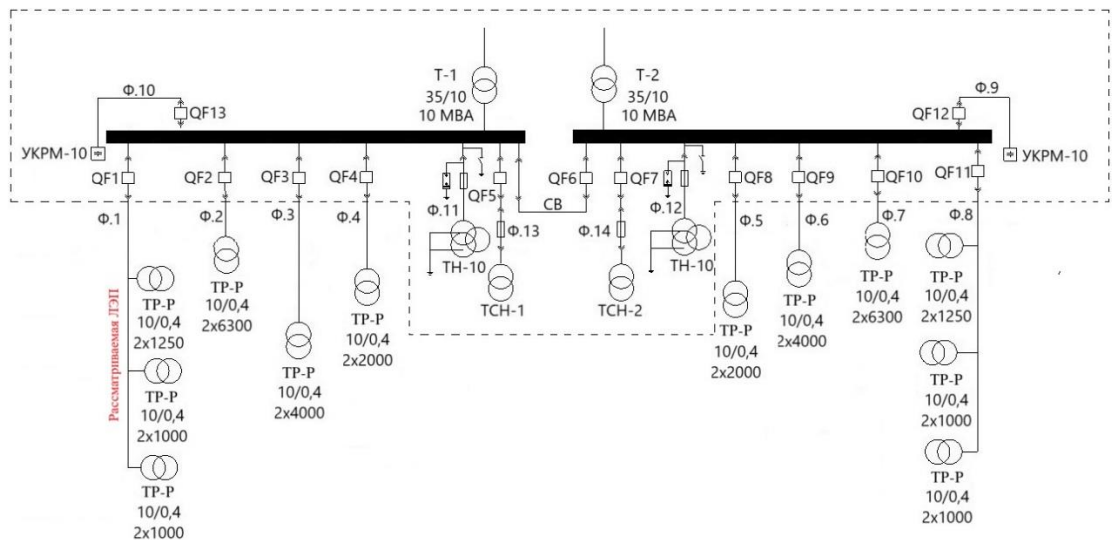


Рисунок 4.3. Схема электроснабжения районной сети от ПС-35/10.

4.4. Определение исходных параметров потребителей в системе плавки

В расчётах рассматривается фидер №1, питающий по магистральной схеме группу потребителей (посёлок, насосная станция, пилорама). Протяжённость ЛЭП - 10 км, категория надёжности электроснабжения - II.

Расчётные мощности потребителей и токи в нормальном режиме определены по стандартным методикам [57, 102]. Для посёлка ток составляет 53,31 А, для насосной станции - 31,58 А, для пилорамы - 16,71 А. Сечение провода выбрано по экономической плотности тока - АС-50/8 (длительно-допустимый ток 210 А). Для гарантированной плавки требуется ток 298 А и мощность тепловыделения 52,9 Вт/м - эти параметры были определены как расчётные при моделировании тепловых процессов (Глава 3). Было установлено, что такой режим допустим, так как температура провода не превышает 90 °С [96, 100].

Для потребителей приняты комплектные трансформаторные подстанции: посёлок - КТПн – 2х1000/10/0,4 ; водозабор и пилорама - КТПн – 2х630/10/0,4.

В нормальном режиме полная мощность потребителей фидера №1 составляет: посёлок - 375,9 кВА, водозабор - 257,4 кВА, пи́лорама - 289,1 кВА. Коэффициенты загрузки трансформаторов подстанции - 0,41–0,42.

В режиме плавки нагрузка искусственно увеличивается; реактивная мощность линии компенсируется конденсаторной батареей C_1 . Прямое сравнение полных мощностей с нормальным режимом некорректно; критерий - действующие значения тока. Коэффициенты загрузки трансформаторов в режиме плавки - 0,82–0,84.

Токи плавки рассчитаны с учётом последовательно включённой конденсаторной батареи, подобранной для создания резонанса, компенсирующего индуктивное сопротивление линии и реактора. Это обеспечивает напряжение у потребителя 10,5 кВ. Установка конденсатора в середине линии даёт распределённую компенсацию, выравнивая напряжение. Токи на разных участках линии различны. Ток на участке от подстанции до точки подключения определяется полной мощностью схемы плавки (рисунок 4.3).

$$I_1 = \frac{S_{расч}}{\sqrt{3}U_n}, \quad (4.1)$$

где $S_{расч}$ - расчётная полная мощность режима плавки, кВА.

Ток на участке линии после точки подключения компенсирующего устройства (рисунок 4.3) определяется с учётом скомпенсированной реактивной мощности:

$$I_2 = \frac{\sqrt{P_{расч}^2 + (Q_{расч} - Q_{комп})^2}}{\sqrt{3}U_n}, \quad (4.2)$$

где $P_{расч}$ и $Q_{расч}$ — расчётные активная и реактивная мощность линии плавки; $Q_{комп}$ — мощность компенсирующего устройства (реактора/конденсатора).

Для расчётов принято значение тока плавки в линии 298 А. Для

компенсации реактивной мощности и разгрузки трансформаторов на шинах 10 кВ подстанции установлены конденсаторные батареи. Их суммарная мощность составляет 6000 кВАр , степень регулирования - 600 кВАр , номинальный ток - 330 А [103].

Одновременная плавка возможна не более чем на 1 линии. Номинальный ток на стороне низшего напряжения (10,5 кВ) трансформаторов ТДНС-10000/35/11 составляет 525-530 А. В дальнейшем, ток плавки для одной линии принят 298 А, следовательно, включение двух линий (596 А) приведёт к перегрузке трансформаторов. Увеличение числа линий, одновременно работающих в режиме плавки, требует пересмотра мощности трансформаторов подстанции.

Подключение в конце магистрали индуктивного нагрузочного реактора обуславливает значительное увеличение реактивной составляющей тока, протекающего по ЛЭП. Увеличение суммарного тока линии, в свою очередь, вызывает кратный рост продольных потерь напряжения, что в конечном итоге приводит к недопустимому падению напряжения на клеммах электроприемников потребителя.

Для решения данной проблемы и обеспечения работоспособности электротехнического комплекса применяется раздельная компенсация. Во-первых, для компенсации реактивного тока, проходящего непосредственно через силовой трансформатор, и его разгрузки по реактивной мощности на шинах 10 кВ районной подстанции предусматривается установка конденсаторных батарей поперечной компенсации. Во-вторых, для компенсации потерь напряжения непосредственно в самой линии выполняется расчет емкости продольной конденсаторной батареи, обеспечивающей режим, близкий к резонансу напряжений.

Ток линии в нормальном режиме определяется как сумма токов потребителей, питающихся по магистральной схеме (ток последовательно протекает через все участки), и составляет 101,6 А.

Ток в линии в режиме плавки определяется с учётом тока нагрузки и дополнительного тока, создаваемого нагрузочным реактором. Расчётный ток плавки принят из условия эффективного удаления льда толщиной 20 мм при $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ветре 20 м/с на проводе АС-50/8.

4.5. Расчет и выбор силового оборудования системы плавки

Для компенсации реактивной мощности и разгрузки трансформаторов на шинах 10 кВ подстанции устанавливаются конденсаторные батареи. В результате моделирования определена ёмкость конденсаторной батареи, которая при номинальном напряжении обеспечивает мощность 6000 кВАр. Для регулирования напряжения и выдаваемой мощности установка имеет ступени регулирования по 600 кВАр [103].

В нормальном режиме работы ток нагрузки недостаточен для выделения мощности, необходимой для оттаивания льда. Требуемое увеличение тока в линии достигается путем подключения в конце магистрали нагрузочного реактора. На основании заданного расчетного тока плавки определяется величина требуемого добавочного тока реактора, после чего вычисляется его индуктивное сопротивление:

$$X_{L_{расч}} = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_{нл}} = \frac{10000}{1,73 \cdot 298} = 19,4 \text{ Ом}; \quad (4.3)$$

$$N_{реакт} = \frac{I_{нл}}{I_{ном.реакт}} = 1,14 \approx 2 \quad (4.4)$$

Требуемый ток реактора не равен суммарному току плавки в линии. По упрощённой оценке, он определяется как разность между расчетным током плавки (298 А) и исходным током нагрузки фидера (101,6 А, определенным в параграфе 4.4). Таким образом, расчетная потребность в токе реактора составляет 196,4 А.

Для создания такого тока необходимо подобрать оборудование по каталожным данным [104]. В качестве базового элемента выбран типовой масляный нагрузочный реактор серии РТМ-3300/10, паспортный номинальный ток которого составляет 173 А. Поскольку требуемый расчетный ток (196,4 А) превышает возможности одного устройства (коэффициент загрузки составил бы 1,14, то есть перегрузка 14 %), применение единичного реактора недопустимо.

Установка двух реакторов обеспечивает суммарную токовую пропускную способность реакторного узла на уровне 346 А ($2 \cdot 173$ А). Данное значение надежно перекрывает требуемую потребность в добавочном токе (196,4 А) для обеспечения суммарного тока плавки в линии (298 А), формируя необходимый эксплуатационный запас по нагрузке оборудования.

4.6. Моделирование режимов работы ЛЭП

Параметры эквивалентной схемы линии определены по известным выражениям. Моделирование нормального режима и плавки выполнено в Multisim [105] с использованием рассчитанных значений сопротивлений, нагрузки, реактора (определена аналитическим путем по выражению 4.3, требуемая индуктивность рассчитана через реактивное сопротивление, необходимое для обеспечения добавочного тока плавки) ($L = 120 \text{ мГн}$) и ёмкости С. Подбором ёмкости в процессе моделирования определены: ёмкость параллельной батареи (на шинах питающей подстанции) $C_1 = 30 \text{ мкФ}$, ёмкость последовательной батареи (в рассматриваемой линии) $C_2 = 65 \text{ мкФ}$. Введение в схему последовательного конденсатора обеспечивает её работу в режиме, близком к резонансу напряжений.

При включении реактора ток в линии возрастает до 296 А, но напряжение в конце линии падает до 7,5-8 кВ. Для его восстановления до

требуемого уровня последовательно с линией включается ёмкость, обеспечивающая резонанс напряжений; её величина определена в процессе моделирования электрического режима в линии с подключенными реактивными сопротивлениями (рисунок 4.4).

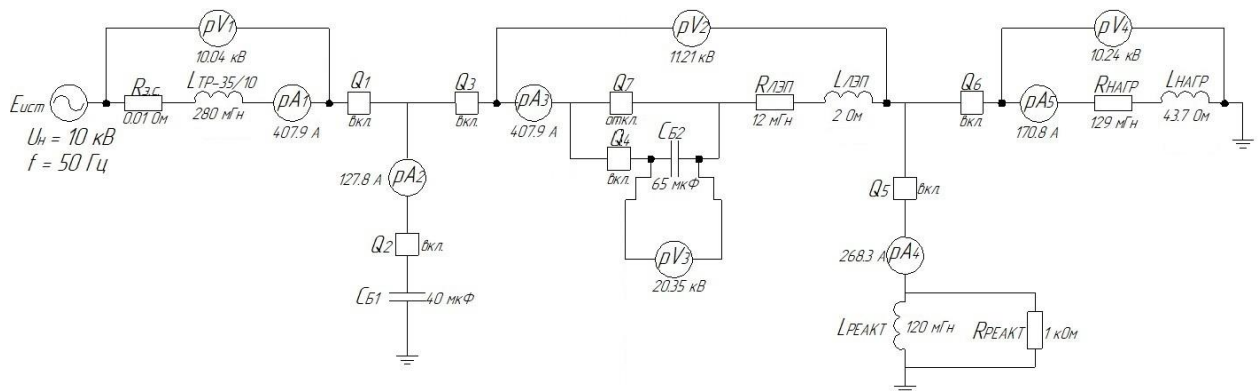


Рисунок 4.4. Принципиальная схема ЛЭП в режиме плавки гололёда.

Приведение параметров схемы к режиму, близкому к последовательному резонансу, позволило повысить напряжение в конце линии на 2,5–3 кВ относительно уровня без компенсации (до нормируемых 10,5–11,5 кВ). При этом расчеты показали, что падение напряжения непосредственно на последовательно включенной емкости C_2 достигает 19 кВ (рисунок 4.4).

Для фиксации параметров на схеме замещения установлены виртуальные измерительные приборы: амперметры ($pA_1 \dots pA_5$) и вольтметры ($pV_1 \dots pV_4$). Сводные результаты моделирования для трех ключевых режимов представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1.

Результаты моделирования для участков ЛЭП

Точка измерения в схеме	Обозначения прибора	Нормальный режим (без реактора и $C_{Б2}$)	Плавка без компенсации (включен реактор)	Плавка в режиме резонанса (с $C_{Б2}$)
Токи в узлах сети, А				
Ток питающей подстанции	pA_1	116,0	226,0	505,0
Ток поперечной батареи $C_{Б1}$	pA_2	129,6	126,0	127,8
Ток магистрали (линии)	pA_3	148,4	319,0	407,9
Ток нагрузочного реактора	pA_4	0 (отключен)	218,4	268,3
Ток потребителя (нагрузки)	pA_5	148,4	130,8	170,8
Напряжения в узлах, кВ				
Напряжение шин подстанции	pV_1	10,19	9,90	10,04
Напряжение на продольном сопротивлении ЛЭП	pV_2	1,05	2,28	11,21
Напряжение на емкости $C_{Б2}$	pV_3	0 (отключена)	0 (отключена)	20,35
Напряжение у потребителя	pV_4	9,84	7,70	10,24

Напряжение на изоляторах линии не превышает 11,21 кВ, что допустимо для класса 10 кВ (максимум 12 кВ). Таким образом, повышение напряжения наблюдается только на конденсаторной батарее, которая должна быть выбрана на рабочее напряжение не ниже 20 кВ. Дополнительная изоляция линии не требуется. Для коммутации в режиме плавки применяются вакуумные выключатели ВВ-TEL в ячейках КСО [95]. Для защиты от перенапряжений требуется установка ограничителей перенапряжений ОПН [106].

Путем настройки емкости продольной компенсации C_2 в процессе моделирования обеспечено поддержание нормированного напряжения у потребителей (10,5 кВ), однако из-за дискретности шага регулирования реактивных элементов установившийся ток в линии составил 407,9 А.

Данное значение превышает расчетный ток плавки (298 А), но является технически безопасным для электротехнического комплекса: оно укладывается в номинальный рабочий ток питающего трансформатора (530 А), а температура голого провода АС-50/8 при таком токе, согласно результатам теплового моделирования с боковым порывом ветра без гололёдной нагрузки (п. 3.7), достигает лишь 81,4 °С, оставаясь ниже предела допустимого нагрева (90 °С).

В результате исследований определены параметры системы: нагрузочный реактор ($L = 120 \text{ мГн}$) и конденсаторные батареи: параллельное включение на шинах подстанции $C_1 = 30 \text{ мкФ}$ и последовательное включение в линии $C_2 = 65 \text{ мкФ}$ (общая ёмкость $C = 95 \text{ мкФ}$). Последовательное включение конденсатора $C_2 = 65 \text{ мкФ}$ повысило напряжение в конце линии с 7,7 до 10,5 кВ.

Учитывая, что батарею последовательной компенсации включают непосредственно в цепь воздушной линии и установка предполагается на открытом воздухе, техническая реализация требует размещения конденсаторных батарей в климатически защищенном исполнении (оболочки, стойкие к атмосферным осадкам и температурным перепадам).

Поскольку наличие нелинейных нагрузок у потребителей приводит к генерации токов высших гармоник, использование некомпенсированных конденсаторных батарей сопряжено с риском феррорезонанса. Для борьбы с высшими гармониками и сохранения показателей качества электроэнергии по синусоидальности напряжения, выбранную базовую установку поперечной компенсации УКРМ-10,5-6000-600 (4х600ф + 6х600р) [103], а также аппаратуру продольной компенсации, необходимо укомплектовывать защитными антирезонансными дросселями. Исполнение конденсаторных установок с фильтровыми реакторами предотвращает усиление токов гармоник, смещает собственную резонансную частоту контура в безопасную зону и полностью исключает риск пробоя изоляции. В отличие от

поперечной компенсации на подстанции, представленной типовыми серийными установками (УКРМ), аппаратура продольной компенсации 10 кВ в линии реализуется в виде комплектных установок продольной компенсации БСК-10 МВАр-10,5 кВ [103] блочно-модульного исполнения. Данный подход подразумевает изготовление единого комплекса полной заводской готовности, который включает в себя емкостные модули батарей статических конденсаторов (БСК) с защитными дросселями, вакуумные коммутационные аппараты для ступенчатого шунтирования секций батареи, а также интегрированные шкафы микропроцессорной релейной защиты и автоматики (РЗА).

По результатам моделирования (таблица 4.1) установлено, что для достижения режима последовательного резонанса в линии требуемая эквивалентная емкость продольной компенсации составляет $C_{\text{треб}} = 65 \text{ мкФ}$. При протекании расчетного тока плавки напряжение на данной емкости достигает $U_{\text{раб}} = 20,35 \text{ кВ}$.

Требуемая реактивная мощность установки (при рабочем напряжении) определяется по выражению:

$$Q_{B2} = U_{\text{раб}}^2 \cdot \omega \cdot C_{\text{треб}} = (20,35 \cdot 10^3)^2 \cdot 314 \cdot (65 \cdot 10^{-6}) \approx 8,45 \text{ МВАр}.$$

Поскольку рабочее напряжение (20,35 кВ) двукратно превышает номинальное напряжение сети (10 кВ), использование стандартной схемы подключения конденсаторов на 10,5 кВ недопустимо из-за риска пробоя изоляции.

Для технической реализации установки на рынке представлены комплектные батареи статических конденсаторов (БСК) наружной установки [103]. Для выбора рационального решения рассмотрены два варианта на базе серийного оборудования завода-изготовителя (электротехническая компания «СлавЭнерго»).

Использование установки БСК-10-10 УХЛ1 на напряжение 10 кВ. Номинальное напряжение 10 кВ (допустимое $U_{\text{max}} = 12 \text{ кВ}$), номинальная

мощность 10 МВАр, емкость $C_{\text{ном}} = 318,31$ мкФ. Чтобы установка БСК-10-10 выдерживала рабочее напряжение 20,35 кВ, её внутренние конденсаторные единицы (банки) необходимо перекоммутировать в две последовательные группы. При разделении общей емкости на две группы и их последовательном соединении эквивалентная емкость снижается в 4 раза по отношению к исходной параллельной сборке. Таким образом, эквивалентная емкость перекоммутированной на 20 кВ установки БСК-10-10 составит:

$$C_{\text{экв}} = C_{\text{ном}} / 4 = 318,31 / 4 = 79,57 \text{ мкФ}.$$

Полученное значение (79,57 мкФ) с запасом перекрывает требуемую для плавки емкость (65 мкФ). Следовательно, хотя для сохранения емкости при росте напряжения требуется в 4 раза больше конденсаторных банок, одной установки номинальной мощностью 10 МВАр физически достаточно для решения задачи. Избыточная емкость выводится из контура автоматикой ступенчатого регулирования.

Помимо обеспечения электрической прочности по напряжению, выбранная компоновка оборудования удовлетворяет строгим требованиям по токовой нагрузке. Базовая установка БСК-10 МВАр - 10,5 кВ является трехфазной, её номинальный ток, согласно данным завода-изготовителя, составляет 549,9 А (при суммарной располагаемой мощности 10 МВАр). При перекоммутации внутренних конденсаторных единиц данной установки в однофазную цепь с двумя последовательными ветвями (для обеспечения номинального рабочего напряжения изоляции 21 кВ), максимально допустимый длительный ток сборки, исходя из баланса сохраняемой мощности, составит 476,2 А. Коэффициент загрузки по току составит 0,85 (85 %). Данный режим гарантирует работу конденсаторов с 15 % эксплуатационным запасом

Использование установки БСК-35-19 УХЛ1 на напряжение 35 кВ. Номинальное напряжение 35 кВ (допустимое $U_{\text{max}} = 40,5$ кВ), номинальная мощность 19 МВАр, паспортная емкость $C_{\text{ном}} = 49,37$ мкФ. Установка БСК-

35-19 способна напрямую работать при напряжении 20,35 кВ. Однако её паспортная емкость (49,37 мкФ) недостаточна для достижения резонанса ($49,37 < 65$ мкФ). Для обеспечения необходимой емкости 65 мкФ на классе изоляции 35 кВ потребуется установка расчетной мощностью:

$$Q_{35} = Q_{\text{ном}} \cdot (C_{\text{треб}} / C_{\text{ном}}) = 19 \cdot (65 / 49,37) \approx 25 \text{ МВАр.}$$

Установка БСК-35-19 способна напрямую и безопасно работать при расчетном напряжении 20,35 кВ, так как оно значительно ниже предела прочности её изоляции. Однако важно учитывать, что фактическая реактивная мощность, генерируемая конденсаторной установкой, квадратично зависит от приложенного напряжения. При рабочем напряжении 20,35 кВ установка класса 35 кВ будет выдавать лишь около 33,8 % от своей паспортной мощности. Следовательно, паспортной мощности будет недостаточно для достижения резонанса. Чтобы скомпенсировать это квадратичное падение и обеспечить необходимую емкость на классе изоляции 35 кВ, потребуется использование установки с избыточной паспортной мощностью (установка типа БСК-35-30, номинальный ток 494,9 А).

Определяющим фактором стоимости высоковольтных конденсаторных установок является их установленная реактивная мощность (МВАр) и класс изоляции. Реализация варианта на 35 кВ потребует применения крупногабаритной установки мощностью 25 МВАр. При этом большая часть ее изоляционных свойств не будет востребована, что приведет к нерациональным капитальным затратам (оценочно более 12-15 млн руб.). Помимо многократного роста стоимости самих конденсаторных единиц, переход на класс напряжения 35 кВ влечет за собой существенное удорожание сопутствующей инфраструктуры: высоковольтные опорные изоляторы (например, типа ИОС-35) значительно превосходят по стоимости аналоги для сетей 10 кВ; воздушные изоляционные промежутки между фазами на 35 кВ требуют применения несущих металлических рам

увеличенных габаритов и высокой металлоемкости; коммутация такой установки требует применения специализированного выключателя 35 кВ, стоимость которого несоизмеримо выше типовых вакуумных выключателей на 10 кВ.

Реализация на 10 кВ требует закупки установки мощностью всего 10 МВАр. Заказ данной БСК с двухъярусной рамной изоляцией и последовательно-параллельной сборкой конденсаторов (для работы при 20 кВ) является стандартной заводской опцией, а ее стоимость составит порядка 4,5-6 млн руб.

Применение установки БСК-10-10 УХЛ1 с её перекоммутацией на рабочее напряжение 20 кВ является технически обеспеченным и экономически выгодным решением. В совокупности с экономией на опорной изоляции, металлоконструкциях и коммутационных аппаратах, это снижает прямые капитальные затраты на продольную емкость более чем в 3,5 раза по сравнению с использованием оборудования класса 35 кВ. Данный вариант принимается к реализации как экономически обоснованный.

Влияние мощности нагрузки на напряжение линии. Моделирование показало, что при частичном сбросе нагрузки потребителем эквивалентное сопротивление конца линии возрастает. При неизменной емкости это приводит к расстройке последовательного контура и возникновению перенапряжений на шинах потребителя (зафиксированы скачки до 20 кВ). Данная проблема решается наличием в принятой установке компенсации регулируемых ступеней емкости. Система управления мощностью конденсаторной батареи должна непрерывно фиксировать ток магистрали, ступенчато коммутируя секции батарей для удержания параметров контура в безопасном режиме.

Численными экспериментами установлено, что резонансные перенапряжения локализуются в узлах, расположенных после последовательной емкости $C_{Б2}$. Ветви потребителей, подключенные до конденсатора, сохраняют нормативный уровень напряжения (до 11 кВ). Для

безопасной плавки в сетях со сложной топологией необходима обязательная координация систем автоматики: установка терминалов защиты от повышения напряжения на вводных ячейках всех потребителей, действующих на автоматическое шунтирование конденсаторной установки при отказе основного контроллера.

Расчёты подтвердили работоспособность системы для одной линии 10 кВ без увеличения мощности подстанции 35/10 кВ. Потери напряжения устранены за счёт последовательного резонанса.

Основное ограничение - капитальные затраты на оборудование каждого фидера. При одновременной плавке на нескольких линиях может потребоваться увеличение мощности трансформаторов и ёмкости батарей. Для экономии ресурсов рекомендуется поочерёдное включение плавки на фидерах.

4.7. Экономическая эффективность технологии системы плавки

Оценка капитальных затрат выполнена на основе анализа рыночных цен основного оборудования и монтажа по состоянию на 2026 г. по данным коммерческих предложений ведущих производителей.

Цена одного шунтирующего реактора (рис.4.5) варьируется от 1,2 до 2,2 млн руб. [93]. Для системы плавки приняты два реактора, включённых параллельно, следовательно, стоимость реакторного оборудования составляет от 2,4 до 4,4 млн руб. Нижняя граница - при крупных закупках или наличии на складе, средняя - стандартная поставка от надёжного производителя, верхняя - с дополнительными опциями, срочностью или особыми условиями.

Конденсаторные установки (КУ) (рис.4.6) применяются для компенсации реактивной мощности и повышения коэффициента мощности в

распределительных сетях 6-10 кВ. Цены на КУ варьируются от 4,5 до 8 млн руб [103].

Кроме систем, оснащенных средствами автоматики, возможно применение батарей статических конденсаторов (рис.4.7) при отсутствии необходимости регулирования.



А – вид со стороны радиаторов охлаждения



Б – вид сбоку

Рисунок 4.5. Шунтирующий реактор типа РТМ-3300/10

Нижняя граница характерна для предложений небольших производителей с упрощённой комплектацией. Средняя цена соответствует качественной сборке от надёжного производителя с новыми компонентами и стандартным шкафом управления. Верхний сегмент включает установки премиум-класса с импортными комплектующими, расширенной системой мониторинга и защиты, удалённым доступом и комплексом услуг «под ключ».



А – внешний вид



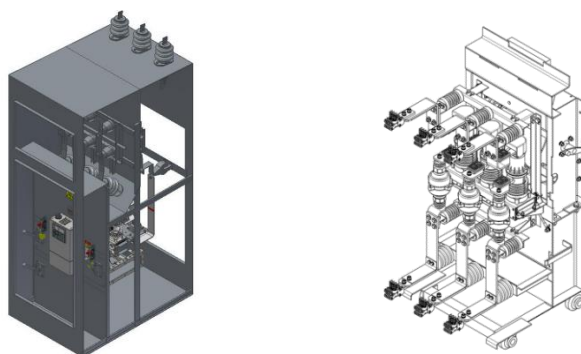
Б – внутреннее устройство

Рисунок 4.6. Установка компенсации реактивной мощности УКРМ-10,5-6000-600(4x600ф+6x600р).



Рисунок 4.7. Батарея статических конденсаторов БСК-10 МВАр-10,5 кВ.

Для подключения дополнительных реактивных элементов и обеспечения их безопасной коммутации требуется модернизация существующих ячеек в распределительном устройстве подстанции. Вместо дорогостоящей замены комплектных распределительных устройств (КРУ) целиком, экономически целесообразна замена устаревших масляных выключателей на современные вакуумные выключатели (например, серии ВВ-TEL) с установкой микропроцессорных терминалов релейной защиты и автоматики (РЗА), дополнительными функциями и интеграцией в АСУ ТП. Стоимость такой модернизации одной ячейки варьируется от 450 до 850 тыс. руб. [106-107]. Дополнительно учитывается стоимость ограничителей перенапряжений (ОПН), приобретаемых комплектом на три фазы (зависит от климатического исполнения и класса напряжения).



А - внешний вид шкафа
в сборе

Б - выкатной элемент
вакуумного выключателя

Рисунок 4.8. КРУ типа ВВ-TEL-630/10.

Дополнительно учитывается стоимость ограничителей перенапряжений (ОПН), приобретаемых комплектом на три фазы. Цена зависит от климатического исполнения, материала и наличия контроля состояния.

Система мониторинга на базе контроллеров-датчиков ДО-3М (180-250 тыс. руб./шт.) [108]. Также требуются: базовая станция (250-450 тыс. руб.), лицензионное ПО (150-300 тыс. руб.), крепеж и ЗИП (до 100 тыс. руб.). Датчики устанавливаются выборочно на критических участках: от 3 (минимум) до 8+ (максимум) на линию 10 км. Одной базовой станции достаточно.

Монтажные работы [100-108] включают проект, высотный монтаж, установку оборудования и пусконаладку. Усреднённые цены на 2026 г.: переоборудование ячейки – 250-350 тыс. руб./шт.; УКРМ - 1,2-2,5 млн руб.; реактора - 500-600 тыс. руб.; системы диагностики - 400 тыс. - 1,2 млн руб. (на 10 км).

Общие капитальные затраты на оборудование и монтаж для одной линии составляют около 17,7 млн руб.

Сумма капитальных затрат для реализации системы плавки [109]:

$$Z_{\Sigma} = Z_{\text{оборуд.пл.}} + Z_{\text{монт.оборуд.пл.}} = 12,26 + 5,40 = 17,66 \text{ млн. руб.}, \quad (4.5)$$

Где: $Z_{\text{оборуд.пл.}}$ - суммарные затраты на оборудование системы плавки;
 $Z_{\text{монт.оборуд.пл.}}$ - суммарные затраты на монтаж и пусконаладочные работы системы плавки.

Для линии 10 кВ протяжённостью 10 км ущерб от гололёдной аварии может достигать десятков миллионов рублей и зависит от масштаба разрушений. Выполнен анализ трёх типовых сценариев на основе реальных аварийных данных.

Сценарий локальных повреждений: обрыв проводов на отдельных участках, повреждение 10-15 опор (25-35 %). Прямой ущерб - 4-7 млн руб. Характерен при своевременном обнаружении обледенения [96, 107, 109-110].

Сценарий массовых разрушений: каскадное разрушение 20-30 опор (50-75 %), протяжённые обрывы проводов. Прямой ущерб - 15–30 млн руб. (масштабная замена элементов, работа 5-7 бригад до недели) [96, 107, 109-110].

Сценарий катастрофических последствий: полное уничтожение линии и повреждение подстанционного оборудования, фактически новое строительство. Прямой ущерб превышает 30-50 млн руб., отключение может длиться неделями [96, 107, 109-110].

Косвенный ущерб часто превышает прямой и включает: недоотпуск электроэнергии (санкции, потери доходов – 1-5 млн руб./сутки); убытки потребителей (остановка производства, порча продукции, размораживание систем - десятки млн руб.); социальный ущерб (организация временного энергоснабжения, эвакуация – 1-3 млн руб.) [96, 107, 109-110].

Таблица 4.2.

Оценка ущерба для ЛЭП 10 кВ

Сценарий	Прямой ущерб (восстановление)	Косвенный ущерб (простой)	Суммарный оценочный ущерб
Локальный	4 - 7 млн. руб.	3 - 10 млн. руб.	7 - 17 млн. руб.
Массовый	15 - 30 млн. руб.	10 - 30 млн. руб.	25 - 60 млн. руб.
Катастрофический	от 30 млн. руб.	от 30 млн. руб.	от 60 млн. руб.

Анализ показывает, что полный экономический ущерб от гололёдной аварии на линии 10 кВ может составлять от нескольких миллионов до сотен миллионов рублей, что подтверждает высокую эффективность вложений в системы плавки гололёда (СПГ) [100-108].

Для линии 10 км с проводом АС-50 потребление электроэнергии за одну плавку – 187-2995 кВт·ч, стоимость операции - 1-15 тыс. руб., что несопоставимо ниже ущерба от аварии. Потери активной мощности в линии при плавке составляют 397-1587 кВт (суммарно на три фазы).

Расчёт срока окупаемости СПГ (капвложения 17,7 млн руб.) выполнен для трёх сценариев с периодичностью аварий раз в три года:

- локальные повреждения (ущерб 4-7 млн руб.): срок окупаемости - 7,58-13,3 года (усредненный 10 лет), что соответствует нормативам [109].

- массовые разрушения (ущерб 15-30 млн руб.): окупаемость - 1,77-3,54 года; проект высокоэффективен [100-110].

- катастрофические последствия (ущерб 30-60+ млн руб.): окупаемость менее года; СПГ становится экономически оправданной мерой предотвращения критических ситуаций [100-110].

Таблица 4.3.

Срок окупаемости

Сценарий аварии	Предотвращаемый ущерб, млн руб.	Срок окупаемости, годы
Локальный	4 - 7 млн. руб.	7,6 – 13,3 лет
Массовый	15 - 30 млн. руб.	1,8 – 3,5 года
Катастрофический	от 30 млн. руб.	менее 1 – 1,8 года

В расчётах не учтены дополнительные эффекты - низкие эксплуатационные расходы, штрафы за ненадёжность, длительный срок службы (20-30 лет) и возможность более частых аварий в неблагоприятные годы.

Комплексная оценка экономической эффективности в перспективе может быть расширена за счет расчета вероятностных рисков ущерба, учитывающих климатические циклы и статистику гололедных периодов для конкретного региона. Предварительный анализ показывает, что учет

вероятности наступления неблагоприятных погодных явлений (риск-ориентированный подход) дополнительно сокращает расчетный срок окупаемости. Помимо прямого недоотпуска электроэнергии, в энергосистемах фиксируются коммерческие потери, составляющие в среднем около 5 % от учетных объемов для конечных потребителей. Исключение плановых отключений линий для проведения традиционной плавки позволяет энергосбытовым компаниям снизить уровень коммерческих потерь и штрафных санкций за снижение надежности электроснабжения. Также, классическая плавка переменным (и особенно постоянным) током сопряжена с высоким риском термомеханического повреждения или термического перегрева провода в случае ошибки диспетчера или несрабатывания защит, превышение допустимой температуры и времени плавки недопустимо. В предложенной системе минимизирует вероятность перегрева провода за счет предварительного расчета режима плавки, предотвращая колоссальный ущерб от разрушения пролетов, который сопоставим со сценарием локальной или массовой аварии.

Для линии 10 км в гололёдоопасном районе инвестиции в СПГ (17,7 млн руб.) экономически обоснованы. Даже при сценарии локальных повреждений окупаемость укладывается в нормативы, а при тяжёлых сценариях составляет 1-3,5 года, что делает проект высоколиквидным и стратегически важным.

Обоснование инвестиций базируется на сопоставлении затрат с предотвращенным ущербом от аварий, а также на сравнении предлагаемой системы с классическими методами плавки.

Традиционный (классический) метод плавки льда требует обязательного отключения потребителей, выезда оперативно-выездной бригады (ОВБ) для переключений схемы и визуального контроля. Время реализации классической плавки складывается из организационных мероприятий (1–3 часа) и самого процесса нагрева, составляя в сумме от 3 до 5 часов. За это время ледяная муфта продолжает расти, а потребители терпят

убытки от недоотпуска электроэнергии. Более того, классический метод сильно зависит от человеческого фактора (ошибки диспетчера, невозможность проезда техники к ЛЭП в метель), что снижает общую надежность энергосистемы.

В разработанной системе время активного нагрева составляет до 2 часов, подготовительные работы минимальны, а восстановительные не требуются, так как линия остаётся под напряжением. Время работы предлагаемой системы определяется исключительно физикой теплового процесса в зависимости от погодных условий. Сохранение электроснабжения полностью исключает технологический и социальный ущерб потребителей

Кроме того, разработанная система может быть интегрирована с автоматизированной системой диагностики гололёдообразования. Команда на пуск схемы плавки отдается исключительно диспетчером после проверки схемы, согласования с РЗА и подтверждения безопасности. Это полностью соответствует правилам оперативно-диспетчерского управления [56].

Таким образом, предлагаемая система не только сокращает время плавки и исключает перерывы в электроснабжении, но и повышает надёжность за счёт частичной автоматизации, что дополнительно усиливает экономическую эффективность. Внедрение системы плавки гололеда без перерыва электроснабжения с автоматизированной диагностикой гололёдообразования не только гарантирует высокую технологическую надежность сети и исключает влияние человеческого фактора, но и является стратегически и экономически выгодным мероприятием.

Высокая экономическая эффективность предложенного решения и техническая сложность реализации резонансных режимов требуют строгого алгоритмического подхода к проектированию. Для унификации процесса выбора и проверки параметров оборудования была формализована соответствующая методика (Приложение И).

4.8. Сравнительный анализ и обоснование электрических режимов разработанного комплекса

Разработанный электротехнический комплекс обеспечивает реализацию плавки гололеда и решает критические проблемы эксплуатации распределительных сетей 10 кВ, которые не могут быть эффективно устранены традиционными методами. Традиционные методы, заложенные в отраслевых стандартах, базируются на создании искусственного короткого замыкания, что физически исключает возможность электроснабжения потребителей в процессе таяния льда.

Даже при наличии готовых технологических карт, как показано на примере фидера 7-15 ПС «Альмухаметово» (исследование А.Г. Лютова и др.), чистое время плавки в 8 минут требует полного обесточивания потребителей на срок от 30 минут до 2 часов для допуска оперативно-выездной бригады [23-25].

Адекватность модели распределительной сети 10 кВ подтверждается сходимостью натурными данными исследования А.Г. Лютова и др. [23-25] для реальной ВЛ 10 кВ длиной 20 км с проводом АС-50. В указанной работе доказана возможность повышения тока в линии до 415 А за счет искусственного резонанса. Сгенерированные в разработанной модели Multisim токи плавки (в диапазонах 298–420 А) практически полностью совпадают с эксплуатационными экспериментами, что подтверждает реализуемость метода без организации метода искусственных коротких замыканий.

Безопасность протекания токов такого порядка, совместно с рабочими токами нагрузки, без отключения потребителей доказана в экспериментальных исследованиях А.Ю. Елизарьева: при наложении токов плавки на рабочий режим линии устойчиво фиксировались токи 104 А, 208 А, 492 А и 503 А [27]. Это подтверждает, что циркуляция расчетных токов

при правильном выборе оборудования не приводит к нарушению устойчивости сети и не вызывает критических просадок напряжения.

В настоящее время современные мощные системы плавки (например, дискретно управляемые выпрямительные установки) применяются преимущественно на магистральных ВЛ 110–220 кВ, генерируя токи 1200–1600 А для участков до 180 км (исследование А.Н. Щурова [6, 26]). Для сетей 10 кВ с проводом АС-50 применение таких установок технически избыточно и экономически нерентабельно. Более того, вывод воздушной линии из работы генерирует существенные добавочные потери активной мощности в смежных участках сети из-за перераспределения перетоков. Разработанный комплекс ликвидирует как прямой коммерческий ущерб от простоя, так и скрытые добавочные потери в энергосистеме.

Дополнительно, как показывают расчеты А.Ю. Елизарьева, ущерб от недоотпуска электроэнергии при плановых отключениях ВЛ для проведения плавки может достигать сотен тысяч рублей в год для одной линии [27].

Интеграция конденсаторных батарей (УКРМ) и нагрузочных реакторов позволяет перенести эффективность систем плавки магистрального уровня в сегмент распределительных сетей 10 кВ. система выводит сеть на резонансный режим, обеспечивая расплавление льда за 1–1,5 часа без нарушения параметров качества электроэнергии. При этом обеспечивается круглогодичная рентабельность капиталовложений. Ключевым преимуществом предложенного комплекса является полный отказ от режимов искусственного короткого замыкания, регламентированных действующими нормативными документами, что гарантирует бесперебойное электроснабжение нагрузки на протяжении всего процесса очистки проводов.

4.9. Выводы по главе 4

- Разработана методика расчёта и выбора силового электрооборудования для системы плавки гололёда на ЛЭП 10 кВ без отключения потребителей, основанная на результатах моделирования тепловых процессов;
- Предложена принципиальная схема электротехнического комплекса плавки гололёда, включающая:
 - нагрузочный реактор в конце линии для создания повышенного индуктивного тока плавки;
 - последовательно включённую конденсаторную батарею ($C_2 = 65$ мкФ) для компенсации падения напряжения в линии и настройки резонанса напряжений;
 - УКРМ на шинах 10 кВ питающей подстанции для компенсации реактивной мощности и разгрузки силовых трансформаторов.
- Выявлены и решены технические проблемы работы линии в режиме повышенной нагрузки:
 - критическое падение напряжения в конце ЛЭП (до 7,5–8 кВ) при включении реактора успешно компенсировано последовательной ёмкостью, восстановившей напряжение у потребителей до нормируемых 10,5 кВ;
 - установлено, что резонансные перенапряжения локализуются исключительно на самой конденсаторной батарее (до 19,1 кВ), что требует её выбора на рабочий класс напряжения не ниже 20 кВ, при этом напряжение на линейной изоляции не превышает допустимого (12 кВ).
- Определены эксплуатационные ограничения: одновременная плавка возможна не более чем на 1-2 фидерах при трансформаторах 2×ТДНС-10000.
- Технико-экономическая оценка подтвердила высокую эффективность внедрения:

- капитальные затраты на оборудование одного фидера составляют около 17,7 млн руб.,
- предотвращаемый ущерб от аварии оценивается от 4 до 60 млн руб.;
- срок окупаемости при возникновении гололёдной аварии раз в три года составляет: при локальных повреждениях - 7,6-13,3 года, при массовых разрушениях - 1,8-3,5 года, при катастрофических последствиях – 1,8 года и менее, что подтверждает экономическую целесообразность проекта, особенно в регионах с регулярным обледенением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного диссертационного исследования решена научно-техническая проблема разработки электротехнического комплекса системы плавки гололёда на проводах воздушных линий электропередачи 10 кВ без отключения потребителей и снижения качества электрической энергии.

В работе получены следующие основные результаты:

1. Разработан комплекс взаимосвязанных математических моделей, включающий модель нестационарных тепловых процессов с учётом фазовых переходов «лёд–вода» и смещения провода внутри ледяной муфты и модель определения уточнённых локальных коэффициентов теплообмена на основе анализа термогидродинамических процессов. Доказано, что традиционные аналитические расчеты без учета скорости и направления ветра дают погрешность до 47 % при скоростях свыше 5 м/с.

2. Разработаны методики численного моделирования тепловых, термогидродинамических и электрических режимов системы плавки гололёда, позволяющие комплексно обосновать выбор параметров оборудования.

3. Разработан и реализован алгоритм расчета тепловых процессов в программном комплексе COMSOL Multiphysics, позволяющий прогнозировать время полного проплавления ледяной оболочки в зависимости от её толщины и внешних погодных условий: установлено, что время полного проплавления составляет от 1 часа до 1,5 часов при толщине ледяной оболочки от 2 до 20 мм. На основе модели обоснован расчетный ток плавки (298 А), гарантирующий сброс льда на проводе АС-50/8 при скорости ветра до 20 м/с без критического перегрева провода.

4. Выполнен расчёт и выбор силового электрооборудования для системы плавки гололёда, включающей нагрузочный реактор в конце линии,

УКРМ и дополнительную конденсаторную батарею в начале линии, обеспечивающие протекание требуемого тока плавки при сохранении нормируемого напряжения у потребителей без превышения номинальной мощности существующих силовых трансформаторов.

5. Предложено техническое решение по компенсации падения напряжения и обеспечению нормативного качества напряжения в линии в режиме искусственного увеличения индуктивной нагрузки путем настройки последовательного резонанса с помощью дополнительной конденсаторной батареи.

6. Разработана методика математического моделирования ЛЭП в среде Multisim, позволяющая решить проблему критического падения напряжения. Установлено, что применение последовательной конденсаторной батареи (емкостью 65 мкФ) позволяет настроить цепь в режим, близкий к резонансу напряжений. Численным моделированием подтверждено, что данный режим успешно компенсирует продольные потери и восстанавливает напряжение у потребителя с 7,7 до нормативных 10,5 кВ.

7. Доказана высокая технико-экономическая эффективность комплекса, исключающего перерывы в электроснабжении и функционирующего без участия персонала. Экономический эффект от его внедрения составляет от 4 до 30 млн рублей и более в виде предотвращенного прямого ущерба электросетевого комплекса при ликвидации одной гололедной аварии. При расчетных капитальных затратах 17,66 млн руб. на один фидер срок окупаемости системы составляет от 1 года до 13,3 лет в зависимости от тяжести погодных условий. Дополнительным технологическим эффектом является сокращение времени ликвидации гололёда с 3–5 часов (классический метод) до 1–1,5 часов активного нагрева. При этом показано, что ввиду разнообразия конфигураций, длин магистралей, схем и режимных параметров распределительных сетей, для каждой конкретной ЛЭП 10 кВ требуется индивидуальное обоснование разработки и внедрения. Такое обоснование должно включать не только

оценку технико-экономической эффективности, но и обязательный индивидуальный расчет требуемого тока и режимов плавки, а также подбор характеристик применяемого силового оборудования системы.

8. Результаты диссертационной работы внедрены в проектную практику компании ООО «Проект-Электро», а также используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «СамГТУ». Дальнейшее развитие исследований может быть связано с созданием автоматизированной системы управления режимами плавки гололёда в реальном времени при использовании эксплуатирующими организациями при реконструкции и строительстве воздушных линий электропередачи 10 кВ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярославский Д.А., Садыков М.Ф. «Разработка устройства для системы мониторинга и количественного контроля гололёдообразования на воздушных линиях электропередачи» // Казанский государственный энергетический университет // Проблемы энергетики, 2017, том 19, № 3-4, с. 69-79.
2. Сацук Е.И. Программные и технические средства систем мониторинга гололедообразования и предотвращения гололедно-ветровых аварий // Доклады Всероссийской научно-практической конференции «Высокочастотная связь, электромагнитная совместимость, обнаружение и плавка гололеда на линиях электропередачи». Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. С. 208–222.
3. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах [Текст] / И.И. Левченко, А.С. Засыпкин, А.А. Аллилуев, Е.И. Сацук. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 494 с.
4. Левченко И.И., Гончаров П.В., Сацук Е.И., Шовкопляс С.С. // «Интеллектуальная система плавки гололеда на проводах и грозозащитных тросах воздушных линий электропередачи ПАО «МРСК Юга»// Электроэнергия, воздушные линии, №1 (46) 2018, с.72-82.
5. Бердников Р.Н., Горюшин Ю.А., Дементьев Ю.А., Засыпкин А.С., Левченко И.И., Сацук Е.И., Шовкопляс С.С. Способ плавки гололеда на проводах трехфазной воздушной линии электропередачи / Пат. 2465702 Рос. Федерация: МПК H02G7/16. № 2011123905; заявл. 14.06.11; опубл. 27.10.12. Бюл. № 30.
6. Левченко И.И., Засыпкин А.С., Иванченко П.А., Сацук Е.И., Шовкопляс С.С., Щуров А.Н. Установка для плавки гололеда на воздушных

линиях электропередачи / Пат. 2546643 Рос. Федерация: МПК H02G7/16. № 2013159314, заявл. 30.12.13; опубл. 10.04.15. Бюл. № 10.

7. Соловьев В. А., Сухоруков С. И., Черный С. П., Костин К. Е., Савельев Д. О. «Разработка интеллектуального модуля прогнозирования образования гололеда на проводах линий электропередач»// Учёные записки №III-1(23)// Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета// 2015, С.8.

8. Автоматическая система удаления льда с проводов линий электропередач [Текст] / А.В. Соловьев [и др.] // Инновационные технологии управления: монография. – Одесса: Куприенко С.В., 2013. – Гл. 1. – С. 6–31.

9. Р.Г. Минуллин, Э.Ю. Абдулназянов, В.А. Касимов, М.Р. Яруллин «Современные методы обнаружения гололеда на проводах воздушных линий электропередачи. Часть 1. Методы прогнозирования и взвешивания проводов»// Проблемы энергетики, 2013, № 7-8// Казанский госуларст.энерг.ун-т, Казань, 2013, с.68-78.

10. Минуллин Р.Г., Д.Ф. Губаев. «Обнаружение гололедных образований на линиях электропередачи локационным зондированием» / КГЭУ, 2010. – 208 с.

11. Бердников Р.Н., Горюшин Ю.А., Дементьев Ю.А., Засыпкин А.С., Левченко И.И., Сацук Е.И., Шовкопляс С.С. Способ плавки гололеда на проводах трехфазной воздушной линии электропередачи / Пат. 2465702 Рос. Федерация: МПК H02G7/16. № 2011123905; заявл. 14.06.11; опубл. 27.10.12. Бюл. № 30.

12. Дементьев, С.С. Диагностика состояния воздушных линий электропередачи с применением нейрокомпьютера [Текст] / С.С. Дементьев // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2017. – № 2 (19). – С. 21-26.

13. Пат. 2212744 Российская Федерация, МПК H 02 G 7/16. Устройство для измерения гололедной и ветровой нагрузок с контролем направления ветра на воздушных линиях электропередачи [Текст] / И.И.

Левченко, А.С. Засыпкин, А.А. Аллилуев, Е.В. Рябуха; Новочеркасский политехнический университет. – 2003.

14. Засыпкин А.С., Левченко И.И., Шовкопляс С.С. Система плавки гололеда на проводах коротких ВЛ от дискретно управляемой выпрямительной установки // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ: Передача и распределение, 2017, № 1(40). С. 64–72.

15. Панасенко М. В., Брыкин Д. А. Обзор используемых устройств обнаружения отложений для систем мониторинга воздушных линий электропередачи // Воздушные линии. 2012. № 3. С. 79–82.

16. Устройство обнаружения отложений на проводе промежуточного пролета воздушной линии электропередачи / Д.А. Брыкин, В.В. Петров, И.С. Скориков, С.Б. Стебеньков, Н.П. Хромов, Д.В. Яковлев; заявитель и патентообладатель ООО «НТЦ Инструмент-микро»; заявл. 09.02.2011; опубл. 20.07.2011.

17. Пат. 2273932 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16, Н 04 В 3/54. Устройство телеизмерения гололёдной, ветровой и гололёдно-ветровой нагрузок на провод промежуточного пролёта воздушной линии электропередачи с индикацией относительного направления ветра [Текст] / В.Я. Башкевич, М.П. Гапоненков, С.В. Аверьянов, В.И. Золотарёв, Г.Г. Угаров; Башкевич В.Я., Гапоненков М.П., Аверьянов С.В., Золотарёв В.И., Угаров Г.Г. – 2006.

18. Пат. 2273933 Российская Федерация, Н 02 G 7/16, Н 04 В 03/54, G 08 С 19/02. Аэродинамический способ обнаружения отложений на проводе промежуточного пролёта воздушной линии электропередачи и устройство для его осуществления [Текст] / В.Я. Башкевич; Башкевич В.Я. – 2006.

19. Горюнов В. Н., Гиршин С. С., Кузнецов Е. А., Петрова Е. В. Анализ погрешностей расчета температуры и потерь мощности по базовому и приближенному уравнениям теплового баланса воздушных линий электропередач // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 210.

20. Гиршин С. С., Горюнов В. Н., Бигун А. Я. Расчет нестационарных температурных режимов воздушных линий электропередачи с учетом нелинейности процессов теплообмена // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 287.

21. Morrow D. J., Fu J., Abdelkader S. M. Experimentally validated partial least squares model for dynamic line rating // IET Renewable Power Generation, April 2014. Vol. 8, no. 3. P. 260–268.

22. 2212744 Huu-Minh, Lilien Jean-Louis, Schell Peter. Dynamic line rating and ampacity forecasting as the keys to optimise power line assets with the integration of res. The European project Twenties Demonstration inside Central Western Europe // 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. CIRED. 2013. P. 1–5.

23. А.Г. Лютов, В.В. Карташев, Г.Э. Рахматуллина // «Моделирование способа плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи реактивными токами» // Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ), Уфа, 2014. — Т. 18, № 1 (62). — С. 17-24.

24. Иванова Г. Э., Лютов А. Г. // «Комплексная автоматизация плавки гололеда на ВЛ-10кВ без отключения потребителя от сети»// Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста. 2020. Уфа, с. 84-89.

25. Рогинская Л.Э., Карташев В.В., Лютов А.Г., Рахматуллина Г.Э. Моделирование установки для плавки гололеда с использованием реактивных токов на ВЛ 10 кВ ПС Альмухаметово ООО "Башкирэнерго" / Вопросы надежности работы систем электроснабжения в условиях гололедно-ветровых нагрузок. Материалы международной научно-практической конференции. 2016. Уфимский государственный авиационный технический университет (Уфа) 2016 г. с.76-81.

26. Засыпкин А.С., Щуров А.Н., Шовкопляс С.С. Схема с удлинителем для плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи // Изв. вузов. Электромеханика, 2013, № 3. С. 61–63.

27. А. Ю. Елизарьев, А. Р. Валеев // «Плавка гололеда на воздушных линиях электропередачи без отключения потребителей» // Вестник УГАТУ, №4 (70), 2015, с. 59-66.

28. М.Б. Гузаиров, В.А. Максимов, А. Р. Валеев // «Совершенствование систем плавок гололеда на высоковольтных ВЛ»// ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»// Уфа, с.1-6.

29. К.В. Бобин, А.Р. Валеев // «Методы борьбы с гололедными образованиями на проводах линий электропередачи и способы их обнаружения»// Уфимский государственный авиационный технический университет, с. 1-9.

30. Каганов В.И. Пат. № 2356148 «Способ и устройство для борьбы с гололедом на линиях электропередачи»// Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет) (МИРЭА), Москва, 2009.

31. Каганов, В.И. Борьба с гололедом в линиях электропередачи с помощью высокочастотной электромагнитной волны [Текст] / В.И. Каганов // Электро. – 2010. – № 5. – С. 41–45.

32. Каганов, В.И. Нагрев проводов электрических сетей с и помощью высокочастотной электромагнитной волны для борьбы с гололедом [Текст] / В.И. Каганов // Электро. – 2012. – № 3. – С. 21–25.

33. Способ и устройство для борьбы с гололедом на линиях электропередачи [Текст]: пат. 2356148 Рос. Федерация: МПК H02G 7/16 / В.И. Каганов; заявители и патентообладатели Моск. гос. ин-т радиотехн., электрон. и автом. (техн. ун-т), Каганов В.И. – № 2008119101/09; заявл. 15.05.2008; опубл. 20.05.2009, Бюл. № 14. – 13 с.

34. В. И. Каганов // «Предупреждение образования гололёда на проводах ЛЭП с помощью дискретного метода преобразования электромагнитной энергии в тепловую» // ЭНЕРГОБЕЗОПАСНОСТЬ И ОХРАНА ТРУДА №6 (48) // Московский институт радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА), 2012, с. 5-8.

35. Гуревич М.К., Репин А.В., Шершнев А.Ю., Шершнев Ю.А. Способ плавки гололеда на проводах ВЛ и устройство для его осуществления / Пат. 2435266 Рос. Федерация: МПК H02G7/16. № 2010128588/07; заявл. 25.06.10; опубл. 27.11.11. Бюл. № 33.

36. Антонов Б. М., Исакаев Э. Х., Королев В. А., Мордынский В. Б., Сон Э. Е., Терешонок Д. В., Тюфтяев А. С., Юсупов Д. И. «Мобильная установка для плавки гололеда на проводах высоковольтных линий электропередачи 110-220 кВ и ее энергоэффективность» // Научно – технический журнал «Энергия единой сети» №5 // 2012. с. 26-31.

37. Farzaneh M. Atmospheric Icing of Power Networks, edited by: Farzaneh, M., Springer Science. 2008. – 390 p.

38. Atmospheric Icing of Power Networks / Ed. M. Farzaneh. – Springer Netherlands, 2008. – 381 p.

39. Makkonen L. Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet-snow on structures, Phil. Trans. R. Soc. London. A358. 2913–2939. 2000.

40. Fikke S. Cost Action 727. Measuring and forecasting atmospheric icing on structures. // Proc. 11th International Workshop on Atmospheric icing of Structures, Montreal, Canada, Paper IW64. June 2005a.

41. Fikke S. Modern meteorology and atmospheric icing // Proc. 11th International Workshop on Atmospheric icing of Structures, Montreal, Canada, Paper IW73. June 2005b.

42. Olafsson H., Eliasson A. J., Thorsteins E. Orographic influence on wet-snow icing. Part 2: Downstream of mountains // Proc. 10th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Brno, Czech Republic, Paper 2-3. June 2002b.

43. Olafsson H., Eliasson A. J., Thorsteins E. Orographic influence on wet-snow icing, Part 1: Upstream of mountains // Proc. 10th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Brno, Check Republic, Paper 2-2. June 2002a.
44. Wareing B. J., Nygaard, B. E. WRF Simulation of wet snow and rime icing incidents in the UK // Proc. 13th International Workshop on Atmospheric icing of Structures, Andermatt, September 2009.
45. Sakamoto Y. Snow accretion on overhead wires. Phil. Trans. R. Soc. London, 358(1776). 2941–2970. 2000.
46. System for prediction and monitoring of ice shedding, antiicing and de-icing for overhead lines. CIGRE` Working Group B2.29, September 2009.
47. Nan Wen, Bo Yan, Zheyue Mou, Guizao Huang, Hanxu Yang, Xin Lv // « Prediction models for dynamic response parameters of transmission lines after ice-shedding based on machine learning method»// Electric Power Systems Research, Volume 202, January 2022, 107580, P.1-11.
48. Sullivan, C.R. Breaking the ice: de-icing power transmission lines with highfrequency, high-voltage excitation / C.R. Sullivan, V.F. Petrenko, J.D. McCurdy, V. Kozliouk // IEEE Ind. Appl. Mag. – Vol. 9, № 5. – 2003. – P. 49–54.
49. LineScout – Robot for Inspecting Live Transmission Lines [Электронный ресурс]. – URL: http://www.hydroquebec.com/innovation/en/pdf/2010G080-02A_LineScout.pdf (дата обращения: 24.07.2026).
50. RODAV – Remotely Operated De-icing All-weather Vehicle [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.hydroquebec.com/innovation/en/pdf/2008G269-08A-RODAV.pdf> (дата обращения: 24.07.2026).
51. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
52. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. — Изд. 5-е перераб. и доп. — М: Атомиздат, 1979. - 416 с.

53. Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие / И.А. Белов, С.А. Исаев, Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2001. 108 с.
54. Бургсдорд В.В., Никитина Л.Г., Никонец Л.А., Хрущ П.Р. «Методические указания по плавке гололеда переменным током» // «Служба передового опыта и информации СоюзЭнерго» – Москва: 1983, с. 115.
55. Рудакова, Р.М. Борьба с гололедом в электросетевых предприятиях [Текст] / Р.М. Рудакова, И.В. Вавилова, И.Е. Голубков. – Уфа: УГАТУ, 2005. – 187 с.
56. Российская Федерация. Министерство энергетики. Об утверждении Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации и о внесении изменений в приказы Минэнерго России от 13 сентября 2018 г. № 757, от 12 июля 2018 г. № 548 : Приказ Минэнерго России от 4 октября 2022 г. № 1070 : зарегистрировано в Минюсте России 6 декабря 2022 г. № 71384. – [Текст] / С. 197.
57. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е издание – М.: ЭНАС, 2019 – 672 с.
58. ГОСТ Р 59965-2021. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Системы плавки гололеда на проводах и грозозащитных тросах линий электропередачи. Выбор и обоснование принципиальных технических решений: национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 декабря 2021 г. № 1837-ст : введен впервые : дата введения 2022-03-01. – Москва : ФГБУ «РСТ», 2022. – 114 с. – [Текст].
59. Российская Федерация. Министерство энергетики. Об утверждении требований по плавке гололеда на проводах и грозозащитных тросах линий электропередачи: Приказ Минэнерго России от 19 декабря 2018 г. № 1185 (с изм. и доп.): зарегистрировано в Минюсте России 22 января 2019 г. № 53476. – [Текст] / С. 23.
60. Ледяной дождь в Ростовской области: без света остаются более

250 тысяч жителей. – Текст: электронный // Новые Известия: [сайт]. – 2024. – 10 февраля. – URL: <https://newizv.ru/news/2024-02-11/ledyanoy-dozhd-v-rostovskoy-oblasti-bez-sveta-ostayutsya-bolee-250-tysyach-zhiteley-427089> (дата обращения: 22.09.2026).

61. С начала сезона 2024/2025 гг. энергетики ПАО «Россети Волга» провели 364 плавки гололеда. – Текст: электронный // ПАО «Россети Волга»: официальный сайт. – 2025. – 17 марта. – URL: https://www.rossetivolga.ru/ru/o_kompanii/press_tsentr/novosti_kompanii/?id=13523 (дата обращения: 22.09.2026).

62. «Россети Северный Кавказ» провели 274 плавки гололеда на линиях электропередачи Ставрополя в 2024 году. – Текст: электронный // ПАО «Россети Северный Кавказ»: официальный сайт. – 2025. – URL: https://www.rossetisk.ru/press_center/company_news/rosseti-severnyy-kavkaz-proveli-274-plavki-gololeda-na-liniyakh-elektroperedachi-stavropolya-v-2024/ (дата обращения: 22.09.2026).

63. Что случилось в Мурманской области на ЛЭП — причины блэкаута. – Текст: электронный // Фонтанка.ру: [сайт]. – 2026. – 25 января. – URL: <https://www.fontanka.ru/2026/01/25/76232175/> (дата обращения: 22.09.2026).

64. Ущерб от ледяного дождя в Приморье предварительно оценили в 619 млн рублей. – Текст: электронный // ИА PrimaMedia: [сайт]. – 2020. – 3 декабря. – URL: <https://primamedia.ru/news/1030575/> (дата обращения: 22.09.2026).

65. Нижегородцам выплатили 500 млн рублей из-за ледяного дождя. – Текст: электронный // NewsNN.ru: [сайт]. – 2023. – 7 декабря. – URL: <https://newsnn.ru/news/2023-12-07/nizhegorodtsy-zarabotali-milliony-na-ledyanom-dozhde-3121612> (дата обращения: 22.09.2026).

66. Около 3 млрд выделили на реконструкцию электросетей в Нижегородской области. – Текст: электронный // Гипер НН (GiperNN): [сайт]. – 2023. – 7 декабря. – URL: <https://www.gipernn.ru/zhurnal/razvitie->

[regiona/novosti/okolo-3-mlrd-vydelili-na-rekonstrukciyu-elektrosetey-v-nizhegorodskoy-oblasti](#) (дата обращения: 22.09.2026).

67. Bonelli P., Lacavalla M. Experimental activity and investigation of wet-snow accretion on overhead power lines in Italy // Proc. 13th International Workshop on Atmospheric icing of Structures, Andermatt, September 2009.

68. Костюков Д.А., Кононов Ю.Г. Пат. № 2537851 «СПОСОБ БОРЬБЫ С ГОЛОЛЕДОМ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ»// Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «СевероКавказский федеральный университет», Ставрополь, 2012.

69. Санакулов А.Х., Ахметзянов И.Р. Пат. № 172348 «Устройство для удаления льда с проводов воздушных линий электропередач напряжением 110 кВ» // г. Набережные Челны, 2016.

70. Мясоедов Ю.В., Коржова О.Н. // «Плавка гололёда на линиях электропередачи: методы, инновации, эксплуатация» // Вестник АмГУ, №87, 2019, с. 65-66.

71. Руководящие указания по плавке гололеда на ВЛ напряжением до 20 кВ, проходящих в сельской местности [Текст]: РД 34.20.512–74. – Введ. 1972-11-04. – 1974.– 60 с.

72. Типовая инструкция по эксплуатации воздушных линий электропередачи напряжением 35-800 кВ [Текст]: РД 34.20.504-94. – Введ. 1996-01-01. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 200 с.

73. Линия электропередачи [Текст]: а. с. 1474776 СССР: МПК H02G 7/16 / Бернгардт Р.П. – № 379232424–63; заявл. 21.09.84; опубл. 23.04.89, Бюл. № 15. – 1 с.

74. Меладзе В.Р., Стрикалова Е.В. // «Плавка гололеда на ВЛ переменным и постоянным током, комбинированный и ультранизкочастотный методы»// «Донской государственный технический университет», 2020, с. 222-226.

75. LineROVer – Remotely Operated Vehicle for Work on Live Overhead Lines [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.hydroquebec.com/innovation/en/pdf/2010G080-40A-LineRover.pdf> (дата обращения: 24.07.2026).

76. Паныч Д.С. // «Предотвращение образования гололеда на контактной подвеске при помощи применения высокотехнологичного покрытия» // «Евразийский Научный Журнал №9 2016» (сентябрь) , с. 190-193.

77. Ковалев А. А., Кардаполов А. А. Применение высокотехнологичного покрытия для защиты системы токосъема в условиях воздействия внешней среды // Инновационный транспорт. — 2012. — № 2. — С. 8—12.

78. Мероприятия по защите проводов ВЛ от обледенения// Деловая слава России// электроэнергетика, с. 34-35.

79. Н.Ю. Шевченко, Г.Г. Угаров, С.Н. Кириллова, Ю.В. Лебедева // «Обзор и анализ конструктивных особенностей проводов воздушных линий электропередачи с повышенной стойкостью к гололедно-ветровым нагрузкам»// «Электроэнергия. Передача и распределение». 2019 г., № 3 (54). с. 64–69.

80. Патент РФ на полезную модель № 162423. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU162423U1_20160610 (дата обращения: 24.07.2026).

81. Патент РФ на изобретение № 2529530. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2529530C1_20140927 (дата обращения: 24.07.2026).

82. Патент РФ на изобретение № 2529539. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2529539C1_20140927 (дата обращения: 24.07.2026).

83. Патент РФ на изобретение № 2529546. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2529546C1_20140927 (дата обращения: 24.07.2026).
84. Патент РФ на изобретение № 2529550. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2529550C1_20140927 (дата обращения: 24.07.2026).
85. COMSOL: официальный сайт. – Текст: электронный. – URL: <https://www.comsol.com/> (дата обращения: 24.07.2026).
86. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / пер. со 2-го амер. перераб. изд. И. Г. Арамановича [и др.]; под общ. ред. И. Г. Арамановича. — М.: Наука, 1973. — 832 с.
87. РД 34.20.512-72. Руководящие указания по плавке гололеда на ВЛ напряжением до 20 кВ, проходящих в сельской местности / Минэнерго СССР. — М.: СЦНТИ ОРГРЭС, 1974. — 48 с.
88. Sturm, M. The thermal conductivity of seasonal snow / M. Sturm, J. Holmgren, M. König, K. Morris // Journal of Glaciology. — 1997. — Vol. 43, iss. 143. — P. 26–41. — DOI: 10.3189/S0022143000002781.
89. Thermalinfo.ru — Справочник по свойствам веществ и материалов: ресурсы данных в области физических и теплофизических свойств стали, алюминия и воздуха [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/> (дата обращения: 24.07.2026).
90. Базы данных по физическим свойствам: плотности, вязкости и удельной теплоемкости материалов [Электронный ресурс] // Thermalinfo.ru. — URL: <http://thermalinfo.ru/> (дата обращения: 24.07.2026).
91. Механика жидкости и газа. Спецглавы : учеб. пособие / [В. Е. Щерба и др.]; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2020. – 92 с.
92. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. — 11-е изд., перераб. и доп. — М.: Юрайт, 2012. — С. 317.

93. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети: учебник для вузов / — Москва: Энергоатомиздат, 1989. — 592 с.

94. Егоров, К. С. Исследование режимов плавки для удаления гололедных образований на грозозащитных тросах с оптоволоконным кабелем / К. С. Егоров, С. И. Каськов. — Текст: электронный // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2013. — Вып. 5. — URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/crigen/725.html> (дата обращения: 22.09.2026).

95. Оптимизация выбора устройств предупредительного подогрева неизолированных проводов воздушных линий электропередачи в гололедоопасный период / И. И. Бандурин, И. Н. Козырев, В. М. Коробов [и др.]. — [Текст] / С. 10.

96. Информационные системы, банки данных в области опор линий электропередачи, проводов, тросов и других изделий для ЛЭП [Электронный ресурс]. — URL: <https://linijaopory.ru/> (дата обращения: 24.07.2026).

97. Положение о Единой технической политике в электросетевом комплексе ПАО «Россети»: утверждено Советом директоров ПАО «Россети» (протокол от 23.12.2020 № 438) // ПАО «Россети»: официальный сайт. — URL: <https://www.rosseti.ru/investment/science/tech/doc/tehpolitika.pdf> (дата обращения: 22.09.2026). — Текст: электронный.

98. Государственный стандарт «Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи» // ГОСТ 839-2019. — Москва, 2019, С. 24, 34-35.

99. Базаров А.А., Данилушкин А.И., Осипов В.С. «Система плавки гололёда на проводах линии электропередачи без отключения нагрузки» // «Вестник СамГТУ», 2015, №3, с.109-117.

100. Информационные системы, банки данных в области кабельной продукции и проводников 6-35 кВ [Электронный ресурс]. — URL: <https://e-kc.ru/> (дата обращения: 24.07.2026).

101. Информационные системы, банки данных в области силовых

трансформаторов 6-35 кВ. [Электронный ресурс] – URL: <https://mopra.ru/> (дата обращения 24.07.2026).

102. РТМ 36.18.32.4-92. Указания по расчету электрических нагрузок : утв. ВНИПИ Тяжпромэлектропроект 25.06.92 : введ. в действие 01.01.93. — Москва, 1992. — 18 с.

103. Информационные системы, банки данных в области конденсаторных батарей и УКРМ 6-10 кВ. [Электронный ресурс] – URL: <https://slavenergo.ru/> (дата обращения 24.07.2026).

104. Информационные системы, банки данных в области силового электрооборудования, токоограничивающих и шунтирующих реакторов 6-35 кВ. [Электронный ресурс] – URL: <https://erso.group/> (дата обращения 24.07.2026).

105. Информационные системы, банки данных в программного обеспечения для проектирования, анализа и моделирования электрических схем [Электронный ресурс] – URL: <https://electronicworkbenchwb.com/> (дата обращения 24.07.2026).

106. Информационные системы, банки данных в области вакуумных выключателей 6-10 кВ, ОПН 6-10 кВ [Электронный ресурс] – URL: <https://tavrida.ru/> (дата обращения 04.03.2026).

107. Информационные системы, банки данных в области эксплуатации электрических сетей [Электронный ресурс] – URL: <https://www.rosseti.ru/> (дата обращения 24.07.2026).

108. Информационные системы, банки данных в области систем мониторинга образования гололёда [Электронный ресурс] – URL: <https://antraks.ru/> (дата обращения 24.07.2026).

109. Приказ ОАО РАО «ЕЭС России» от 31.03.2008 N 155 «Методические рекомендации по оценке эффективности и разработке инвестиционных проектов и бизнес-планов в электроэнергетике на стадии предТЭО И ТЭО (с типовыми примерами)».

110. Информационные системы, банки данных в области опор и

арматуры ЛЭП 6-10 кВ [Электронный ресурс] – URL: <https://www.pulscen.ru/> (дата обращения 24.07.2026).

111. Будко, С. И. Обоснование выбора метода обнаружения образования гололеда на проводах ЛЭП / С. И. Будко, Н. Р. Штукатуров // Мировые тенденции развития науки и техники: пути совершенствования : материалы X Международной научно-практической конференции (г. Москва, 29 декабря 2022 г.) : в 3 ч. Ч. 1. — Москва : ООО «Пресс-центр», 2022. — С. 179–184.

112. Будко, С. И. Постановка задачи моделирования тепловых процессов при разработке системы плавки гололеда на проводах ЛЭП 10 кВ без отключения нагрузки / С. И. Будко // Бутаковские чтения: материалы II Всероссийской с международным участием молодежной конференции. — Томск: Изд-во ТПУ, 2022. — С. 206–209.

113. Базаров, А. А. Математическое моделирование электромагнитных процессов в системе плавки гололёда на проводах ЛЭП / А. А. Базаров, С. И. Будко, Н. Р. Штукатуров // Заметки учёного. — Ростов-на-Дону: ИУБиП, 2023. — С. 134–139.

114. Будко, С. И. Математическое моделирование тепловых процессов нагрева и проплавления ледяной оболочки на проводах ЛЭП / С. И. Будко, Д. В. Колпаков, Н. Р. Штукатуров // Наука и образование в новых реалиях: проблемы, дискуссии, пути совершенствования: материалы XXXII Всероссийской научно-практической конференции (11 декабря 2023 г.). — Ростов-на-Дону: ООО «МАНУСКРИПТ», 2023. — С. 147–151.

115. Будко, С. И. Математическое моделирование тепловых процессов при плавке гололёда на проводах ЛЭП / С. И. Будко // Научно-исследовательские публикации. — Воронеж: ООО «Вэлборн», 2023. — С. 34–41.

116. Базаров, А. А. Моделирование тепловых процессов при плавке гололеда на линии электропередачи / А. А. Базаров, С. И. Будко // Вестник

Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. — 2023. — Т. 31, № 4. — С. 49–67.

117. Базаров, А. А. Математическое моделирование тепловых процессов подогрева в ледяной оболочке на проводе при различных погодных условиях / А. А. Базаров, С. И. Будко // Автоматизация, энергетика и машиностроение: технологии и инновации: материалы Международной научно-технической конференции. — 2024. — С. 158–161.

118. Базаров, А. А. Исследование термогидродинамических процессов в воздушной среде в системе плавки гололёда на проводах линии электропередачи / А. А. Базаров, С. И. Будко // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. — 2024. — Т. 32, № 3. — С. 81–99.

119. Базаров, А. А. Определение параметров термогидродинамических процессов в системе плавки гололёда на проводах линии электропередачи / А. А. Базаров, С. И. Будко, Д. В. Колпаков, Н. Р. Штукатуров // Вопросы науки. — 2024. — № 4. — С. 66–75.

120. Базаров, А. А. Моделирование процесса проплавления ледяной оболочки на проводах / А. А. Базаров, С. И. Будко, Д. В. Колпаков, Н. Р. Штукатуров // Нанотехнологии: наука и производство. — 2024. — № 6. — С. 61–67.

121. Базаров, А. А. Математическое моделирование теплового процесса нагрева голых проводов в режиме плавки гололёда / А. А. Базаров, С. И. Будко // Нанотехнологии: наука и производство. — 2025. — № 3. — С. 75–81.

122. Базаров, А. А. Математическое моделирование теплового процесса нагрева проводов для предупреждения образования гололёда на воздушных ЛЭП / А. А. Базаров, С. И. Будко // Нанотехнологии: наука и производство. — 2025. — № 4. — С. 65–82.

123. Базаров, А. А. Математическое моделирование теплового процесса в ледяной оболочке на проводах ЛЭП в различных погодных

условиях / А. А. Базаров, С. И. Будко // Научно-исследовательские публикации. — 2025. — № 2. — С. 20–25.

124. Будко, С. И. Экспериментальное подтверждение результатов моделирования процесса плавки гололёда на проводе АС-50 / С. И. Будко // Современная наука: теоретический и практический взгляд: материалы Международной научно-практической конференции (г. Астана, 16 июня 2026 г.). — Астана, 2026. — С. 24–29.

125. Базаров, А. А. Расчет и выбор силового электрооборудования для системы плавки гололёда без отключения нагрузки / А. А. Базаров, С. И. Будко // Нанотехнологии: наука и производство. — 2025. — № 5. — С. 12–22.

126. Будко, С. И. Электротехнический комплекс плавки гололёда для воздушных линий 10 кВ, питающих нетяговых потребителей железнодорожного транспорта / С. И. Будко // Теоретические и практические аспекты развития современной науки: материалы Международной научно-практической конференции (г. Нефтекамск, 28 мая 2026 г.). — Нефтекамск, 2026. — С. 3.

127. Будко, С. И. Расчет и выбор силового электрооборудования для системы плавки гололёда без отключения нагрузки / С. И. Будко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2026. — Вып. 7. — С. 277 – 291.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А Документы о внедрении результатов диссертационной работы

Приложение А.1 Акт внедрения ФГБОУ ВО «СамГТУ»



«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор-проректор

по учебной работе ФГБОУ ВО «СамГТУ»

/ Овчинников Д.Е. /

«01» 09 2026 г.

об использовании результатов диссертационной работы Будко С.И.
«Электротехнический комплекс системы плавки гололёда на проводах
линий электропередач без отключения нагрузки»

Настоящий акт составили представители Самарского государственного
технического университета:

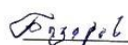
- заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Зубков Ю.В.;
 - профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Базаров А.А.;
 - доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Обухова А.В.;
- о том, что результаты диссертационной работы Будко С.И.:
- математические модели электромагнитных, тепловых процессов в проводниках ЛЭП и окружающей среды при плавке гололёда;
 - математическая модель термогидродинамических процессов в воздушной среде для определения параметров теплообмена;
- использованы в учебном процессе кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», а также при выполнении квалификационных работ бакалаврами и магистрами кафедры.

Зав. каф. «Электроснабжение
промышленных предприятий»

Проф. каф. «Электроснабжение
промышленных предприятий»

Доц. каф. «Электроснабжение
промышленных предприятий»

 / Зубков Ю.В. /

 / Базаров А.А. /

 / Обухова А.В. /

Приложение А.2 Акт внедрения ООО «Проект-Электро»



ИНН 6315023355 КПП 631101001
443017, г. Самара, ул. Структурная, 68
тел/факс: (846) 998-66-63, 998-66-65
Web-сайт: www.sampe.ru
e-mail: proekt.elektro@bk.ru

«УТВЕРЖДАЮ»
Генеральный директор ООО «Проект-Электро»
/ Попов А.А. /
08 2026 г.
АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Будко С.И.
«Электротехнический комплекс системы плавки гололёда на проводах
линий электропередач без отключения нагрузки»

Комиссия в составе:

- председатель комиссии: Генеральный директор ООО «Проект-Электро» Попов А.А.

- члены комиссии: Начальник отдела проектирования ООО «Проект-Электро» Губер С.А., Инженер-проектировщик ООО «Проект-Электро» Скольский А.В.

составила акт о том, что результаты диссертационной работы Будко С.И., представленные на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы при разработке проектной документации в рамках работ по реконструкции, при проектировании вновь вводимых энергетических объектов, а также при реализации мероприятий по повышению надежности сетей электроснабжения промышленных предприятий в Самарской области (в т.ч. г. Самаре) и других объектов на территории РФ. В проектной практике были реализованы методики расчета и выбора силового электрооборудования для систем плавки гололёда и математическое моделирование электрических процессов, возникающих при проектировании объектов энергетики.

Комиссией решено рекомендовать к внедрению предложенные Будко С.И. методики расчета и выбора оборудования, а также производство математического моделирования в проектную практику ООО «Проект-Электро».

Генеральный директор
ООО «Проект-Электро»
Начальник отдела проектирования
ООО «Проект-Электро»
Инженер-проектировщик
ООО «Проект-Электро»

/ Попов А.А. /
/ Губер С.А. /
/ Скольский А.В. /

Приложение Б

Моделирование тепловых процессов в системе «провод – ледяная оболочка»

Таблица ПБ.1

Результаты решения тепловой задачи нагрева ледяной оболочки при температуре окружающей среды -10 °С и усредненным конвективным теплообменом

Скорость ветра, м / с	t, c	$T_{раз}, ^\circ C$	$T_{стац}, ^\circ C$	$q, Вт / м$
$I_{\partial\partial}, d_{лед.обл.} = 20 мм$				
0	5000	-1,3÷8,4	45,9÷59,1	3,72
5	9000	-5,8÷2,3	-5,8÷2,3	25,00
10	12000	7,8÷0,3	7,8÷0,3	24,99
20	16000	-8,5÷-1,0	-8,5÷-1,0	24,98
$I_p = 2 \cdot I_{\partial\partial}, d_{лед.обл.} = 20 мм$				
0	800	-1,2÷36,7	215÷267,8	4,11
5	1200	-2,4÷34,8	13,37÷66,1	33,45
10	1350	-3,8÷33,9	5,4÷58,1	50,65
20	1500	-4,6÷31,9	0,15÷325,5	66,67

Таблица ПБ.2

Результаты решения тепловой задачи нагрева ледяной оболочки при температуре окружающей среды -5 °С с конвективным теплообменом на боковой поверхности

Скорость ветра, м / с	t, c	$T_{раз}, ^\circ C$	$T_{стац}, ^\circ C$	$q, Вт / м$
$I_{\partial\partial}, d_{лед.обл.} = 20 мм$				
5	7500	-1,5÷11,3	4,0÷22,4	10,81
10	9500	-1,1÷10,9	0,9÷19,5	14,63
20	12500	-2,5÷10,8	-1,2÷16,2	19,72
$I_p = 2 \cdot I_{\partial\partial}, d_{лед.обл.} = 20 мм$				
5	2300	-1,4÷48,9	31,3÷105,3	3,89
10	3500	-1,1÷51,8	18,9÷93,5	52,90
20	2700	-2,3÷49,0	10,6÷85,2	13,85

Таблица ПБ.3

Результаты решения тепловой задачи нагрева ледяной оболочки при температуре окружающей среды $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ с конвективным теплообменом на боковой поверхности

<i>Скорость ветра, м / с</i>	<i>t, с</i>	<i>T_{раз}, °C</i>	<i>T_{стац}, °C</i>	<i>q, Вт / м</i>
<i>I_{до}, d_{лед.обл.} = 20 мм</i>				
5	8000	-3,9÷8,4	-1,4÷16,4	19,76
10	12000	-4,1÷4,6	-4,7÷7,0	23,58
20	15000	-6,3÷2,8	-6,3÷2,8	25,19
<i>I_p = 2 · I_{до}, d_{лед.обл.} = 20 мм</i>				
5	3000	-2,2÷44,9	25,7÷99,8	17,36
10	3500	-2,5÷54,9	13,5÷88,1	25,63
20	3700	-2,7÷58,0	5,3÷79,9	46,96

Приложение В

Моделирование тепловых процессов в системе «провод – ледяная оболочка»

Таблица ПВ.1

Результаты решения тепловой задачи нагрева ледяной оболочки при температуре окружающей среды -5 °С с усредненным конвективным теплообменом

<i>Скорость ветра, м / с</i>	<i>t, с</i>	<i>T_{раз}, °C</i>	<i>q, Вт / м</i>
<i>I_{од}, d_{лед.обл.} = 20 мм</i>			
5	7500	-1,4 ÷ 5,0	19,40
10	8500	-2,7 ÷ 2,9	24,84
20	10500	-3,6 ÷ -1,8	26,43
<i>I_р = 2 · I_{од}, d_{лед.обл.} = 20 мм</i>			
5	5000	18,2 ÷ 50,9	101,89
10	5000	10,7 ÷ 43,6	104,31
20	5700	5,4 ÷ 38,3	104,53

Таблица ПВ.2

Результаты решения тепловой задачи нагрева ледяной оболочки при температуре окружающей среды -10 °С с усредненным конвективным теплообменом

<i>Скорость ветра, м / с</i>	<i>t, с</i>	<i>T_{раз}, °C</i>	<i>q, Вт / м</i>
<i>I_{од}, d_{лед.обл.} = 20 мм</i>			
П	8500	-5,9 ÷ -2,0	26,43
10	8500	-7,9 ÷ -4,0	26,44
20	13500	-8,6 ÷ -6,7	26,44
<i>I_р = 2 · I_{од}, d_{лед.обл.} = 20 мм</i>			
5	5500	12,6 ÷ 45,1	100,83
10	5500	-1,9 ÷ 34,2	114,71
20	5500	-2,8 ÷ 26,8	89,45

Таблица ПВ.3

Результаты решения тепловой задачи нагрева ледяной оболочки при температуре окружающей среды -5°C с боковым конвективным теплообменом

Скорость ветра, м / с	$t, \text{с}$	$T_{\text{раз}}, ^{\circ}\text{C}$	$q, \text{Вт} / \text{м}$
$I_{\text{од}}, d_{\text{лед.обл.}} = 20 \text{ мм}$			
5	5500	$-1,4 \div 5,6$	11,07
10	6500	$-1,00 \div 5,3$	14,98
20	9000	$-2,5 \div 4,8$	19,60
$I_p = 2 \cdot I_{\text{од}}, d_{\text{лед.обл.}} = 20 \text{ мм}$			
5	4000	$23,5 \div 64,0$	78,35
10	4200	$-1,1 \div 27,4$	11,35
20	4500	$-2,5 \div 36,4$	24,50

Таблица ПВ.4

Результаты решения тепловой задачи нагрева ледяной оболочки при температуре окружающей среды -10°C с боковым конвективным теплообменом

Скорость ветра, м / с	$t, \text{с}$	$T_{\text{раз}}, ^{\circ}\text{C}$	$q, \text{Вт} / \text{м}$
$I_{\text{од}}, d_{\text{лед.обл.}} = 20 \text{ мм}$			
5	8500	$-2,2 \div 3,9$	20,97
10	8500	$-4,8 \div 0,8$	26,03
20	13500	$-6,6 \div -2,1$	26,43
$I_p = 2 \cdot I_{\text{од}}, d_{\text{лед.обл.}} = 20 \text{ мм}$			
5	5000	$20,8 \div 64,8$	86,37
10	5000	$10,0 \div 55,0$	88,60
20	5200	$2,2 \div 49,9$	93,48

Приложение Г

Моделирование тепловых процессов имитации проплавления в системе «провод – ледяная оболочка» с заданной скоростью оболочки

Таблица ПГ.1

Результаты решения тепловой задачи проплавления ледяной оболочки при температуре окружающей среды -5 °С с усредненным конвективным теплообменом

Скорость ветра, м / с	t, c	$T_{раз}, ^\circ C$
$I_{\partial\partial}, d_{лед.обл.} = 20 мм$		
5	5500	-2,8÷1,7
10	8500	-2,4÷1,4
20	9000	-3,6÷-1,8
$I_p = 2 \cdot I_{\partial\partial}, d_{лед.обл.} = 20 мм$		
5	5000	-1,6÷34,3
10	5000	-1,4÷33,0
20	5000	-2,8÷26,6

Таблица ПГ.2

Результаты решения тепловой задачи проплавления ледяной оболочки при температуре окружающей среды -10 °С с усредненным конвективным теплообменом

Скорость ветра, м / с	t, c	$T_{раз}, ^\circ C$
$I_{\partial\partial}, d_{лед.обл.} = 20 мм$		
5	8000	-5,9÷-2,0
10	10000	-7,9÷-4,0
20	11000	-8,5÷-6,7
$I_p = 2 \cdot I_{\partial\partial}, d_{лед.обл.} = 20 мм$		
5	8000	-2,1÷17,2
10	8000	-3,3÷14,9
20	8000	-4,2÷12,0

Таблица ПГ.3

Результаты решения тепловой задачи проплавления ледяной оболочки при температуре окружающей среды -5 °С с боковым теплообменом

<i>Скорость ветра, м / с</i>	<i>t, с</i>	<i>T_{раз}, °С</i>
$I_{\partial\partial}, d_{\text{лед.обл.}} = 20\text{мм}$		
5	5500	-2,9÷2,1
10	5500	-2,6÷1,9
20	5500	-2,1÷1,6
$I_p = 2 \cdot I_{\partial\partial}, d_{\text{лед.обл.}} = 20\text{мм}$		
5	5500	20,0÷60,6
10	5000	-2,0÷49,2
20	5500	-1,7÷46,0

Таблица ПГ.4

Результаты решения тепловой задачи проплавления ледяной оболочки при температуре окружающей среды -10 °С с боковым теплообменом

<i>Скорость ветра, м / с</i>	<i>t, с</i>	<i>T_{раз}, °С</i>
$I_{\partial\partial}, d_{\text{лед.обл.}} = 20\text{мм}$		
5	7500	-2,1÷3,4
10	9500	-4,8÷0,8
20	11500	-6,6÷-2,1
$I_p = 2 \cdot I_{\partial\partial}, d_{\text{лед.обл.}} = 20\text{мм}$		
5	7000	24,5÷72,0
10	7000	13,2÷61,5
20	7000	5,4÷54,3

Приложение Д

Моделирование тепловых процессов имитации проплавления в системе «провод – ледяная оболочка» с движущимся проводом

Таблица ПД.1

Результаты решения тепловой задачи проплавления ледяной оболочки при температуре окружающей среды $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ с боковым теплообменом

<i>Скорость ветра, м / с</i>	<i>$\vartheta_{\text{лед.обл.}}$, мм / сек</i>	<i>t, с</i>	<i>$T_{\text{раз}}, ^{\circ}\text{C}$</i>
<i>$I_{\text{од}}, d_{\text{лед.обл.}} = 20\text{ мм}$</i>			
5	0,1	5000	-1,53÷2,17
	0,2	3000	-1,39÷1,27
	1	3000	-1,46÷1,36
<i>$I_p = 298\text{ A}, Q = 52,9\text{ Вт / м}, d_{\text{лед.обл.}} = 20\text{ мм}$</i>			
5	1	3000	0,1÷9,21
	2	3000	0,09÷8,98
	2, рыхлый лёд	3000	0,59÷17,27

Приложение Е

Моделирование проплавления ледяной оболочки в зависимости от её физических свойств и толщины

Таблица ПЕ.1

Результаты расчётов для выбора скорости проплавления

Скорость плавления, мм / с	t, с	T _{провода} , °C	T _{оболочки} , °C
I _p = 210 A, Q = 26,45 Вт / м, d _{лед.обл.} = 20 мм, без ветра			
0,1	3000	1,73	-1,99÷1,78
0,2		1,74	-1,99÷1,78
0,5		0,48	-1,86÷0,47
1		0,33	-1,37÷0,32
2		0,38	-1,28÷0,37
I _p = 298 A, Q = 52,9 Вт / м, d _{лед.обл.} = 20 мм, без ветра			
0,1	3000	8,86	0,32÷8,55
0,2		8,14	0,20÷7,70
0,5		7,73	0,27÷7,30
1		7,74	0,24÷7,31
2		4,22	0,1÷3,96
3		4,20	0,08÷3,64
5		4,11	0,07÷3,30
7		3,99	0,06÷3,21

Таблица ПЕ.2

Результаты математического моделирования тепловых процессов
в ледяной оболочке провода с ледяной оболочкой 2 мм

<i>Скорость ветра, м / с</i>	$T_{min}, [^{\circ}C]$	$T_{max}, [^{\circ}C]$	$t_{плавки}, [с]$
<i>плотный лёд</i>			
0	60,22	61,22	700
1	37,40	39,55	700
5	30,85	35,27	1000
10	21,03	25,84	1500
15	15,67	20,53	1500
20	12,53	17,40	2500
<i>рыхлый лёд</i>			
0	52,86	53,74	500
1	52,71	55,74	900
5	33,39	37,63	1900
10	21,10	27,45	2000
15	15,68	21,10	2100
20	12,53	17,97	2800

Таблица ПЕ.3

Результаты математического моделирования тепловых процессов
в ледяной оболочке провода с ледяной оболочкой 5 мм

<i>Скорость ветра, м / с</i>	$T_{min}, [^{\circ}C]$	$T_{max}, [^{\circ}C]$	$t_{плавки}, [с]$
<i>плотный лёд</i>			
0	99,99	103,69	2500
1	6,68	10,21	3000
5	27,25	36,97	3100
10	5,23	11,15	3200
15	9,18	18,21	3300
20	3,04	12,67	3700
<i>рыхлый лёд</i>			
0	134,69	139,50	2500
1	40,86	47,30	3000
5	9,91	19,18	3100
10	9,42	16,82	3200
15	12,55	23,76	3500
20	9,55	21,18	3700

Таблица ПЕ.4

Результаты математического моделирования тепловых процессов
в ледяной оболочке провода с ледяной оболочкой 10 мм

<i>Скорость ветра, м / с</i>	$T_{min}, [^{\circ}C]$	$T_{max}, [^{\circ}C]$	$t_{плавки}, [с]$
<i>плотный лёд</i>			
0	9,44	21,50	3500
1	27,90	36,91	4500
5	19,15	32,43	4500
10	12,19	26,92	4800
15	8,21	23,58	4900
20	6,32	21,89	5000
<i>рыхлый лёд</i>			
0	97,17	105,96	3500
1	19,83	27,92	4500
5	12,88	27,24	4500
10	12,33	29,16	4800
15	8,47	25,77	4900
20	6,44	23,76	5000

Таблица ПЕ.5

Результаты математического моделирования тепловых процессов
в ледяной оболочке провода с ледяной оболочкой 15 мм

<i>Скорость ветра, м / с</i>	$T_{min}, [^{\circ}C]$	$T_{max}, [^{\circ}C]$	$t_{плавки}, [с]$
<i>плотный лёд</i>			
0	5,07	16,27	4200
1	4,04	15,69	4900
5	3,09	17,65	5500
10	2,60	16,52	5700
15	2,25	13,11	6200
20	3,41	18,87	6500
<i>рыхлый лёд</i>			
0	8,93	29,41	4300
1	23,70	37,68	5000
5	7,94	28,75	5700
10	7,45	24,89	5900
15	4,96	23,59	6400
20	4,54	24,26	6800

Приложение Ж

Моделирование теплового процесса нагрева голых проводов в режимах плавки и профилактическом

Таблица ПЖ.1

Результаты математического моделирования тепловых процессов нагрева голого провода в профилактическом режиме

<i>Скорость ветра, м / с</i>	$T_{уст}, [^{\circ}C]$	$t_{плавки}, [с]$
$t_{окр.ср.} = -5^{\circ}C$		
5	5,90	5000
10	2,40	
15	0,90	
20	-1,93	
$t_{окр.ср.} = -10^{\circ}C$		
5	0,74	5000
10	-3,25	
15	-5,74	
20	-6,90	

Таблица ПЖ.2

Результаты математического моделирования тепловых процессов нагрева голого провода при протекании длительно-допустимого тока

<i>Скорость ветра, м / с</i>	$T_{уст}, [^{\circ}C]$	$t_{плавки}, [с]$
$t_{окр.ср.} = -5^{\circ}C$		
5	16,80	5000
10	9,71	
15	6,65	
20	4,86	
$t_{окр.ср.} = -10^{\circ}C$		
5	11,48	5000
10	4,50	
15	1,48	
20	-1,72	

Таблица ПЖ.3

Результаты математического моделирования тепловых процессов
нагрева голого провода при протекании двойным длительно-допустимым током

<i>Скорость ветра, м / с</i>	$T_{уст}, [^{\circ}C]$	$t_{плавки}, [с]$
$t_{окр.ср.} = -5^{\circ}C$		
5	81,38	5000
10	53,30	
15	41,18	
20	34,10	
$t_{окр.ср.} = -10^{\circ}C$		
5	75,14	5000
10	47,45	
15	35,50	
20	28,51	

Таблица ПЖ.4

Результаты математического моделирования тепловых процессов
нагрева голого провода при протекании расчетного тока

<i>Скорость ветра, м / с</i>	$T_{уст}, [^{\circ}C]$	$t_{плавки}, [с]$
$t_{окр.ср.} = -5^{\circ}C$		
5	38,58	5000
10	24,42	
15	18,30	
20	14,73	
$t_{окр.ср.} = -10^{\circ}C$		
5	32,96	5000
10	18,99	
15	12,96	
20	9,43	

Приложение 3

Методики численного моделирования тепловых и термогидродинамических процессов

Для комплексного анализа параметров системы плавки гололеда потребовалась реализация двух взаимосвязанных математических моделей: тепловой (для оценки динамики нагрева провода и проплавления ледяной муфты) и термогидродинамической (для детального учета конвективного теплообмена при обдуве ветром). Обе методики реализованы методом конечных элементов в программном комплексе COMSOL Multiphysics [75]. Ниже представлены исходные данные, настройки решателей и способы обработки результатов для каждой из созданных моделей.

Приложение 3.1

Методика моделирования тепловых процессов в системе «провод – ледяная оболочка – окружающая среда»

Для расчёта температурных полей, времени прогрева и проплавления ледяной оболочки были выполнены расчеты тепловой задачи в нестационарной (и стационарной) постановках в программном пакете COMSOL Multiphysics. Приведена методика, позволяющая воспроизвести эти расчёты.

1. Исходные данные

Геометрия. Модель создаётся в двумерной постановке (плоская задача) задаются: диаметр провода (для АС-50/8 - 9,6 мм); толщина ледяной

оболочки (подбиралась в от 2 до 20 мм); при необходимости оболочка разбивается на две подобласти (например, 5 мм + 15 мм) – это не меняет физики, но позволяет задать контрольную точку на фиксированном расстоянии (например, 2 мм от провода) для более точного отслеживания прогрева.

Свойства материалов. Все свойства задаются как функции температуры, чтобы учесть фазовый переход «лёд–вода» в интервале 2 °С. Для льда используются следующие аналитические выражения (функция $flc1hs$ (ступенчатая функция Хевисайда) обеспечивает сглаженный переход):

$$\begin{aligned} & \text{теплопроводность} \quad - \\ k &= 2.24 - 1.68 * flc1hs(T - 273.1) (Вт / (м·К)) \quad ; \quad \text{плотность} \quad - \\ \rho &= 917 + 83 * flc1hs(T - 273.1) (кг / м³) \quad ; \quad \text{теплоёмкость} \quad - \\ C &= 2120 + 165000 * (flc1hs(T - 273.1) - flc1hs(T - 275.1)) + \\ &+ 2100 * flc1hs(T - 275.1) (Дж / (кг·К)). \end{aligned}$$

Для модели моножильного провода с эквивалентными теплофизическими свойствами (АС-50/8) в расчётном режиме (ток 298 А, погонная мощность 52,9 Вт/м) заданы постоянные эффективные свойства, полученные объёмным усреднением характеристик алюминиевых и стальных жил с учётом воздушных зазоров: теплопроводность – $k = 177 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$; плотность – $\rho = 3443 \text{ кг} / \text{м}^3$; теплоёмкость – $C = 826 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$; объёмная мощность тепловыделения – $Q = 350687 \text{ Вт} / \text{м}^3$.

Граничные и начальные условия. На внешней поверхности оболочки задаётся конвективный теплообмен с окружающим воздухом. Коэффициент теплообмена h рассчитывается по критериальным формулам (Рейнольдса, Прандтля) для скоростей ветра от 1 до 20 м/с. Начальная температура всей системы (T_{inf}) принимается равной температуре воздуха (обычно -5 °С или -10 °С).

Учёт движения при проплавлении. В расчетах задается скорость ледяной оболочки ($u = -0,000005 \text{ м/с}$ для 210 А и $u = -0,000001 \text{ м/с}$ для 420 А). В уточнённой модели задается скорость провода с помощью ступенчатой функции: $u = 0.0001 \cdot \text{flc1hs}(t - 4000, 1)$. Выражение в скобках $(t - 4000, 1)$ означает, что движение начинается через 4000 секунд после начала нагрева, интервал между нулевой и конечной скоростью равен 1 секунде. Число перед скобкой равно заданной скорости - 0,0001 м/с. Это имитирует подъём провода вверх после расплавления прилегающего слоя льда.

2. Конечно-элементная сетка

Используется свободная триангуляция (треугольные элементы). Базовые размеры: в проводе: $0,001 \text{ м}(1 \text{ мм})$; в ледяной оболочке: $0,0002 \text{ м}(0,2 \text{ мм})$.

При необходимости выполняется локальное сгущение вблизи границы раздела «провод–лёд», где градиенты температур максимальны. Выбор именно таких размеров – результат предварительных тестов.

3. Настройка решателя

Нестационарная задача (основной расчёт). Решатель *Time Dependent (BDF, порядок 2)* . Шаг по времени подбирался: для быстрых процессов (нагрев голого провода) и длительных процессов с фазовым переходом - 0.2-2с (например, $\text{range}(0, 0.2, 3000)$).

Относительная погрешность - 0,001, абсолютная – 0,1. Для нелинейных задач (фазовый переход) включалось демпфирование с максимальным числом итераций 25.

Стационарная задача. Решать *Stationary (MUMPS)* . Относительная погрешность $1e - 6$.

4. Обработка результатов

Контрольные точки - в зависимости от задачи задавались точки на разных расстояниях от поверхности провода: 0 (граница), 0,5; 2; 3; 4; 5; 7; 8; 10; 12; 14; 15; 17; 19; 20 мм. Для параграфа 3.5 была введена дополнительная точка на 2 мм.

Визуализация - пространственные распределения температуры строились в конечные моменты времени или на промежуточных срезах (500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 с). Использовалась цветовая гамма *rainbow*. Для наглядности на некоторых рисунках (например, рисунки 3.8, 3.18) применялась комбинированная визуализация (цветная + обесцвеченная) с наложением контурных линий (10 уровней).

Временные диаграммы - строились графики $T(t)$ для каждой контрольной точки. Это позволяет определить момент достижения $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (начала плавления) и температуру в любой момент времени.

Определение времени полного проплавления- фиксируется момент, когда температура во всех точках ледяной оболочки становится положительной ($T > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$).

5. Оценка достоверности численного решения

Расчет стационарного процесса: сравнение стационарного расчёта для голого провода с аналитическим решением показало хорошее согласие.

Сеточная сходимость: уменьшение размера элементов привело к незначительному изменению температур (подтверждено дополнительными расчётами).

Сравнение с паспортными данными: для многожильной модели расхождение расчётных мощностей тепловыделения с табличными значениями составило 1,85 % (*при 100*) и 1,29 % (*при 2100*) – см. Таблицу 2.4.

Предложенная методика позволяет моделировать тепловые процессы при плавке гололёда с точностью, достаточной для инженерных расчётов (подтверждено сравнением с паспортными данными и стационарным

аналитическим решением). Основные источники погрешности – нелинейность свойств льда, фазовый переход и вычислительные ограничения (шаг по времени, сетка).

Приложение 3.2

Методика моделирования термогидродинамических процессов в системе «провод – ледяная оболочка – окружающая среда»

Аналитический расчёт коэффициента теплообмена α по критериальным формулам даёт усреднённые значения и не учитывает неравномерность обтекания провода ветром. Сравнение показало, что при скорости 5 м/с погрешность достигает 70,8 %. Поэтому была разработана методика численного определения α на основе сопряжённого решения гидродинамической и тепловой задач в COMSOL.

1. Исходные данные

Геометрия. Двумерная модель включает три области: провод (диаметр 9,6 мм); ледяная оболочка (толщина 2-20 мм); внешняя воздушная область (размером около 20 диаметров оболочки).

Внешняя граница воздушной области разбита на 4 сектора (левая верхняя, левая нижняя, правая верхняя, правая нижняя) для отдельного анализа теплообмена на наветренной и подветренной сторонах.

Физические свойства (задаются в интерфейсе COMSOL):

- Воздух: теплопроводность: $k = 0,025 \text{ Вт/(м·К)}$; плотность: $\rho = 1 \text{ кг/м}^3$; теплоёмкость: $C_p = 1000 \text{ Дж/(кг·К)}$; для $k - \varepsilon$ модели: $\nu = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ Па·с}$.

- Лёд: теплопроводность: $k = 0,5 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$;
 плотность: $\rho = 900 \text{ кг} / \text{м}^3$; теплоёмкость: $C_p = 2100 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$; для $k-\varepsilon$
 модели: динамическая вязкость $\nu = 10 \text{ Па} \cdot \text{с}$.

- Провод: теплопроводность: $k = 200 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$;
 плотность: $\rho = 2700 \text{ кг} / \text{м}^3$; теплоёмкость: $C_p = 880 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$;
 мощность тепловыделения: $Q = 190000 \text{ Вт} / \text{м}^3$; для $k-\varepsilon$
 модели: $\nu = 10 \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Граничные условия:

- на левой и нижней границах расчётной области: температура -5°C ;
- на верхней и правой границах: тепловая изоляция (симметрия, нулевой поток);
- на входе воздушного потока (левая граница): скорость ветра (1–20 м/с), интенсивность турбулентности $It = 0,01 \dots 0,05 (1-5 \%)$, масштаб турбулентности $Lt = 0,001 \dots 0,005 \text{ м}$.
- на выходе (правая граница): давление $P = 0$.

2. Конечно-элементная сетка

Воздушная область: размер элементов $0,0005 \text{ м} (0,5 \text{ мм})$. Вблизи поверхности оболочки создаётся призматический пограничный слой (5-10 слоёв с коэффициентом роста 1,2) для разрешения больших градиентов скорости и температуры.

Твёрдые области (провод, лёд): сетка аналогична п. 3.9.1 (размер элементов $0,0002 - 0,001 \text{ м}$)

3. Настройка решателя

Тип задачи: стационарная (*Stationary*), линейный
 решатель: *PARDISO* (прямой метод). Модель
 турбулентности: $k-\varepsilon$ (стандартная, с пристеночными функциями).
 Начальные значения: $k = 0,1 \text{ м}^2 / \text{с}^2, \varepsilon = 0,1 \text{ м}^2 / \text{с}^3$.

Сходимость: относительная погрешность $1e-5$, абсолютная $1e-6$, максимальное число итераций 50.

4. Обработка результатов

На каждом из 4 секторов внешней поверхности оболочки выполняется:

- интегрирование температуры вдоль дуги - средняя температура поверхности T_s ;

- интегрирование теплового потока (оператор $intop(d.flux)$) - интегральный тепловой поток $Q_{дуги}$ (Вт);

- определение длины дуги $L_{дуги}$ (м);

- Коэффициент теплообмена: $\alpha_{дуги} = \frac{Q_{дуги}}{L_{дуги} \cdot (T_s - T_{окр})}$;

Средний коэффициент для всей поверхности – как среднее арифметическое по 4 секторам (или как $\frac{Q_{сум}}{(L_{полн} \cdot (T_{ср} - T_{окр}))}$).

5. Обработка результатов

Сравнение с аналитикой: для скорости ветра 5 м/с численный α оказался на 70,8 % ниже аналитического (рассчитанного по формулам). Это объясняется тем, что аналитические методы не учитывают локальное ухудшение теплообмена с подветренной стороны.

Алгоритм расчёта включает этапы подготовки геометрии, построения сетки, настройки решателя, обработки результатов и апробации.

Разработанная термогидродинамическая методика позволяет получать уточненные локальные (по секторам) и интегральные значения α для обледеневшего провода при скоростях ветра до 20 м/с. Значительное расхождение (70,8 %) с аналитическим расчётом подтверждает необходимость численного моделирования. Полученные зависимости используются в качестве граничных условий в тепловых расчётах плавки.

Приложение И

Методика определения параметров системы стабилизации напряжения в режиме плавки гололёда

Для обоснования расчётных параметров электрооборудования системы плавки гололёда и обеспечения требуемого качества напряжения у потребителей выполнено имитационное моделирование установившихся и переходных режимов в среде Multisim. Ниже приведена методика, позволяющая воспроизвести эти расчёты.

1. Исходные данные

Для проведения моделирования необходимы следующие параметры:

- линия: активное R_0 и индуктивное X_0 сопротивления единицы длины провода, протяжённость линии L , номинальное напряжение $U_{ном}$;
- нагрузка: активная P_n и реактивная Q_n мощности потребителей;
- элементы системы плавки: индуктивность нагрузочного реактора L_p , диапазон изменения ёмкости компенсирующих конденсаторных батарей C_1 и C_2 ;
- режимные параметры: требуемый ток плавки $I_{нл}$, допустимые отклонения напряжения у потребителя $\Delta U_{дон}$.

2. Алгоритм предварительного аналитического расчета

На базе математической модели, описанной в параграфе 2.10, выполняется последовательное вычисление следующих величин:

- определение требуемого тока плавки $I_{нл}$ на основе уравнения Джоуля-Ленца и теплового баланса;
- расчет суммарного индуктивного сопротивления контура X_L ;

- определение ориентировочных (идеальных) номиналов токоограничивающего реактора L_p и конденсаторных батарей C_1 и C_2 исходя из условия достижения последовательного резонанса напряжений.

Полученные аналитическим путем данные используются в качестве базовых параметров для последующего имитационного моделирования.

3. Построение эквивалентной схемы замещения

В среде имитационного моделирования (Multisim) создаётся электрическая принципиальная схема, топология которой строго повторяет исследуемый участок сети и включающая:

- источник переменного напряжения с заданным эквивалентным сопротивлением энергосистемы;
- индуктивность питающего трансформатора подстанции;
- эквивалентные сопротивления линии (распределённые или сосредоточенные по участкам);
- блок нагрузки потребителей;
- нагрузочный реактор с коммутирующим ключом;
- регулируемые ёмкости (конденсаторные батареи) с возможностью изменения их номиналов и схемы включения (параллельно, последовательно);
- виртуальные измерительные приборы (амперметры в ветвях и вольтметры в узлах) для непрерывной фиксации контурных токов и узловых напряжений.

4. Моделирование базовых режимов

4.1. Нормальный режим (без плавки) - моделирование выполняется при отключённом реакторе. С помощью виртуальных измерительных приборов фиксируются:

- токи в линии;
- уровни напряжения в характерных точках (в начале линии, в середине, на зажимах потребителя).

Полученные значения сравниваются с расчётными. Значительное расхождение требует проверки исходных данных или коррекции параметров схемы.

4.2. Режим плавки (без компенсации) - в схему вводится нагрузочный реактор. Моделирование выполняется при параметрах, соответствующих предварительному расчёту. Определяются:

- фактический ток плавки $I_{пл.факт}$;
- падение напряжения на участках линии;
- напряжение на зажимах потребителя $U_{кон}$.

Если уровень напряжения на любом из участков цепи выходит за допустимые пределы, фиксируется необходимость компенсации.

5. Компенсация падения напряжения

В схему последовательно с линией вводится дополнительная конденсаторная батарея C_2 (возможно также изменение ёмкости батареи C_1 в начале линии). Проводится параметрический анализ (численный эксперимент) с подбором ёмкости C_2 в заранее определённом диапазоне. Для каждого значения фиксируются:

- ток плавки $I_{пл}(C_2)$;
- напряжение у потребителя $U_{кон}(C_2)$.

6. Анализ особенностей схемы плавки

При работе схемы в режиме, близком к резонансу напряжений, необходимо оценить:

- напряжение на выводах конденсаторной батареи $U_{(C_2)}$;
- распределение напряжения вдоль линии;
- токи в параллельных ветвях (при наличии).

Если напряжение на одном из участков превышает допустимые значения для выбранного типа конденсаторов или иного оборудования,

формулируются дополнительные требования к оборудованию либо корректируется схема включения.

7. Корректировка параметров и формирование требований к оборудованию

По результатам моделирования уточняются:

- номинальные значения ёмкостей конденсаторных батарей;
- требования к рабочему напряжению батарей;
- необходимость секционирования батарей для регулирования;
- параметры коммутационной аппаратуры (ключей, выключателей).

8. Обоснование расчетных параметров

Для выбранных параметров выполняется повторное моделирование в объёме, достаточном для подтверждения работоспособности системы во всём диапазоне ожидаемых режимов (включая переходные процессы при включении/отключении элементов).

Разработанная методика имитационного моделирования позволяет на этапе проектирования электротехнического комплекса плавки гололёда провести обоснование параметров оборудования и оценить качество функционирования системы в различных режимах. Ключевой особенностью методики является целенаправленной настройки линии в околорезонансный режим, использование эффекта резонанса напряжений обеспечивает при настройке линии требуемый ток плавки, путём параметрического подбора ёмкости дополнительных конденсаторных батарей. Применение методики обеспечивает восстановление напряжения у потребителя до номинального уровня и формирование обоснованных требований к рабочему напряжению элементов системы, что подтверждает работоспособность предлагаемых технических решений.

Представленный алгоритм моделирования и технико-экономическое обоснование проекта в совокупности доказывают эффективность и реализуемость предложенного комплекса.