

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»



На правах рукописи

СТАРЕНЧЕНКО АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНСТРУИРОВАНИЯ
ТЕПЛОАГРУЖЕННЫХ БРЛС МАЛОРАЗМЕРНЫХ ЛА

Специальность: 05.12.14 – «Радиолокация и радионавигация»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель -
доктор технических наук
профессор Ушкар М.Н.

Москва

2018

Содержание

Введение.....	4
Глава 1 Анализ состояния вопроса, постановка задачи исследования	12
1.1 Анализ температурной зависимости параметров БРЛС	12
1.1.1 Температурная зависимость надежности БРЛС	12
1.1.2 Температурная зависимость основных функциональных параметров БРЛС	15
1.2 Анализ особенностей конструкций современных БРЛС БПЛА	19
1.3 Анализ процессов теплообмена в конструкциях БРЛС	26
Глава 2 Тепловые макромодели конструкции БРЛС	34
2.1 Методика адаптации конструкции БРЛС к задаче анализа теплового режима	34
2.2 Методика формирования тепловых макромоделей конструкций БРЛС	44
2.3 Разработка методики макромоделирования штыревого радиатора	55
2.4 Разработка методики распределения воздушных потоков	65
Глава 3 Методика конструирования теплонагруженных БРЛС.....	73
3.1 Постановка задачи и выбор критерия оптимизации	73
3.2 Выбор метода оптимизации	75
3.3 Разработка методики конструирования теплонагруженных БРЛС	79
Глава 4 Экспериментальные исследования методики конструирования теплонагруженных БРЛС малоразмерных ЛА	87
4.1 Исследования теплового режима БРЛС	87
4.2 Исследования теплового режима СВО АФАР	91
4.2.1 Разработка плиты СВО для модулей источников питания АФАР	91
Заключение	99
Список источников	101

Приложение А – Тепловое поле основания УМ СВЧ	110
Приложение Б – Матрица плана B_6	117

Введение

Самым динамичным сегментом рынка современной авиационной техники является рынок беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Согласно прогнозам J'son & Partners Consulting мировой рынок БПЛА вырастет к 2020 году примерно на 35% по сравнению с 2015 годом [1]. На рисунке 1 представлена динамика мирового и российского рынка БПЛА в 2016-2020 годах в миллиардах долларов. Мировой рынок авиационной продукции составляет порядка 14 миллиардов долларов [2].



Рисунок 1 – Оценка динамики мирового и российского рынка БПЛА

Из приведенных данных (рис. 1) следует, что доля рынка БПЛА составляет 50%, в том числе доля рынка БПЛА военного назначения составляет порядка 66% [2].

В соответствии с универсальной классификацией БПЛА (UVS International), предложенной международной ассоциацией по беспилотным системам Association for Unmanned Vehicle Systems International (AUVSI) [3], одними из самых распространенных типов БПЛА с бортовыми станциями являются:

- легкие (Close Range (Camcopter, CR, SkyBlade II));
- средние (Short Range (Vulture МК II, Sojka III, Pchela));
- средние с большой продолжительностью полета (Medium Range (Berkut, Sperwer, Hunter) летательные аппараты.

Основная доля БПЛА военного назначения имеет массу 150-500кг. Большинство БПЛА оснащены радиолокационными станциями (РЛС) различного частотного диапазона. Бортовые РЛС (БРЛС) средних БПЛА составляют около 25% массы летательного аппарата, т.е. 35-100 кг. Эти БРЛС должны обеспечить требуемые тактико-технические характеристики (ТТХ), сравнимые с вертолетными РЛС.

Рассмотрим основные параметры конструкций БРЛС указанного класса отечественных и зарубежных производителей. В качестве базовой оценки возьмем вертолетную БРЛС «Арбалет» Ка-диапазона, разработанную в 90-х годах и стоящую на вооружении вертолета Ка-52 до настоящего времени. Современные БРЛС представлены станциями: X-диапазона БРЛС МФ2-2, Ка-диапазона «Корсар-МРЛЦН», Ки-диапазона «Ратник» [4,5,6].

Параметры конструкций указанных бортовых РЛС представлены в таблице 1 [4,7,8,9,10].

Таблица 1 - Параметры БРЛС

Название	$P_{п}$, Вт	$\Gamma_{об}$, км	Масса РЛС, кг	V^* , дм ³	Требуемое $T_{ср}$, час	$P_{уд}$, Вт/ дм ³
Арбалет	3000	15-30	180	250	150	12
Корсар-МРЛЦН	500	15-20	40	16	200'	31
МРЛЦН – ФАР	550	15-20	35	17	250	32
Ратник	550	30	38	16	200'	34
AN/APY-8	600	15	52	15	300	40
Thales I-Master	600	27	30	14	250	42
EL/M-2055D	800	40	38	17	300	47

$P_{п}$ – потребляемая мощность, Вт; V^* - объем наиболее тепловыделяющих составных частей.

В таблице представлены станции, разработанные с 2010 по 2018 гг., кроме станции «Арбалет», разработанной в 90-х годах.

Анализ значений параметров конструкции БРЛС из таблицы 1 показывает, что удельная плотность теплового потока современных станций существенно выросла.

Изменение удельной плотности теплового потока БРЛС представлено на рисунке 2.



Рисунок 2 – Тенденция роста удельной плотности теплового потока

Анализ представленных данных показал, что уменьшение габаритных параметров конструкций БРЛС опережало соответствующее снижение потребляемой мощности, что привело к росту удельной плотности теплового потока примерно в 4 раза. Указанные изменения обусловлены применением цифровых технологий формирования и обработки сигнала на базе современной элементной базы с высокой степенью интеграции и твердотельных усилителей мощности СВЧ.

Рост удельной мощности рассеяния и, как следствие, повышение температуры составных частей (СЧ) приводит к снижению надежности БРЛС, поэтому исследование путей обеспечения нормальных тепловых БРЛС БПЛА является актуальной задачей.

Объектом исследования в диссертационной работе является конструкция БРЛС малоразмерных ЛА (МЛА) с принудительной воздушной системой охлаждения (ПВСО).

Целью настоящей диссертационной работы является повышение надежности БРЛС путем оптимизации температурного поля их конструкций.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Анализ температурной зависимости параметров БРЛС, влияющих на параметры станции;
2. Анализ конструктивных особенностей БРЛС с целью формирования требований и ограничений на системы охлаждения БРЛС;
3. Анализ особенностей теплообмена конструкций БРЛС МЛА, позволяющий определить ресурсы повышения его эффективности;
4. Разработка алгоритма адаптации 3D модели конструкции БРЛС к анализу ее теплового режима, позволяющего существенно сократить время анализа теплового режима;
5. Разработка методики теплового моделирования сложных конструктивных сборок БРЛС, позволяющего расчетно-экспериментальным путем оценить эффективность теплообмена составных частей БРЛС;
6. Разработка тепловой макромодели радиаторов СО, позволяющей оптимизировать значимые параметры конструкции радиаторов СО;
7. Разработка методики распределения потоков охлаждающего воздуха, позволяющей повысить эффективность теплообмена конструкций БРЛС;
8. Разработка методики конструирования теплонагруженных БРЛС с принудительным воздушным охлаждением, обеспечивающая максимальное значение надежности БРЛС.

При проведении исследований использовались основные положения теории тепломассообмена, теория планирования эксперимента, теория математической статистики и методы статистической обработки результатов эксперимента.

Научной новизной обладают следующие результаты, полученные в диссертации:

- методика теплового моделирования сложных конструктивныхборок БРЛС, отличающаяся от известных возможностью интегральной оценки значений температурного поля конструкции БРЛС;
- тепловая макромодель радиаторов СО, отличающаяся от известных учетом влияния значимых конструктивных параметров радиатора на его эффективность;

– методика распределения потоков охлаждающего воздуха между конструктивными элементами БРЛС, отличающаяся от известных комплексной оценкой особенности конструкции БРЛС, что позволяет повысить эффективность использования охлаждающего воздуха;

– методика конструирования теплонагруженных БРЛС, отличающаяся от известных системным подходом к решению задачи повышения надежности БРЛС за счет использования ресурсов конструкции БРЛС.

Практической ценностью обладают следующие результаты диссертационной работы:

1. Тепловая макромодель штыревого радиатора для воздушной системы охлаждения с равномерно распределенным источником тепла и фиксированным значением объема охлаждающего воздуха, учитывающая значимые геометрические параметры радиатора, влияющие на его эффективность;

2. Алгоритм адаптации модели конструкции БРЛС к расчету теплового режима, учитывающий особенности современных малоразмерных БРЛС и позволяющий сократить время, затрачиваемое на анализ теплового режима при сохранении точности решения;

3. Методика распределения воздушных потоков, учитывающая конструктивные особенности БРЛС.

Результаты работы были использованы на предприятии АО «Корпорация «Фазотрон-НИИР»:

- при анализе теплового режима изделия «Ратник»;
- при анализе теплового режима модуля источника питания.

Результаты работы были использованы в ходе работы в НЦ СРМ МАИ:

- при анализе теплового режима изделия «Корсар-МРЛЦН»;
- при разработке конструкции изделия БРЛС.

Что подтверждено соответствующими актами использования результатов работы.

Особенностью и достоинством полученных результатов подтверждается: путем корректного использования теории тепломассобмена, теории планирования

эксперимента, теории математической статистики и методов статистической обработки результатов эксперимента, апробацией результатов исследований на научно-практических конференциях и результатом экспериментальных исследований с помощью САПР SolidWorks.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Надежность конструкции БРЛС МЛА с ограниченными ресурсами по потреблению и охлаждающему воздуху может быть существенно увеличена за счет повышения эффективности ее системы охлаждения;

2. Стационарный тепловой режим конструкций БРЛС МЛА определяется теплообменом системы изотермических поверхностей составных частей БРЛС;

3. Повышение эффективности ПВО малоразмерных ЛА определяется распределением воздушных потоков в каналах охлаждения СЧ БРЛС и коэффициентом теплоотдачи поверхностей СЧ БРЛС.

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- Международная конференция «Авиация и космонавтика 2014», Москва, МАИ, 2014 г.
- Научно-практической конференции студентов и молодых ученых МАИ «Инновации в авиации и космонавтике – 2015», Москва, МАИ, 2015 г.
- Международная конференция «Авиация и космонавтика 2015», Москва, МАИ, 2015 г.
- Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения 2016», Москва, МАИ, 2016 г.
- Международная конференция «Авиация и космонавтика 2016», Москва, МАИ, 2016 г.
- Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения 2017», Москва, МАИ, 2017 г.
- Международная молодежная научная конференция «Авиация и космонавтика 2017», Москва, МАИ, 2017 г.

Результаты диссертационной работы отражены в 10 научных работах, в том числе в 3 статьях в периодических печатных изданиях, входящих в перечень ВАК, одной заявке на полезную модель, тезисах 6 докладов на научно-технических конференциях.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы. Диссертация изложена на 110 листах основного текста, содержит 46 рисунков и 15 таблиц к основному тексту, список литературы из 65 наименований и 9 страниц приложений.

В первой главе проанализировано влияние температуры на основные параметры БРЛС. Показано увеличение эксплуатационной интенсивности отказов СЧ БРЛС при повышении температуры окружающей среды (ОС). Приведены особенности конструкций современных БРЛС БПЛА. Освещены особенности процессов теплообмена в конструкции БРЛС. Сформулированы цель и задачи исследования диссертационной работы.

Вторая глава содержит алгоритм адаптации конструкции БРЛС к анализу теплового режима; метод теплового моделирования сложных конструкций БРЛС, позволяющий оценить эффективность стоков тепловой энергии, рассеиваемой БРЛС; описание и результаты экспериментальных исследований по оценке адекватности и точности тепловой макромодели БРЛС; тепловая макромодель штыревого радиатора; методика распределения воздушных потоков охлаждающего воздуха, позволяющая повысить эффективность теплообмена в конструкциях БРЛС.

В третьей главе выбран критерий оптимизации, позволяющий оценить эффективность системы охлаждения; выбран метод оптимизации; разработана методика конструирования теплонагруженных БРЛС, позволяющая повысить надежность БРЛС.

В четвертой главе показана эффективность разработанных методик и алгоритмов на примере конструкций БРЛС: БРЛС Ку-диапазона и «Арбалет АФАР».

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

Глава 1 Анализ состояния вопроса, постановка задачи исследования

1.1 Анализ температурной зависимости параметров БРЛС

Как известно [11], основные параметры БРЛС определяются условиями распространения радиосигнала в эфире и характеристиками электронных компонентов (ЭК), входящих в состав станции, их шумами, точностью, стабильностью и режимами работы. Вместе с тем практически все ЭК являются температурозависимыми. Следовательно, можно предположить, что основные параметры БРЛС также являются температурозависимыми.

Рассмотрим эту зависимость подробнее.

1.1.1 Температурная зависимость надежности БРЛС

Основным показателем надежности БРЛС является вероятность безотказной работы [12]:

$$P(t) = \exp(-\lambda_э \cdot t), \quad (1)$$

где: $\lambda_э$ – эксплуатационная интенсивность отказов, 1/час; t – заданное время наработки (например, время полета ЛА), час.

Для случая последовательной структурной модели надежности эксплуатационная интенсивность отказов РЛС равна:

$$\Lambda_э = \sum_{i=1}^N \lambda_{эi}, \quad (2)$$

где: $\lambda_{эi}$ – эксплуатационная интенсивность отказов i -го компонента, N – количество i -х компонент.

Расчетные модели эксплуатационной интенсивности отказов основных компонентов приведены в таблице 2 [12]:

Таблица 2 Расчетные модели эксплуатационной интенсивности отказов компонентов

№	Наименование компонента	$\Lambda_{эi} \times 10^6, 1/\text{час}$
1	Резистор	$\lambda_0 \cdot K_T \cdot K_p \cdot K_{ж} \cdot K_{э} \cdot K_{ук}$
2	Конденсатор	$\lambda_0 \cdot K_T \cdot K_c \cdot K_{ж} \cdot K_{э} \cdot K_{ук}$
3	ИС	$\lambda_0 \cdot K_T + \lambda_{ок} \cdot K_{э} \cdot K_{ук}$
4	СБИС	$\lambda_0 \cdot K_T \cdot K_{сл} + \lambda_{ок} \cdot K_{э} \cdot K_{ук} \cdot K_k$
5	Трансформатор	$\lambda_0 \cdot K_T \cdot K_{э} \cdot K_{пр}$
6	Дроссель	$\lambda_0 \cdot K_p \cdot K_{э} \cdot K_{пр}$
7	Диод	$\lambda_0 \cdot K_p \cdot K_{э} \cdot K_{пр}$
8	Транзистор	$\lambda_0 \cdot K_p \cdot K_{э} \cdot K_{ф} \cdot K_s \cdot K_{пр}$
9	Соединители	$\lambda_0 \cdot K_p \cdot K_{к.к} \cdot K_{к.с} \cdot K_{э} \cdot K_{пр}$

где: λ_0 – базовая интенсивность отказов ЭК, 1/час; K_T – коэффициент учета влияния температуры; K_p – коэффициент, учитывающий мощность рассеивания; K_c – коэффициент, учитывающий номинальную емкость конденсатора; $K_{сл}$ – коэффициент сложности кристалла; $K_{ж}$ – коэффициент жесткости электрического режима; $\lambda_{ок}$ – интенсивность отказов корпуса, 1/час; $K_{э}$ – коэффициент учета условий эксплуатации; $K_{ук}$ – коэффициент уровня качества; K_k – коэффициент, учитывающий тип корпуса; $K_{пр}$ – коэффициент, учитывающий приемку; $K_{ф}$ – коэффициент, учитывающий функциональное назначение; K_s – коэффициент, учитывающий величину рабочего напряжения; $K_{к.к}$ – коэффициент, учитывающий число задействованных контактов; $K_{к.с}$ – коэффициент, учитывающий количество сочленений-расчленений [13].

Для оценки влияния совокупного влияния надежности компонентов на изделие в целом рассмотрим температурную зависимость надежности твердотельного усилителя мощности (УМ) СВЧ Ku-диапазона [14]. Состав компонентной базы УМ СВЧ представлен в таблице 3.

Таблица 3 Состав компонентной базы УМ СВЧ

№	Наименование компонентов	Количество компонентов
1	Конденсаторы	293
2	Резисторы	139
3	МС	44
4	Диоды	20
5	Транзисторы	14
6	Дроссели	5
7	Трансформаторы	5
8	Делители СВЧ	33
9	Соединители	26

Зависимость эксплуатационной интенсивности отказов твердотельного УМ СВЧ от температуры, полученная с помощью автоматической системы расчета надежности (АСРН) [15], показана на рисунке 3.

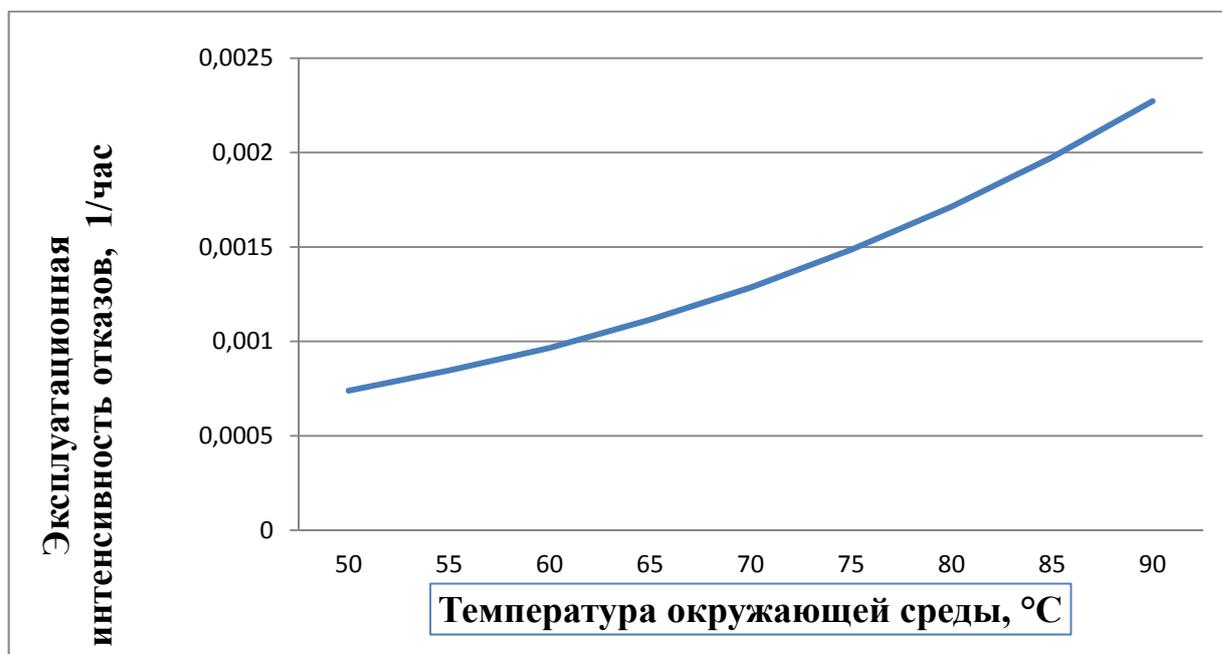


Рисунок 3 – Зависимость эксплуатационной интенсивности отказов твердотельного усилителя мощности СВЧ от температуры

Анализ данных, представленных на рисунке 3, показывает, что при повышении температуры окружающей среды на 10 град эксплуатационная интенсивность отказов увеличивается в среднем на 30 процентов.

1.1.2 Температурная зависимость основных функциональных параметров БРЛС

Основные функциональные параметры БРЛС объединены в основное уравнение радиолокации, которое без учета затухания сигнала в атмосфере имеет следующий вид [11]:

$$R_{max}^4 = \frac{P_t \cdot G_t \cdot A_e \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi)^2 \cdot k \cdot T_0 \cdot B \cdot F_n \cdot \Pi} \quad (3)$$

где: P_t – мощность излучения радиолокатора, Вт; G_t – коэффициент усиления антенны; A_e – эффективная площадь антенны, м²; σ – эффективная площадь рассеивания, м²; k – константа Больцмана, Дж/°С; T_0 – температура приемника, °С; B – ширина частотной полосы приемника, Гц; F_n – коэффициент шума приемника; Π – потери отношения сигнал / шум.

Одной из основных задач проектирования РЛС является минимизация потерь, вносимых преимущественно аналоговыми средствами формирования и обработки радиоэлектронных (РЛ) сигналов.

Потери РЛС представляют сумму потерь приемо-передающего тракта и антенны [16]:

$$\Pi = \Pi_{\text{прдт}} + 2\Pi_a + \Pi_{\text{прмт}}, \quad (4)$$

где $\Pi_{\text{прдт}}$ – потери в передающем тракте РЛС, $2\Pi_a$ – $2\Pi_a$ – потери в совмещенной антенне РЛС, $\Pi_{\text{прмт}}$ – потери в приемном тракте РЛС.

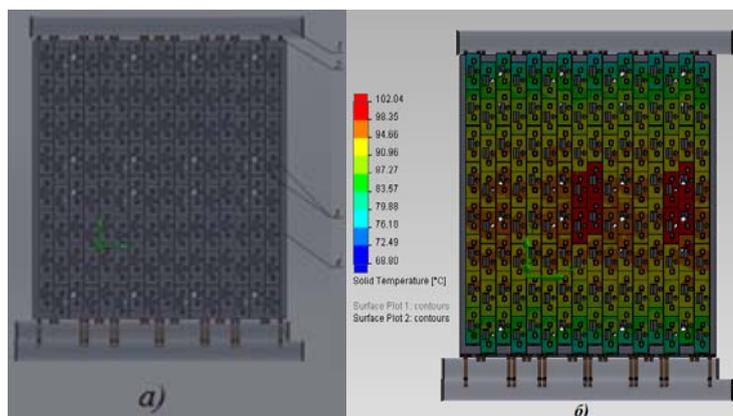
Существенный вклад в потери передающего тракта вносит фазовый шум опорного генератора, который в свою очередь зависит от стабильности частоты.

Параметр стабильность характеризует совокупные отклонения частоты, вызываемые всеми причинами – изменением температуры, технологическим разбросом, колебаниями рабочего напряжения и старением при эксплуатации. Указанное в технических условиях значение стабильности соответствует максимальному уходу частоты, вызванному совместным действием всех этих факторов в пределах допустимого диапазона их

изменения. Из четырех вышеперечисленных факторов наибольший дрейф частоты вызывают изменения температуры. Для повышения температурной стабильности частоты генераторы цифрового сигнала с кварцевой стабилизацией частоты выпускаются, как минимум, следующих трех классов, (в порядке роста температурной стабильности частоты): без температурной компенсации, с температурной компенсацией и с термостатированием. Нестабильность выходной частоты генераторов без температурной компенсации определяется температурной нестабильностью собственной резонансной частоты кварцевого резонатора [17].

Температурная стабильность частоты генератора определяется температурным коэффициентом частоты (ТКЧ). Из анализа [18,19] следует, что ТКЧ составляет 10^{-5} – 10^{-6} Гц/°С. Для эффективного решения основных задач радиолокации (картографирование, измерение координат и т.п.) требуется обеспечить значение ТКЧ 10^{-7} – 10^{-8} Гц/°С, что достигается в том числе за счет термостабилизации опорного генератора [18].

Температурная зависимость параметров антенны преимущественно обусловлена температурной зависимостью параметров ферритовых фазовращателей от температуры. Среднее значение температурного коэффициента фазы ферритовых фазовращателей равно 2-3 °С [20]. Перепад температур по антенному полотну активной фазированной антенной решетки (АФАР) может составить 15-20 °С, а между соседними фазовращателями может достигать 5-6°С. В качестве примера на рисунке 4а изображена конструкция антенны АФАР, на рисунке 4б представлено распределение температур полотна АФАР в рамках проекта «Аналогия».



1 – Коллектор; 2 – Труба охлаждения; 3 – Излучатели АФАР;
4 – Плита охлаждения.

Рисунок 4 – Полотно АФАР

(а – конструкция полотна АФАР; б – температурное поле полотна АФАР)

Таким образом, нестабильность фазового распределения между излучателями АФАР может составить 20-30 °С. Такой разброс фазового распределения может привести к существенному изменению параметров антенн РЛС, например коэффициента усиления антенны.

Из [21] следует, что требование к температурному градиенту между «соседними» фазовращателями составляет 2-3 град./°С. Вместе с тем, как следует из рисунка 4б, реальный разброс температур может превысить 20-25 °С, что, следовательно, приведет к ухудшению характеристик АФАР.

Потери приемного тракта обусловлены чувствительностью приемника, коэффициентом шума приемника и потерями АЦП, которые также являются температурозависимыми.

Пороговая чувствительность приемного тракта определяется пороговым отношением сигнал/шум (С/Ш), причем мощность шума рассчитывается по следующей формуле [22]:

$$P_{\text{ш}} = k \cdot T \cdot \Delta f, \quad (5)$$

где: k – константа Больцмана, Дж /К, T – абсолютная температура, К, Δf – полоса пропускания приемника, Гц.

Коэффициент шума приемника преимущественно определяется шумами первого каскада малошумящего усилителя (МШУ), который также является температурозависимым.

Потери АЦП определяются потерями квантования и фазового шума. В таблице 4 приведена зависимость потерь АЦП от фазового шума дискретизации [23].

Таблица 4 Потери АЦП от фазового шума дискретизации

$\pi f \theta$, рад	0,349	0,488	0,602	0,699	0,785	1,13	1,66	1,91	0,75
$\frac{\sin \pi f \theta}{\pi f \theta}$, %	98	96	94	92	90	80	60	50	30
P_{θ} , дБ	-0,18	-0,35	-0,54	-0,72	-0,91	-1,8	-4,43	-6,02	-10,5

Где: θ – длительность выборки сигнала, мкс; P_{θ} – потери, дБ.

Таким образом, анализ влияния температуры на характеристики РЛС позволяет сделать следующие выводы:

- интенсивность отказов электронных модулей РЛС повышается примерно на 30 процентов при повышении температуры на каждые 10 град;
- температурная зависимость основных функциональных параметров БРЛС проявляется в повышении мощности шума и, следовательно, в ухудшении отношения С/Ш.

1.2 Анализ особенностей конструкций современных БРЛС БПЛА

Основными видами современных БРЛС, устанавливаемых на БПЛА, являются [5]:

- БРЛС с электромеханическим сканированием;
- БРЛС с фазированной антенной решеткой (ФАР);
- БРЛС с АФАР.

БРЛС с электромеханическим сканированием применяются преимущественно для решения задач, требующих большого сектора сканирования ($\pm 90^\circ$ и более). К таким задачам относится, например, боковой обзор. Вместе с тем наличие механического привода не позволяет обеспечить высокую точность позиционирования антенны, что снижает эффективность решения задач БРЛС, особенно при узких диаграммах направленности (ДН) антенн.

БРЛС с ФАР являются для БПЛА перспективными при использовании в задачах, требующих небольших секторов сканирования (до $\pm 45^\circ$). При этом их конструктивное исполнение обеспечивает высокую унификацию с БРЛС с электромеханическим сканированием.

Применение БРЛС с АФАР является ведущей тенденцией развития современной радиолокации [5]. Однако высокая стоимость и низкий КПД приемо-передающих модулей препятствуют расширению их применения в БПЛА.

Поэтому в настоящее время основными видами БРЛС для БПЛА являются БРЛС с электромеханическим сканированием и с ФАР.

Проведем сравнение БРЛС указанных типов.

На рисунках 5 и 6 представлены электрические структурные схемы этих БРЛС.

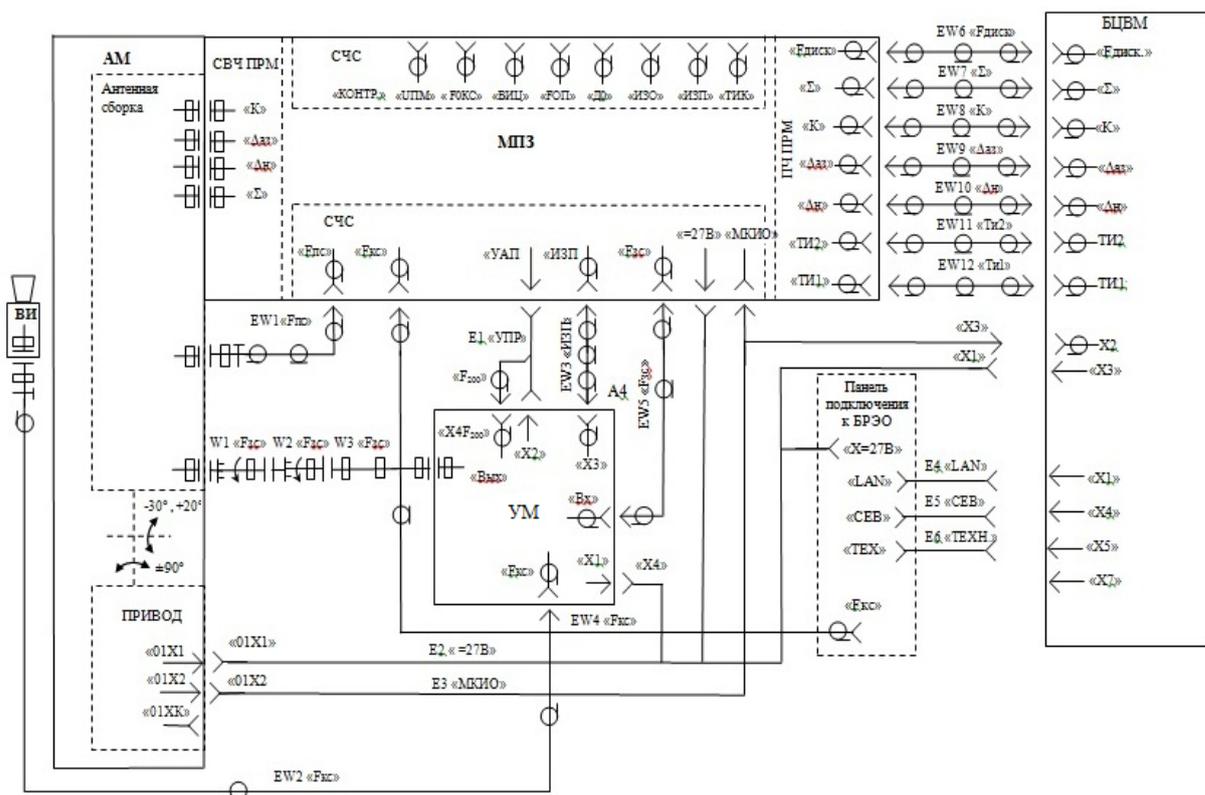


Рисунок 5 – Электрическая схема БРЛС с электромеханическим сканированием

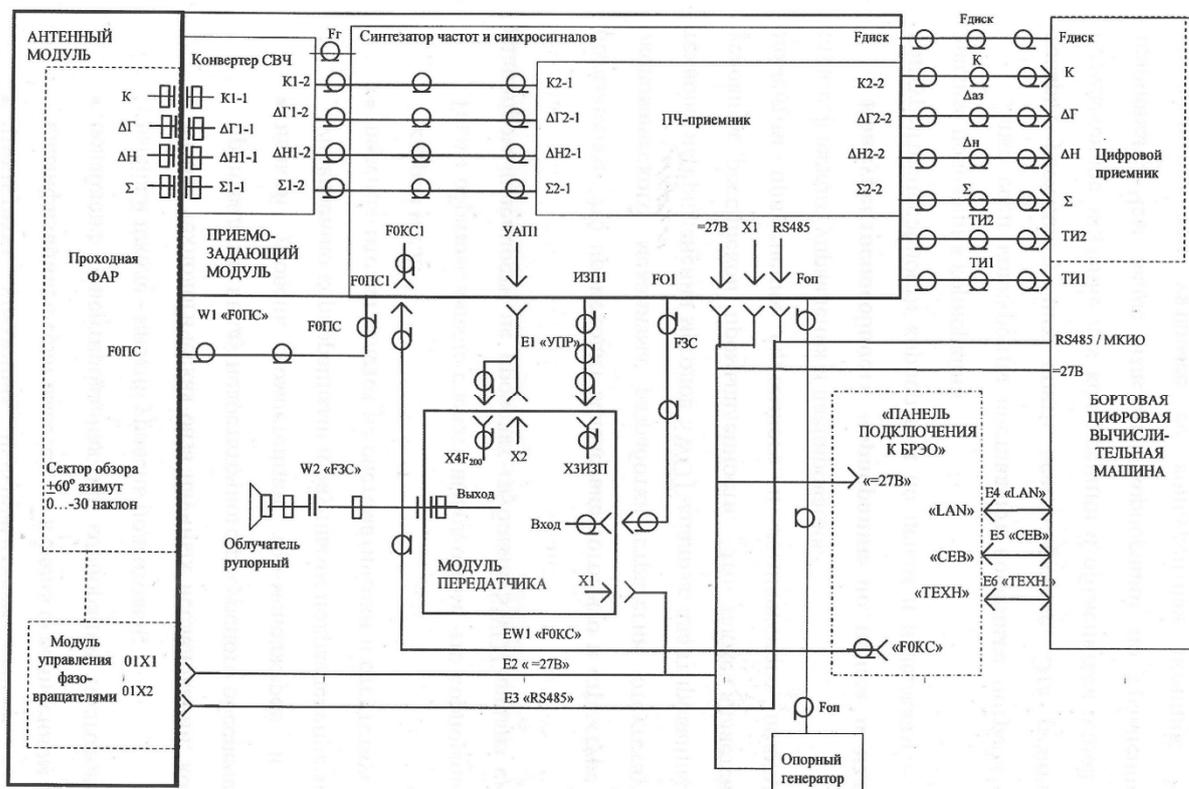
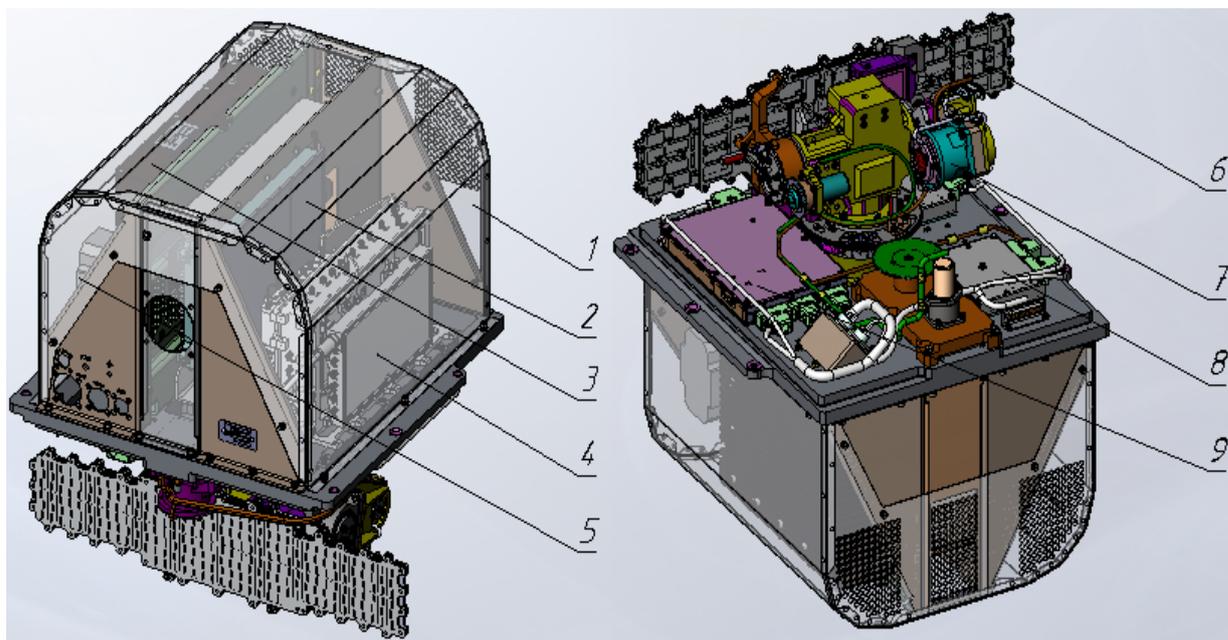


Рисунок 6 – Электрическая схема БРЛС с ФАР

Как видно из рисунков 5 и 6, обе электрические схемы обладают явным сходством, а именно, наличием бортовой вычислительной машины (БЦВМ), усилителями мощности сигнала, приемо-задающим модулем и другими. Основное различие этих БРЛС следует из принципа сканирования.

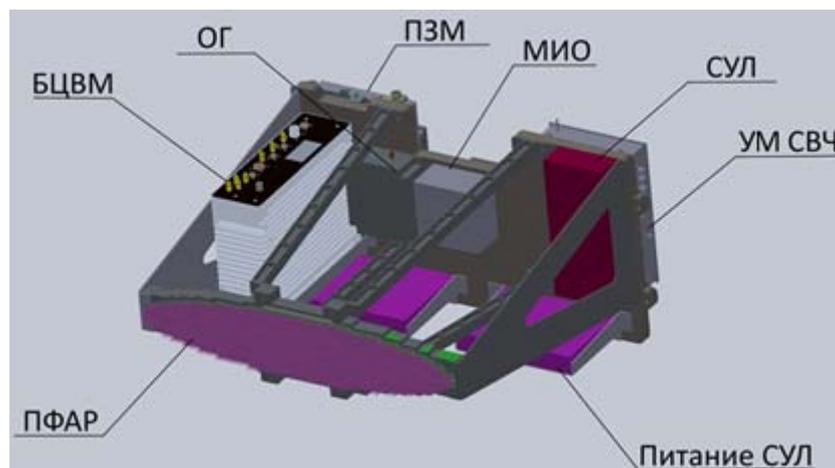
Таким образом, анализ представленных электрических схем показывает, что обе станции имеют высокую степень унификации.

Конструкции рассматриваемых станций (приведены на рисунках 7 и 8) разработаны при непосредственном участии автора.



1 – Кожух; 2 – БЦВМ; 3 – Усилитель мощности (УМ) СВЧ; 4 – МПЗ; 5 – Кварцевый генератор (ГК); 6 – Антенная сборка (АС); 7 – Привод; 8 – Усилитель мощности привода (УМП); 9 – Модуль управления приводом (МУП)

Рисунок 7 – БРЛС с электромеханическим сканированием



ПФАР – проходная ФАР, ОГ – опорный генератор; ПЗМ – приемо-задающий модуль, МИО – моноимпульсный облучатель, СУЛ – система управления лучом, УМ СВЧ – усилитель мощности СВЧ

Рисунок 8 – БРЛС ФАР (МРЛЦН Корсар ФАР)

В таблице 5 представлены параметры основных составных частей (СЧ) БРЛС на примере БРЛС с механическим сканированием (рис.7). Значения интенсивности отказов СЧ БРЛС представлены в документе «Расчет надежности МБРЛС АБВР.461334.004 РР2» [14].

Таблица 5 Параметры составных частей БРЛС

№	СЧ	$P_{п}$, Вт	$S_{к}$, м ²	M , кг	$\Lambda_{э}$, 1/час	$P_{уд}$, Вт/см ²
1	УМ СВЧ	200	0,117	3,5	0,00084	0,17
2	МПЗ	75	0,165	3,6	0,0002	0,042
3	БЦВМ	60	0,195	5,1	0,0001	0,031
4	ГК	10	0,031	0,65	0,00002	0,032
5	АС	5	0,08	2,6	0,0001	0,00625
6	Привод	30	0,12	4,5	0,00015	0,025
7	УМП	15	0,028	0,36	0,0004	0,054
8	МУП	5	0,064	0,75	0,000066	0,0078
	Итого	400	0,8	21	0,001186	0,05

Условные обозначения: $P_{п}$ – потребляемая мощность, Вт; $S_{к}$ – площадь корпуса, м²; $P_{уд}$ – удельная мощность рассеивания, Вт/см²; M – масса СЧ БРЛС, кг; $\Lambda_{э}$ – эксплуатационная интенсивность отказов СЧ БРЛС, 1/час.

Конструктивно БРЛС, представленные на рисунках 7 и 8, состоят из двух основных частей: радиочастотного модуля, объединяющего СЧ 1–4, и антенного модуля, включающего СЧ 5–8.

Анализ значений тепловой энергии, выделяемой представленными в таблице 5 СЧ, показывает, что основные (84%) потери тепловой энергии сосредоточены в радиочастотном модуле (рис. 7). Поэтому тепловой режим и надежность конструкций БРЛС определяются радиочастотным модулем.

Как правило, БПЛА указанного класса не имеют системы кондиционирования воздуха, поэтому входная температура охлаждающего воздуха в соответствии с ГОСТ РВ 20.39.304-98 принимается 55 °С. Таким образом, допустимый перегрев элементов конструкции БРЛС с учетом того, что применяемая компонентная база имеет $T_{\text{доп}} +85$ °С, составляет не более +25 °С.

На рисунке 9 приведена зависимость выбора вида СО от удельной мощности рассеяния [24]. Для примера зададимся перегревом в 20°С. Тогда, используя представленные в таблице 1.5 данные, получим значения плотности теплового потока для радиочастотного и антенного модуля, равные 2,8 и 2,3 Вт/м² соответственно.

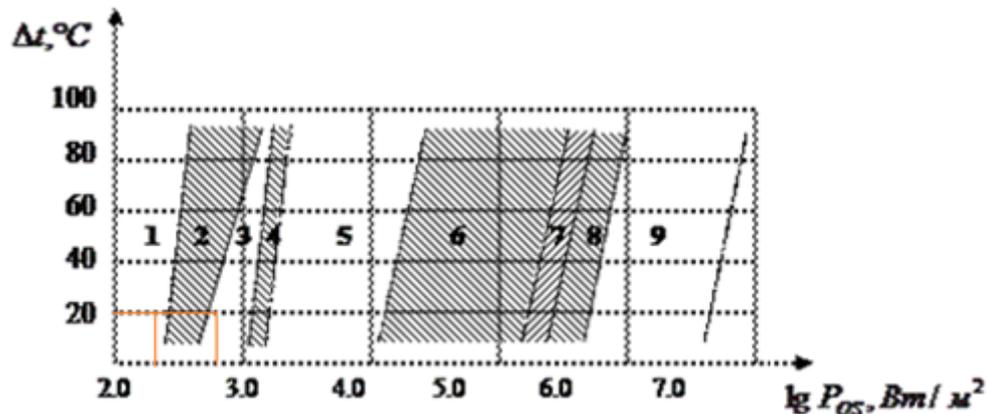


Рисунок 9 – Диаграмма выбора системы охлаждения

Как видно из рисунка 9, эти модули при одном и том же перегреве попадают в разные «зоны». Так, зона 3 соответствует принудительному воздушному охлаждению, а зона 1 – естественному охлаждению. Следовательно, основным видом охлаждения БРЛС БПЛА является принудительное воздушное охлаждение (ПВО). Как правило, расход охлаждающего воздуха фиксирован и является постоянной величиной, поскольку у БПЛА нет внутренней системы кондиционирования и нет

дополнительных мощностей для принудительного охлаждения с использованием вентиляторов. Поэтому необходимый объем охлаждающего воздуха формируется за счет естественного воздухозабора.

В качестве примера рассмотрим БПЛА типа Корсар, общий вид которого представлен на рисунке 10. Видно, что подброшенной части располагается целевая нагрузка, вверху располагается воздухозаборник. Воздухозаборник распределяет воздушный поток на двигатель, располагаемый в хвостовой части ЛА, и на охлаждение.



Рисунок 10 – Общий вид БПЛА

Так, например, на целевую нагрузку (Корсар-МРЛЦН) выделяется около 400 Вт энергии, реальная мощность станции 380 Вт. Это свидетельствует о том, что применение вентиляторов невозможно, поскольку средняя мощность потребления составляет 100 Вт.

С учетом изложенного проведем оценку температурного поля конструкции БРЛС, представленной на рисунке 11. Результаты анализа теплового режима этой конструкции, выполненного средствами SolidWorks FlowSimulation [25], представлены на рисунке 11 и в таблице 6.

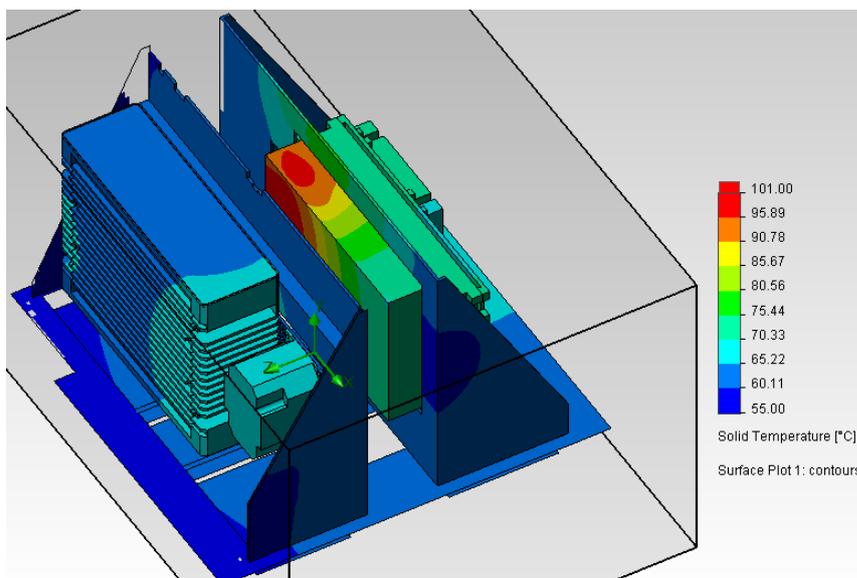


Рисунок 11 – Температурное поле БРЛС БРЛС

Таблица 6 Температурное поле БРЛС

СЧ	УМ СВЧ	ПЗМ	БЦВМ	ГК
$T_k, ^\circ\text{C}$	101	83	73	69

Анализ результатов, представленных на рисунке 11 и в таблице 6, показывает разброс значений температур перегрева и соответствующей наработки на отказ СЧ конструкций БРЛС.

Таким образом, анализ особенностей конструкций современных БРЛС БПЛА позволяет сделать следующие выводы:

- нормальный тепловой режим БРЛС БПЛА может быть обеспечен системами ПВО;
- особенностями систем ПВО БРЛС БПЛА является ограниченный и фиксированный расход охлаждающего воздуха, обусловленный параметрами конструкции воздухозаборника и ограничением потребляемой мощности;
- СЧ БРЛС БПЛА имеют существенный разброс значений температур перегрева и как следствие разную наработку на отказ.

1.3 Анализ процессов теплообмена в конструкциях БРЛС

Конструкция современных БРЛС представляет собой сложную систему теплонагруженных тел, взаимодействующих с окружающей средой [26]. С теплофизической точки зрения такие системы представляют собой комбинацию источников тепла, к которым относятся электронные блоки, и стоков тепла, к которым относятся элементы конструкции (корпуса, кронштейны, основания и т.п.) [27].

Обычно в конструкции БРЛС малоразмерных БПЛА используют совмещенную антенну, обеспечивающую работу в импульсном режиме: «прием-передача». Соответствующим образом изменяется и тепловая нагрузка на БРЛС [28].

На рисунке 12 представлена зависимость перегрева теплонагруженных блоков БРЛС при циклическом режиме работы. Такой режим характеризуется работой в определенные короткие промежутки времени, когда рассеивается максимальная мощность [29].

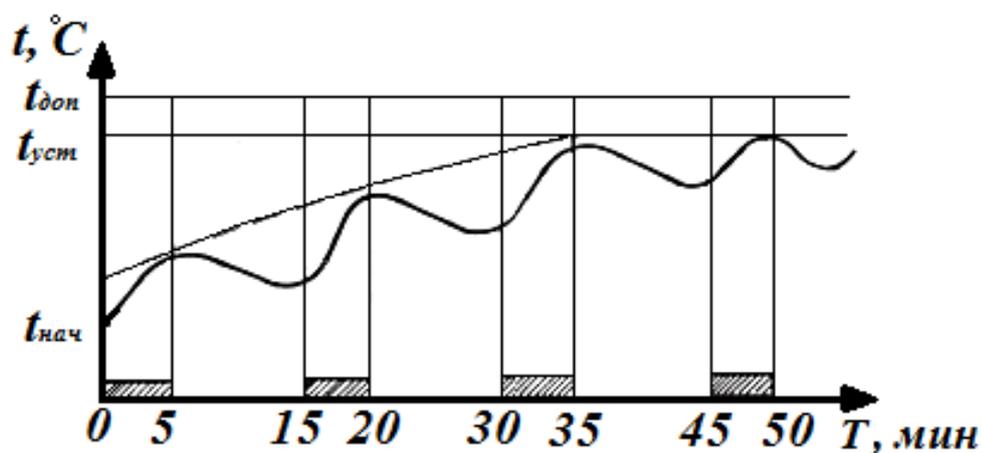


Рисунок 12 – Перегрев в теплонагруженных блоках при циклическом режиме работы.

где: $t_{\text{нач}}$ – начальное значение температуры, $^\circ\text{C}$; $t_{\text{уст}}$ – установившаяся температура, $^\circ\text{C}$; $t_{\text{доп}}$ – допустимая температура, $^\circ\text{C}$.

Как видно из рисунка 12, по истечении 20-30 минут работы БРЛС температура блоков стремится к значению стационарного теплового режима. Поэтому с учетом инерционности тепловых процессов тепловой режим БРЛС при импульсной работе можно считать квазистационарным.

С учетом сделанного допущения уравнение теплового баланса БРЛС будет иметь вид:

$$Q_{\text{п}} - Q_{\text{т}} - Q_{\text{и}} = 0, \quad (6)$$

где: $Q_{\text{п}}$ – энергия, подводимая к БРЛС, Дж; $Q_{\text{т}}$ – тепловая энергия, Дж; $Q_{\text{и}}$ – электромагнитная энергия, излучаемая БРЛС, Дж.

Анализ литературных источников [30,31,32] показывает, что величина $Q_{\text{и}}$ составляет 10-15% подведенной энергии. Таким образом, тепловая энергия составляет около 85-90% подведенной энергии. Например, если БРЛС «Корсар-МРЛЦН» потребляет 400 Вт, а время полета БПЛА составляет 10 часов, то потребляемая БРЛС энергия будет 14,4 МДж, тепловая энергия составляет 12,24-13 МДж.

Тепловая энергия БРЛС частично передается в окружающую среду и расходуется на повышение температуры элементов конструкции БРЛС, т.е.

$$Q_{\text{т}} = Q_{\text{ос}} + Q_{\text{нк}}, \quad (7)$$

где: $Q_{\text{ос}}$ – энергия, передавая окружающей среде, Дж; $Q_{\text{нк}}$ – энергия, расходуемая на нагрев элемента конструкции, Дж.

Значение $Q_{\text{нк}}$ определяется удельной теплоемкостью конструктивных элементов, их массой и допустимым перегревом. С учетом результатов расчета стационарного теплового режима БРЛС (рис.10) температура перегрева элементов несущих конструкции составляет 5-10 °С, что эквивалентно потребленной энергии:

$$Q_{\text{нк}} = M_{\text{к}} * \Delta t_{\text{доп}} * C_{\text{уд}} \approx 20 * 21 * 0,9 = 0,378 \text{ МДж}, \quad (8)$$

где: $M_{\text{к}}$ – масса конструкции (сплав Д16), кг; $\Delta t_{\text{доп}}$ – допустимая температура перегрева, °С; $C_{\text{уд}}$ – удельная теплоемкость конструкции, Дж/кг·°С.

Таким образом, на нагрев несущей конструкции расходуется 3% тепловой энергии, а 97% передается в окружающую среду.

Рассмотрим тепловую схему передачи тепловой энергии от БРЛС в окружающую среду (рис. 13).

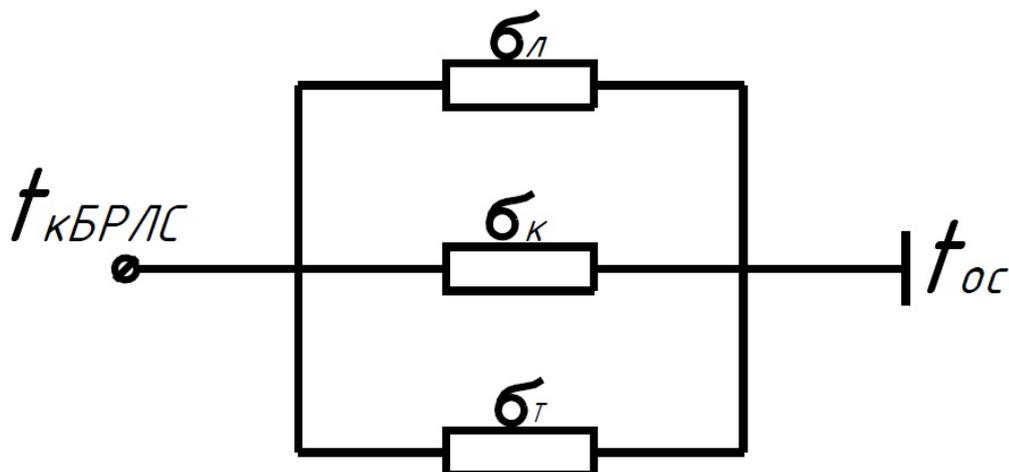


Рисунок 13 – Тепловая схема теплообмена БРЛС с окружающей средой

где: $t_{кБРЛС}$ – температура корпуса БРЛС; σ_l – тепловая проводимость излучением между кожухом БРЛС и средой, Вт/°С; σ_t – тепловая проводимость кондукции между основанием БРЛС и рамой фюзеляжа, Вт/°С; σ_k – тепловая проводимость конвекции между БРЛС и воздушным потоком охлаждающего воздуха, Вт/°С.

Как видно из рисунка 13, основными стоками тепловой энергии в окружающую среду являются: излучение кожуха, теплопередача кондукцией через элементы крепления БРЛС к раме и фюзеляжа, принудительная конвекция конструкции БРЛС. Оценим тепловые потоки, передаваемые по этим каналам.

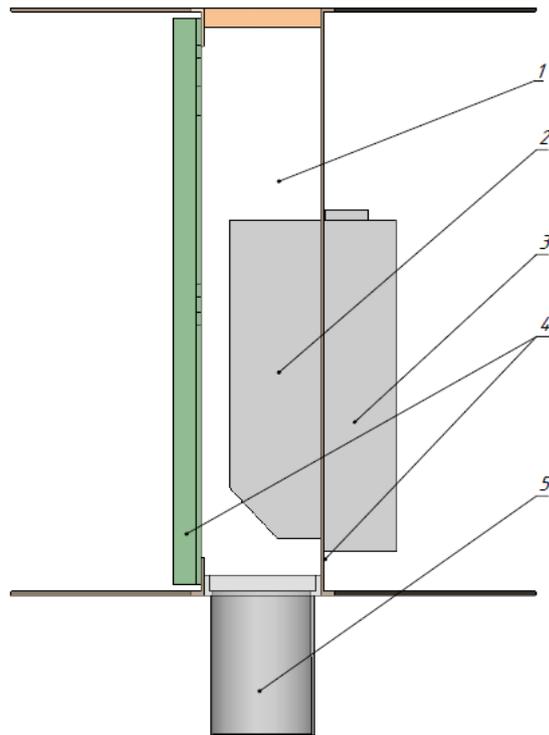
Оценим тепловую энергию, отведенную за счет кондукции от плиты БРЛС к раме фюзеляжа. Для этого воспользуемся результатами теплового расчета, представленными в разделе 1.2. Были получены следующие данные: температура основания БРЛС нагревается до 57,5 °С; предполагаемая площадь контакта с рамой БРЛА составляет 0,008 м² при температуре рамы 55°С; передаваемая тепловая мощность примерно составляет 2,6 Вт, что за

время полета составляет 0,95 МДж, что составляет 7% от энергии, выделяемой за время полета.

Оценим тепловую энергию, отведенную за счет излучения от кожуха в окружающую среду. Воспользуемся теми же результатами расчета. Были получены следующие данные: температура кожуха нагревается до 56,5 °С; площадь кожуха составляет 0,36 м² при температуре окружающей среды 55 °С; передаваемая тепловая мощность примерно составляет 1,9 Вт, что за время полета составляет 0,68 МДж, что составляет 5% от энергии, выделяемой за время полета.

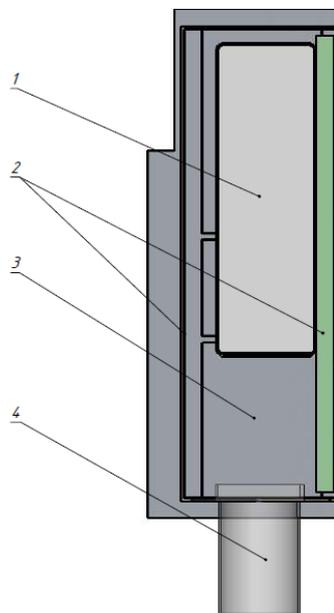
Итак, анализ теплообмена конструкции БРЛС с ОС, показывает, что около 88% тепловой энергии передается в ОС за счет принудительной конвекции. Следовательно, эффективность системы охлаждения БРЛС определяется главным образом эффективностью принудительной конвекции.

Анализ конструкций БРЛС МЛА [33] показывает, что различные системы ПВО БРЛС в основном можно свести к двум основным схемам: «холодная стенка», где тепло снимается охлаждающим воздухом с теплонагруженной стенки корпуса, и внешний обдув корпусов СЧ БРЛС в замкнутом пространстве. Примеры таких конструкций представлены на рисунках 14 и 15.



1 – Воздушный канал; 2 – Радиатор; 3 – Теплонагруженная СЧ БРЛС;
4 – Кронштейны, образующие канал; 5 – Фланец воздуховодный)

Рисунок 14 – Схема обдува типа «холодной стенки»



1 – Обдуваемая СЧ БРЛС; 2 – Стенки канала; 3 – Воздушный канал;
4 – Фланец воздуховодный)

Рисунок 15 – Схема обдува СЧ в замкнутом пространстве

И в том, и в другом случае обобщенную модель ПВО БРЛС МЛА можно представить в виде связанной системы продуваемых плоских и оребренных каналов. Пример такой системы каналов ПВО БРЛС МЛА представлен на рисунке 16.

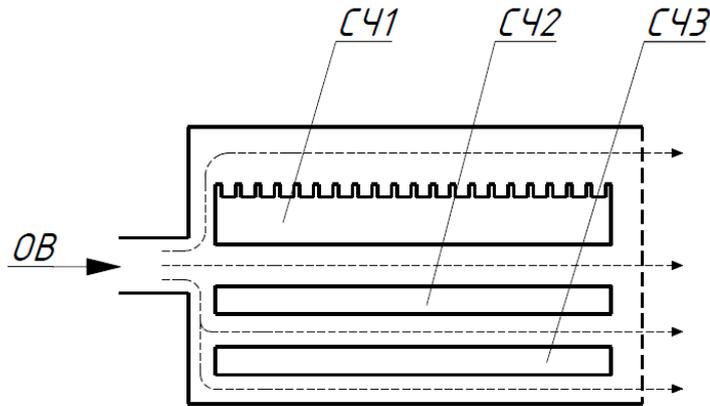


Рисунок 16 – Обобщенная модель ПВО БРЛС МЛА

Исходя из вышеизложенного следует, что эффективность системы ПВО БРЛС МЛА определяется эффективностью теплообмена в продуваемых плоских и оребренных каналах. Исследованию и оптимизации теплообмена в таких каналах посвящены многочисленные работы [34,35]. В этих работах показано, что эффективность теплообмена в каналах определяется главным образом коэффициентом теплоотдачи оребренных поверхностей и характеристическими размерами каналов, определяющими аэродинамическое сопротивление охлаждающему воздуху. Вместе с тем указанные исследования распространяются на ограниченный класс оребрений, в основном пластинчатых, и не рассматривают всю совокупность параметров оребряющих радиаторов, существенно влияющих на коэффициент теплоотдачи [36,37,38]. Это приводит к относительно не высоким (до 35%) показателям повышения эффективности систем ПВО.

Как было отмечено ранее, 88% (11,5 МДж) тепловой энергии отводится из системы за счет принудительной конвекции. Оценим требуемый расход воздуха для отвода тепловой энергии по следующим данным: температура входного воздуха +55°C, если принять температуру воздуха +70°C (перегрев составит 15°C) то для отвода 11,5 МДж тепловой энергии потребуется 767 кг

воздуха за все время полета. Отметим, что в реальных конструкциях расход охлаждающего воздуха (ОВ) фиксирован, так, например, для БРЛС «Корсар-МРЛЦН» подается 2500 кг воздуха за время полета, тогда перегрев составляет 4,6 °С. Таким образом, эффективность использования ПВО БРЛС «Корсар-МРЛЦН» составляет около 32 %, что указывает на наличие существенных резервов ПВО.

Как видно из представленных данных расчета, современные системы ПВО имеют невысокую эффективность теплоотдачи, что говорит об избыточности задаваемого расхода воздуха. Наличие избыточности позволяет ставить задачу перераспределения имеющихся ресурсов охлаждающего воздуха для оптимизации параметров надежности БРЛС.

Таким образом, выполненное в разделе исследование теплообмена конструкций БРЛС позволяет сделать следующие выводы:

- тепловой режим БРЛС при импульсной работе можно считать квазистационарным;
- анализ теплообмена конструкции БРЛС с окружающей средой, показывает, что около 88 % тепловой энергии передается в окружающую среду за счет принудительной конвекции.
- теплоотдача тепловой энергии охлаждающему воздуху систем ПВО современных БРЛС МЛА составляет примерно 32 % его максимальной тепло емкости;
- поскольку обобщенную модель ПВО БРЛС МЛА можно представить в виде связанной системы продуваемых плоских и оребренных каналов, следовательно, эффективность системы ПВО БРЛС МЛА определяется эффективностью теплообмена в продуваемых плоских и оребренных каналах;
- повышение эффективности системы охлаждения может быть достигнуто путем оптимизации параметров радиаторов с целью достижения максимального значения коэффициента теплоотдачи и выбором параметров

продуваемых каналов, обеспечивающих оптимальное распределение охлаждающего воздуха.

Выводы по главе:

- установлено, что все основные параметры БРЛС являются температурозависимыми. На примере УМ СВЧ БРЛС показано, что при повышении его температуры на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ его интенсивность отказов увеличивается примерно на 30 %;
- показано, что основным видом систем охлаждения БРЛС МЛА являются системы ПВО, особенностями которых является ограниченный и фиксированный расход охлаждающего воздуха;
- показано, что тепловой режим БРЛС при импульсной работе можно считать квазистационарным;
- установлено, что около 88 % тепловой энергии передается в окружающую среду за счет принудительной конвекции, эффективность которой определяется теплоотдачей продуваемых плоских и оребренных каналов конструкции БРЛС;
- установлено, что теплоотдача тепловой энергии охлаждающему воздуху систем ПВО современных БРЛС МЛА не превышает 32 % его максимальной тепло емкости. Поэтому повышение эффективности систем ПВО БРЛС МЛА может быть достигнуто путем оптимизации параметров радиаторов с целью достижения максимального значения коэффициента теплоотдачи и выбором параметров продуваемых каналов, обеспечивающих оптимальное распределение охлаждающего воздуха.

Глава 2 Тепловые макромодели конструкции БРЛС

2.1 Методика адаптации конструкции БРЛС к задаче анализа теплового режима

В настоящее время существует достаточное количество САПР инженерного анализа, например, такие как ANSYS, ELCET, CATIA, SolidWorks Simulation & Flow Simulation и другие. С точки зрения анализа теплового режима современные САПР решают систему дифференциальных уравнений с помощью метода конечных элементов (МКЭ) и метода конечных объемов (МКО) [39,40]. Суть методов заключается в следующем. Вся конструкция разбивается на конечные элементы или конечные объемы, в результате чего решение уравнений ищется в узлах сформированной сетки конечных элементов. Следует отметить, что условием решения системы количество уравнений должно быть равно количеству неизвестных значений в узлах и прямо пропорционально количеству конечных элементов. По этой причине исходную 3D модель упрощают с целью уменьшения количества конечных элементов.

Процессы адаптации исходной конструкции к задачам инженерного анализа тепловых режимов является важнейшим этапом формирования расчетной модели, поскольку такая адаптация во многом определяет адекватность расчетных моделей. Эти вопросы рассматривались с момента появления методов расчета тепловых режимов в работах Дульнева Г.Н., Михеева М.А. [31,41].

В настоящее время при использовании средств САПР эти методы были дополнены и развиты для некоторых конструкций радиоэлектронных средств (РЭС), в частности, в ряде диссертационных работ (Саратовский Н.В. и др.

[42; 38]). В указанных работах адаптация исходных конструкций РЭС достигается за счет исключения внутреннего крепежа, шильдиков, гравировок и элементов конструкции (скругления, фаски, переходные отверстия и т.п.).

С другой стороны, они не учитывают ряд особенностей конструкций БРЛС:

- разброс уровней тепловых потоков разных СЧ БРЛС;
- влияние кабельной сети, волноводов и несущих конструкций на эффективность теплообмена.

В настоящей работе предложена методика адаптации конструкции БРЛС к анализу теплового режима, учитывающая указанные особенности.

Рассмотрим упрощения исходной 3D модели на примере БРЛС. На рисунке 17 представлена исходная 3D модель БРЛС «Корсар-МРЛЦН».

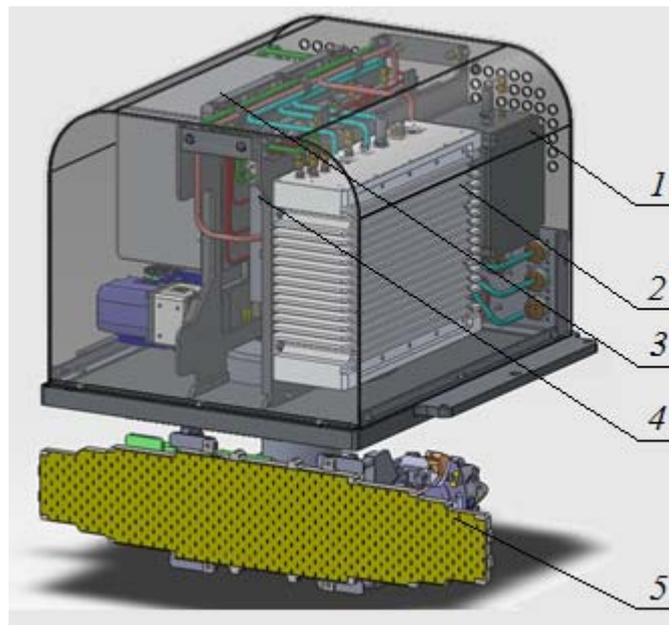


Рисунок 17 – Исходная 3D модель БРЛС

1 – Кварцевый генератор; 2 – БЦВМ; 3 – ПРД; 4 – СЧС; 5 – Антенна.

Исходная 3D модель избыточна для задачи анализа теплового режима. Так, к избыточным относятся элементы конструкции БРЛС, не оказывающие заметного влияния на температурное поле конструкции БРЛС, но существенно влияющие на время расчета теплового режима, например, крепеж (болты, винты, гайки, шайбы, втулки), скругления, фаски, разъемы,

отверстия под разъемы, шильдики, лепестки заземления, заглушки, стойки, прокладки контактные, прокладки герметизирующие и т.п.

В разделе 1.3 показано, что в составе БРЛС присутствуют модули с малыми значениями удельной плотности теплового потока и перегрева. Такие модули при расчете также не должны учитываться.

Например, конструкция БРЛС (рис.17) состоит из двух основных модулей:

- Радиочастотный модуль (РЧМ);
- Антенный модуль (АМ).

Как было отмечено ранее, при одном и том же перегреве РЧМ и АМ попадают в разные «зоны» системы охлаждения: АМ в зону естественного охлаждения, а РЧМ – в зону принудительного воздушного охлаждения. Следовательно, в качестве СО должна быть использована ПВО. Вследствие этого модель конструкции БРЛС для расчета теплового режима будет иметь вид, представленный на рисунке 18.

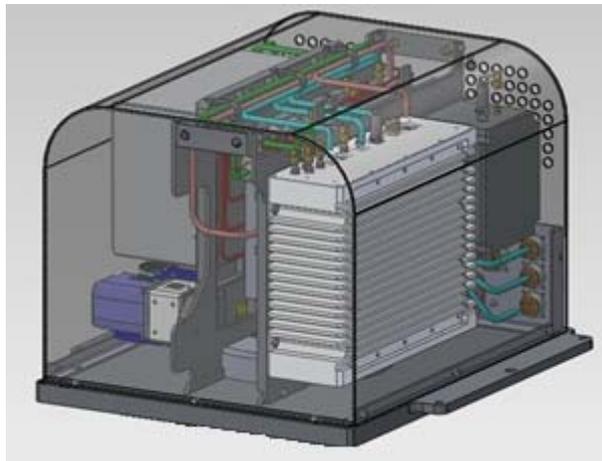


Рисунок 18 – Конструкция БРЛС для теплового расчета

Как указывалось ранее, исходная 3D модель БРЛС избыточна для анализа теплового режима, поэтому необходимо провести адаптацию 3D модели станции к виду, пригодному для корректного анализа теплового режима. Кроме того, поскольку в работе рассматриваются БРЛС с воздушной системой охлаждения, важным является ее адекватное представление не только в тепловой, но и в аэродинамической модели БРЛС. По этой причине

необходимо определить степень влияния кабельной сети и волноводов на аэродинамическое распределение воздушных потоков.

Для оценки этого влияния автором было проведено исследование, степени влияния затененности канала на расход в канале за объектом затенения (волновод или жгут). Результаты представлены на рисунке 20.

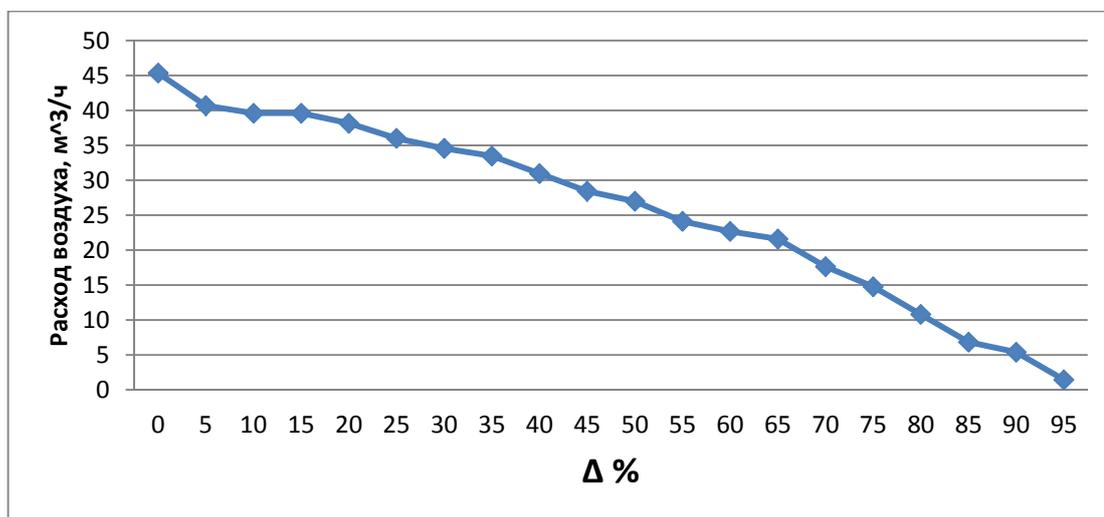


Рисунок 19 – Зависимость расхода воздуха в канале от затенения

Из рисунка 19 видно, что примерно каждые 10% затенения изменяют расход воздуха в канале на 5%. Так например, в БРЛС «Корсар-МРЛЦН» диаметр жгутов питания колеблется от 4 до 10 мм, жгут МКИО имеет диаметр 7 мм, коаксиальные кабели – 4 мм. Ширина каналов в той же станции колеблется от 5 до 25 мм, следовательно, затенение канала может достигать более 50%, что приведет к изменению распределения воздушных потоков, и, как следствие, к изменению температурного поля. Поэтому при расчетах необходимо учитывать кабели, которые затеняют канал более чем на 10%.

Кроме того, следует отметить, что внешние соединители блоков не вносят существенного вклада в отведение тепловой энергии. По этой причине с точки зрения теплового режима их можно не учитывать. С другой стороны, они могут оказывать влияние на аэродинамическое сопротивление воздушных каналов. Из анализа конструкции бортовых блоков (БЦВМ (Багет-62-04), усилитель мощности (ЖНКЮ.464224.002), синтезатор частот и синхросигналов (ЖНКЮ.467875.032), приемник ПЧ (ЖНКЮ.434855.086),

формирователь СВЧ (ЖНКЮ.434852.078), конвертор приемный (ЖНКЮ.434849.224), опорный генератор (ГК213-ТС), ПРД (АБВР.464215.002), МУ СВЧ (АБВР.468714.004), Узел 02-02 ВП, Узел 02-01УВ-С, ПЗМ (ЖНКЮ.464400.009)) следует, что наиболее часто используемыми соединителями являются: СНЦ, РП и СРГ.

Автором был проведен анализ влияния внешних соединителей блоков на аэродинамическое сопротивление воздушного канала. Исследование проводилось при следующих ограничениях:

- фиксированный расход воздуха в системе;
- конструкция корпусов блоков постоянна;
- геометрические размеры каналов постоянны.

Исследование проводилось в САПР SolidWorks программного пакета FlowSimulation. Исследование проводилось на примере БРЛС «Ратник», «Корсар-МРЛЦН», «Гукол-3». Автором была проведена оценка аэродинамического сопротивления каналов в указанных станциях методом прозрачных мембран, описанным в [43]. Исследование проводилось при следующих сценариях. Исходный сценарий: выбирался один из каналов, в котором присутствуют указанные соединители блоков, и проводился аэродинамический анализ системы, в результате которого рассчитывались значение аэродинамического сопротивления выбранного канала и скорость воздушного потока.

Конечный сценарий: в выбранном канале исключались все внешние соединители блока с последующим аэродинамическим анализом системы. После этого рассчитывались и сравнивались значения критерия Рейнольдса для исходного и конечного сценариев. Затем выбирался «следующий» канал, в котором присутствуют внешние соединители, и проводился повторный расчет.

В результате исследования автором было выявлено, что скорость как основной параметр из критерия Рейнольдса меняется незначительно (менее

1-2%), а следовательно, практически не влияет на параметры воздушных каналов. Поэтому в расчете последние также не будут учитываться.

Несущие элементы конструкции (блоки и различные кронштейны) также требуется адаптировать к анализу теплового режима. Для оценки влияния конструктивных элементов автором предложено использовать изменение тепловой проводимости конструкции с помощью следующей формулы [31]:

$$\sigma = \alpha \cdot S, \quad (8)$$

где: α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·°С; S – площадь поверхности, м².

Автором были определены значения тепловой проводимости на примере несущих конструкций, входящих в изделие «Корсар-МРЛЦН». В качестве примера на рисунке 20 представлена конструкция одного из блоков указанного изделия, например: БЦВМ (УИСФ.466226.006).

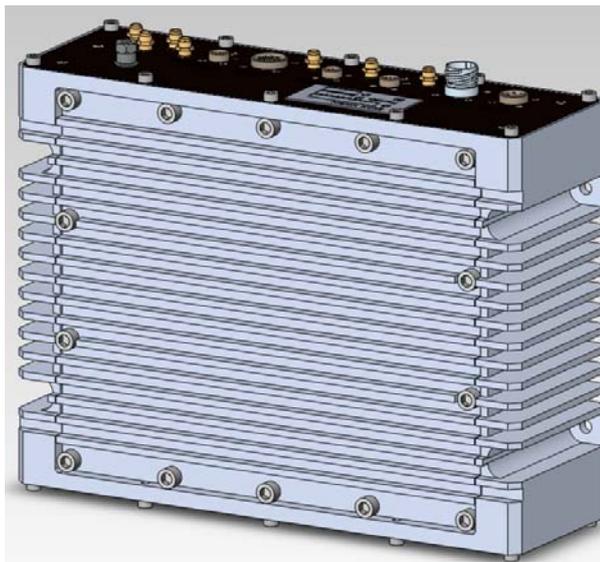


Рисунок 20 – Конструкция БЦВМ

Как видно из рисунка 20, конструкция блока содержит большое количество фасок, скруглений, шильдиков, отверстий под крепеж и под разъемы, а также гравировок на панели соединителей. Результаты анализа конструкции представлены в таблице 6.

Таблица 6 Состав конструкции БЦВМ

Наименование элемента	Размер, мм	Количество элементов
Отверстие	Ø 4,3	20
Отверстие	Ø 4,5	14
Отверстие	Ø 6,6	4
Отверстие	Ø 7	6
Отверстие	Ø 10,5	3
Отверстие	Ø 15	1
Отверстие	Ø 17	1
Отверстие	Ø 18,5	1
Зенкованное отверстие	Ø 2,7/ Ø 7,7x(90±1°)	9
Зенкованное отверстие	Ø 3,2/ Ø 6,2 x(90±1°)	6
Зенкованное отверстие	Ø 3,5/ Ø 8,5x(90±1°)	4
Скругление	7	8
Фаска	0,5x45°	50
Гравировка	0,5	37
Шильдик	30x60x0,8	1

Упрощенная конструкция блока БЦВМ представлена на рисунке 21.

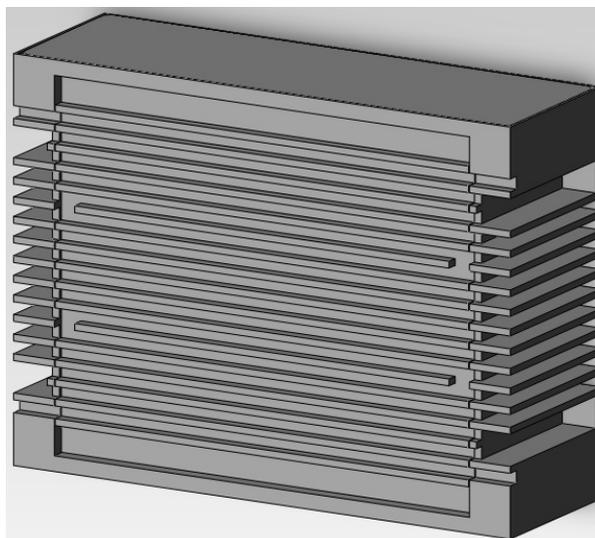


Рисунок 21 – Упрощенная модель конструкции БЦВМ

Общая площадь БЦВМ до упрощения составляет $0,567629 \text{ м}^2$, а после упрощения – $0,569472 \text{ м}^2$. Этим значениям соответствуют значения тепловой проводимости $7,529 \text{ Вт/}^\circ\text{С}$ и $7,554 \text{ Вт/}^\circ\text{С}$ соответственно. Полученные данные позволяют сделать вывод о незначительности ($0,35\%$) влияния этих

элементов на тепловую проводимость конструкции, а следовательно и незначительное их влияние на тепловой расчет.

Наконец, все несущие конструкции содержат элементы крепежа: винты, шайбы, гайки, втулки и др. Как правило, количество элементов крепежа в станциях составляет до 85-95% всех деталей. В работе [42] доказано, что крепеж несущественно (4%) влияет на тепловой расчет.

Исходя из вышеперечисленного, в работе предложен следующий алгоритм адаптации БРЛС к анализу теплового режима (рис.22).

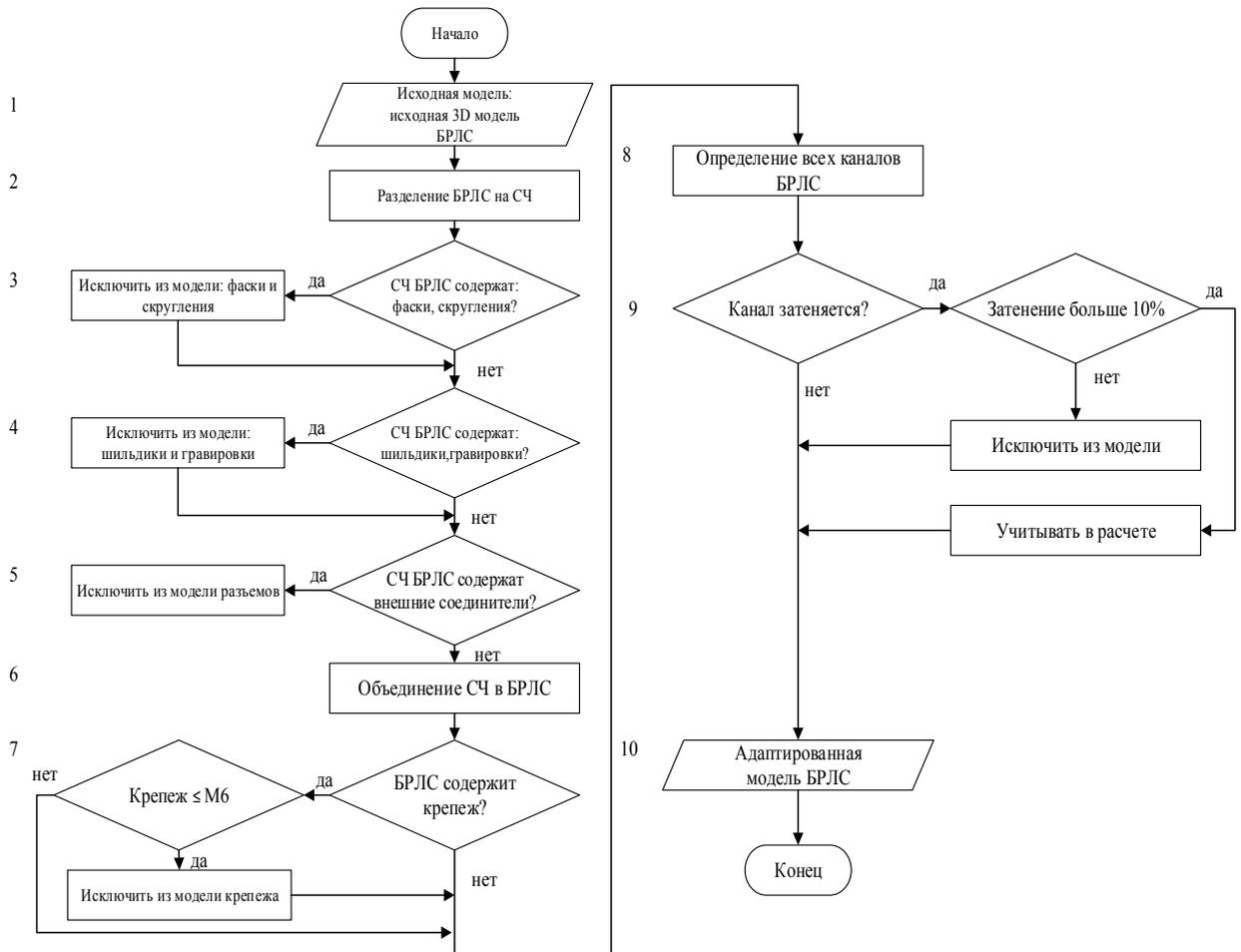


Рисунок 22 – Алгоритм адаптации БРЛС к анализу теплового режима

Рассмотрим алгоритм адаптации БРЛС по этапам.

Этап 1 – задаются исходные данные, в качестве которых служит исходная 3D модель БРЛС.

Этап 2 – исходная 3D модель БРЛС разбивается на отдельные СЧ которые в дальнейшем будут упрощены.

Этап 3 – выполняется проверка наличия в каждой СЧ БРЛС фаски и скругления и исключение их из 3D модели СЧ БРЛС.

Этап 4 – выполняется проверка наличия в каждой СЧ БРЛС шильдиков и гравировок и исключение их из 3D модели СЧ БРЛС.

Этап 5 – выполняется проверка наличия в каждой СЧ БРЛС внешних соединителей и исключение их из 3D модели СЧ БРЛС.

Этап 6 – разделенные на этапе 2 СЧ БРЛС объединяются в единую 3D модель БРЛС с сохранением всех упрощений, выполненных на предыдущих этапах.

Этап 7 – выполняется проверка наличия в 3D модели БРЛС крепежа размером менее М6 и его исключение (включая крепежные отверстия) из модели.

Этап 8 – определяется наличие каналов в БРЛС.

Этап 9 – выполняется проверка условия затенения канала жгутами или волноводным трактом. При затенении канала более 10% элемент затенения необходимо учитывать в 3D модели БРЛС.

Этап 10 – составление адаптированной 3D модели БРЛС.

Использование указанного алгоритма позволило адаптировать конструкцию БРЛС к анализу теплового режима. Адаптация производилась в САПР SolidWorks. Разбиение на сетку конечных элементов и расчеты проводились в той же САПР с использованием программного пакета FlowSimulation. Следует отметить, что процесс разбиения 3D модели станции (исходной и адаптированной) производится при одинаковых настройках, а именно, глобальные настройки сетки КЭ на 6 классе из 8 возможных. Адаптированная конструкция БРЛС представлена на рисунке 23.

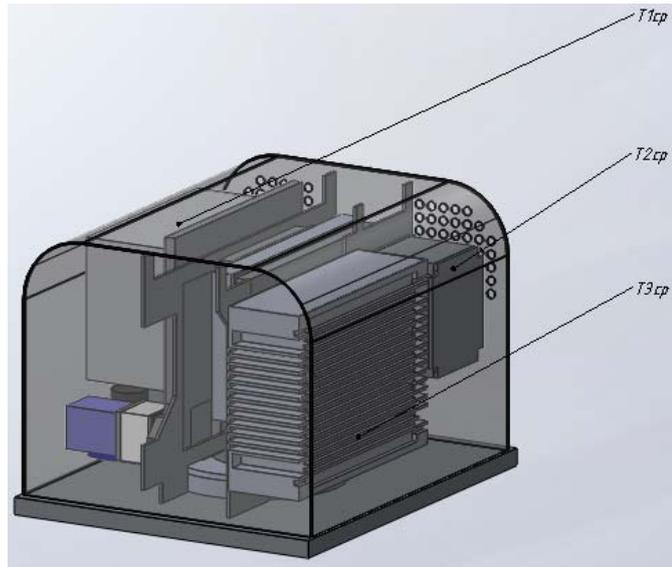


Рисунок 23 – Адаптированная конструкция БРЛС к анализу теплового режима

Расчет проводился при следующих условиях: постоянный расход воздуха (250 кг/ч); температура окружающей среды 55°C; $P_{\text{БЦВМ}}=60$ Вт, $P_{\text{ПРД}}=250$ Вт; $P_{\text{ГК}}=10$ Вт; $P_{\text{счс}}=60$ Вт. Результаты адаптации 3D модели БРЛС (рис.24) представлены в таблице 7.

Таблица 7 Результаты адаптации 3D модели БРЛС

	Количество КЭ	Время, мин	$T_{1cp}, ^\circ\text{C}$	$T_{2cp}, ^\circ\text{C}$	$T_{3cp}, ^\circ\text{C}$
Исходная 3D модель БРЛС	1750207	72	68	62,3	67
Адаптированная 3D модель БРЛС	388935	5	67,2	64,2	64,8

Из данных вышеприведенной таблицы видно, что количество конечных элементов уменьшилось в 4,5 раза, а время на разбиение КЭ – в 14,4 раза. При этом максимальная погрешность результатов в адаптированной модели по отношению к исходной составила 3,5%, что вполне допустимо для инженерных расчетов.

Таким образом, в разделе предложен алгоритм адаптации БРЛС к анализу теплового режима, который в отличие от известных позволяет учесть влияние кабельной сети, волноводов и несущих конструкций на эффективность теплообмена и позволяет при анализе теплового режима

конструкции БРЛС МЛА сократить время анализа примерно в 4,5 раза при погрешности результата анализа около 3,5%.

2.2 Методика формирования тепловых макромоделей конструкций БРЛС

Современные БРЛС представляют собой сложную систему взаимосвязанных тел. С точки зрения теплового режима такие системы представляют собой комбинацию источников и стоков тепла. К первым относятся блоки, а ко вторым – элементы конструкции (кронштейны, основания).

Для обычных конструкций БРЛС, когда источники тепла разнесены, их взаимным влиянием либо пренебрегают, либо ограничиваются рассмотрением взаимодействия соседних источников тепла [44,45]. Такой подход ставит под сомнение адекватность получаемых тепловых моделей для конструкций БРЛС с высокой плотностью размещения, большими значениями плотности тепловых потоков и, следовательно, значительным взаимным влиянием источников тепла.

В инженерном анализе тепловых режимов конструкции РЭС пользуются следующими методами теплового моделирования: метод изотермических поверхностей, метод однородного анизотропного тела [24]. Применение указанных методов возможно, если конструкция удовлетворяет определенным требованиям. В частности, источники тепла должны быть равномерно распределены или на поверхности, или в объеме. Вместе с тем, как показано в разделе 1.3, конструкции БРЛС не удовлетворяют этому требованию.

В главе 1 показано, что современные БРЛС имеют в своем составе СЧ с разными значениями удельных тепловых потоков и, как следствие, различные распределения температурных полей. Кроме того, отличительной

особенностью современных БРЛС является латентность конструкции их СЧ, которые обычно разрабатываются смежными организациями и разработчику БРЛС неизвестна их конструкция. Поэтому границей раздела ответственности разработчика СЧ и разработчика БРЛС является температура корпусов, которая определяется по результатам либо теплового моделирования разработчика СЧ, либо приемо-сдаточных испытаний. Поэтому значения допустимой температуры каждой СЧ стационарного теплового режима известны.

Температура поверхности СЧ БРЛС равна алгебраической сумме температуры окружающей среды и перегревов, обусловленных источниками и стоками тепловой энергии, рассеиваемой в конструкции СЧ, и наведенными от других источников тепла конструкции БРЛС.

В разделе 1.2 представлены результаты расчета теплового режима БРЛС. Из рисунка 11 следует, что температурное поле по поверхности корпусов СЧ имеет существенный разброс значений. Поэтому для расчета перегрева между точкой поверхности СЧ БРЛС и средой воспользуемся выражением [31]:

$$\vartheta_j = \frac{P_j}{\sigma_j}, \quad (9)$$

где: ϑ_j – собственный перегрев j -ой точки поверхности СЧ, °С; P_j – мощность, выделяемая j -ой точкой СЧ, Вт; σ_j – общая проводимость j -ой точки СЧ к среде, Вт/°С.

Также следует учесть перегрев точки на поверхности СЧ БРЛС, обусловленный наведенным от других источников тепла, который рассчитывается по формуле [31]:

$$\vartheta_{jn} = \sum_{i=1; i \neq j}^N \frac{P_i}{\sigma_{ij}}, \quad (10)$$

где: ϑ_{jn} – наведенный перегрев j -ой точки СЧ, °С; σ_{ij} – проводимость между i -ой и j -ой точкой, Вт/°С; P_i – мощность, выделяемая i -ой точкой СЧ, Вт.

Таким образом, температуру корпуса каждой СЧ БРЛС можно рассчитать следующим образом:

$$t_j = t_c + \frac{P_j}{\sigma_j} + \sum_{i=1; i \neq j}^N \frac{P_i}{\sigma_{ij}}, \quad (11)$$

где: t_j – температура j -ой точки СЧ БРЛС, °С; t_c – температура окружающей среды, °С.

С точки зрения времени, затрачиваемого на анализ теплового режима, такой подход к решению задачи по определению температурного поля конструкции является крайне затруднительным и сложным в обработке полученных результатов.

Для обеспечения возможности эффективного анализа теплового режима автором выдвинуто положение о том, что стационарный тепловой режим конструкций БРЛС МЛА определяется теплообменом системы изотермических поверхностей составных (ИП) частей БРЛС.

Таким образом, для формирования тепловой макромодели необходимо сформировать систему ИП СЧ конструкции БРЛС. Для решения этой задачи необходимо определить понятие ИП. Поскольку в реальных конструкциях содержатся десятки и даже сотни точек с различной температурой, то для сокращения объема вычисления предлагается за ИП считать геометрическую поверхность точек, внутри которой температура не превышает заданную величину Δt_3 . Этот перепад температур варьируется от требуемой точности вычисления.

С учетом вышеизложенного тепловая макромодель СЧ будет представлять собой однородное тело с тепловой мощностью P_i , поверхность которого состоит из ИП $\{P_{ij}\}$.

На рисунке 24 приведен алгоритм методики формирования макромодели БРЛС.

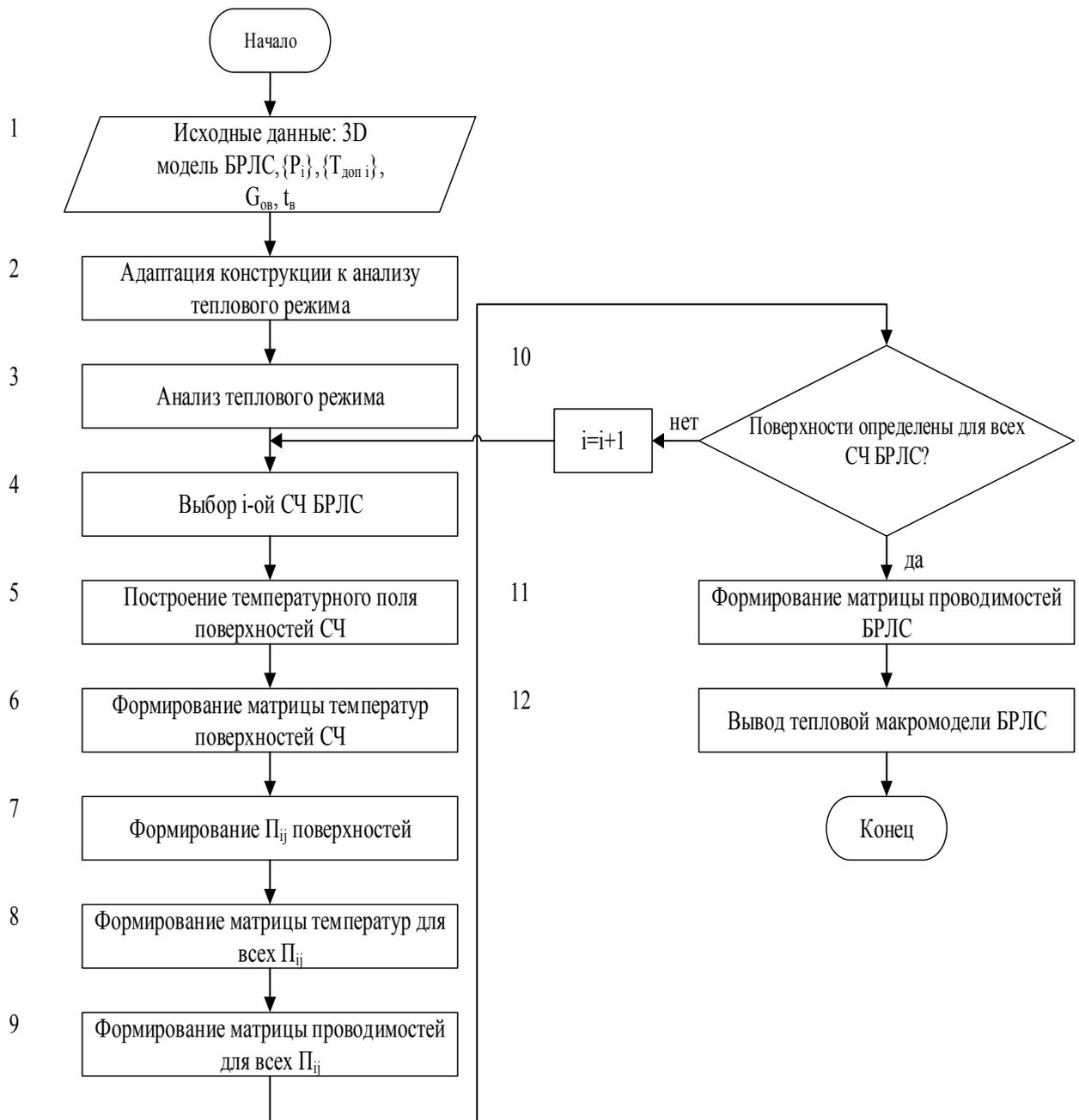


Рисунок 24 – Методика формирования макромоделли БРЛС

Представленная методика содержит следующие этапы:

Этап 1 – задаются исходные данные, в качестве которых служат исходная 3D модель БРЛС, матрица значений мощностей (P_{ij}), расход охлаждающего воздуха (G) и температура входного охлаждающего воздуха (t_v).

Этап 2 –исходная 3D модель БРЛС адаптируется к анализу теплового режима.

Этап 3 – выполняется анализ теплового режима с использованием исходных данных полученных на этапе 1.

Этап 4 – осуществляется выбор i -ой СЧ БРЛС.

Этап 5 – с использованием результатов этапа 3 определяется тепловое поле для каждой поверхности i -ой СЧ БРЛС.

Этап 6 – формируется матрица температуры для каждой стороны i -ой СЧ БРЛС.

Этап 7 – для каждой поверхности i -ой СЧ БРЛС с использованием матрицы температуры, полученной на этапе 6, формируются ИП $\{P_{ij}\}$. Из матрицы температур выбирается максимальное значение ($t_{\max j}$, $j=1$). При этом одну ИП попадают все значения, которые меньше максимального на 6% (значение выбирается в соответствии с требуемой точностью формирования макромодели). Затем выбирается следующая максимальная температура ($j=j+1$), которая меньше $t_{\max j}$ более чем на 6%. Таким образом, процедура повторяется до того момента пока вся поверхность СЧ не будет разбита на ИП.

Этап 8 – формируется новая матрица температур для i -ой СЧ БРЛС, состоящая из $\{P_{ij}\}$ ИП.

Этап 9 – формируется матрица проводимостей для всех поверхностей P_{ij} i -ой СЧ БРЛС методом тепловых характеристик.

Этап 10 – выполняется проверка условия перебора всех СЧ БРЛС. Если ИП определены для всех СЧ БРЛС, осуществляется переход к следующему этапу, в противном случае выбирается следующая ($i=i+1$) СЧ БРЛС и выполняется переход к этапу 4.

Этап 11 – используя данные, полученные на этапе 9, формируется матрица проводимостей БРЛС для всех СЧ БРЛС.

Этап 12 – вывод тепловой макромодели БРЛС.

Проверка адекватности предложенной методики проводилась на примере формирования тепловой макромодели СЧ БРЛС «Ратник».

В результате выполнения этапов 1-3 для БРЛС «Ратник», сразу переходим к выбору одной из СЧ БРЛС; в качестве таковой был выбран УМ СВЧ (ЖНКЮ.464224.002). Анализ теплового режима изделия «Ратник» показал, что максимальная температура корпуса УМ СВЧ составляет 106,18 °С.

На этапе 5 строим температурное поле всех поверхностей выбранной СЧ. С помощью программы STATISTICA и результатов, полученных на этапе 3, были построены температурные поля всех поверхностей УМ СВЧ. На рисунке 25 представлено температурное поле УМ СВЧ всех поверхностей.

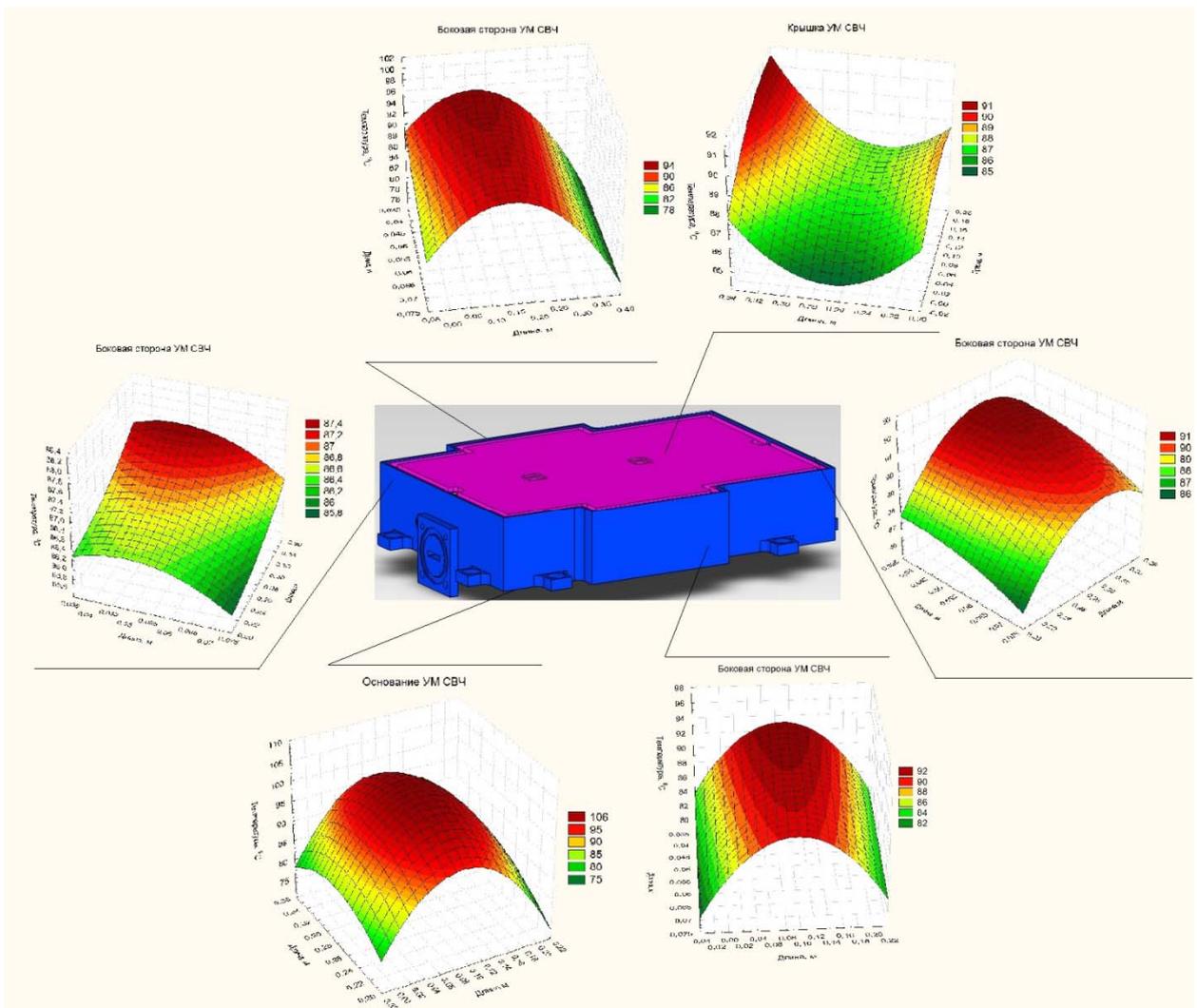


Рисунок 25 – Температурное поле УМ СВЧ

Как видно из рисунка 25, температурное поле разных поверхностей корпуса УМ СВЧ неоднородно. На этапе 6 формируется матрица температурного поля, полученного в результате выполнения этапа 3.

Для формирования тепловой макромодели СЧ БРЛС рассмотрим температурное поле основания усилителя мощности СВЧ (УМ СВЧ), представленное на рисунке 26. Пример матрицы теплового поля основания приведен в таблице А.1 приложения А.

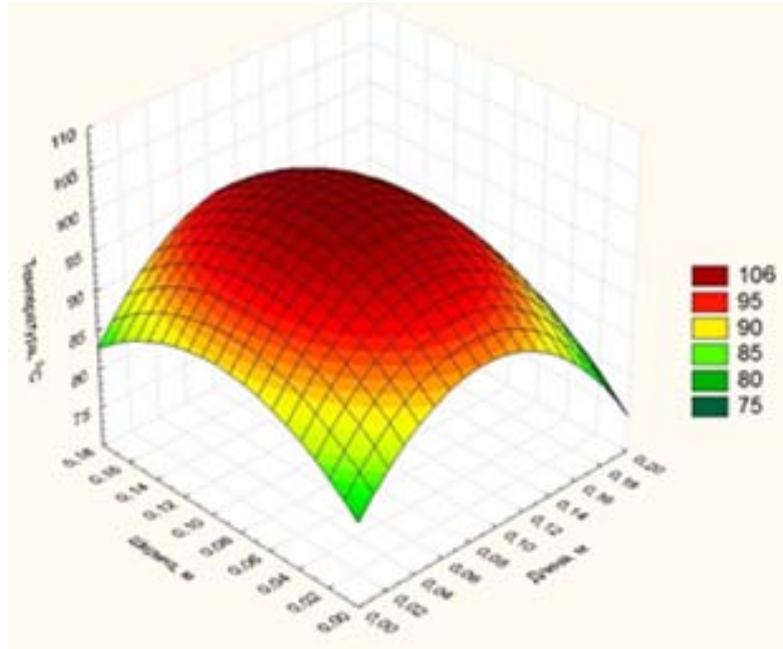


Рисунок 26 – Температурное поле основания УМ СВЧ

В соответствии с этапом 7, необходимо сформировать j -ое количество ИП на выбранной поверхности. Для этого, воспользуемся результатами, полученными на этапе 6, и в соответствии с изложенной выше методикой рассчитаем количество ИП. Как упоминалось ранее, максимальная температура основания составляет $106,18^{\circ}\text{C}$, а минимальное значение составляет $85,56^{\circ}\text{C}$. Поэтому фрагменты будут формироваться в указанном диапазоне температур. Таким образом, было сформировано 4 ($j=4$) ИП на поверхности основания УМ СВЧ со следующими диапазонами температур: $[106,18; 99,81)^{\circ}\text{C}$, $[99,81; 93,82)^{\circ}\text{C}$, $[93,82; 88,19)^{\circ}\text{C}$, $[88,19; 82,89)^{\circ}\text{C}$. На рисунке 28 представлено основание УМ СВЧ, состоящее из четырех ИП.

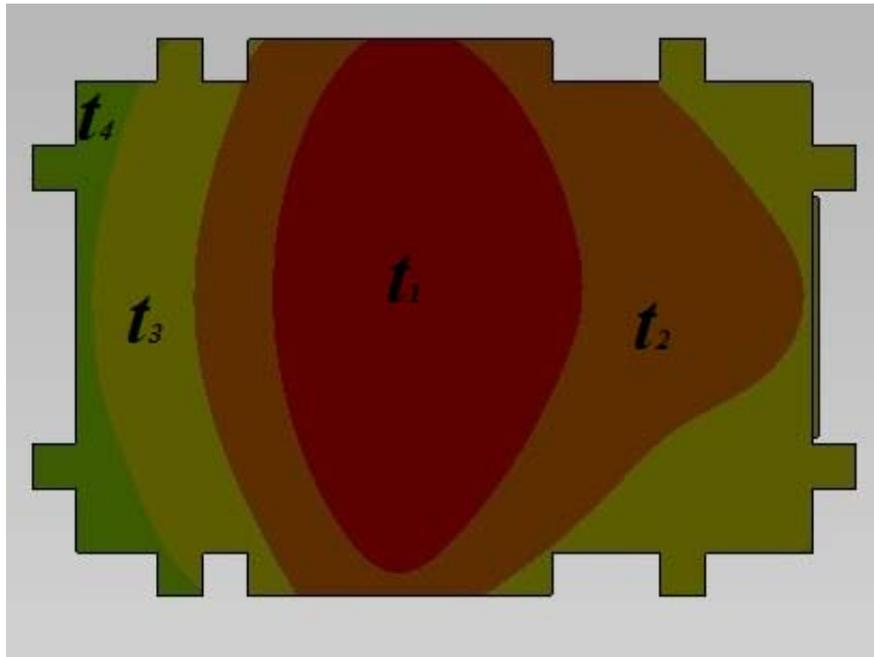


Рисунок 27– Основание УМ СВЧ, состоящее из ИП

Полученные диапазоны также необходимы для формирования матрицы температур (этап 8) для всех выделенных ИП. Матрица формируется из максимальных значений температур в каждом диапазоне. Исходя из этого условия матрица температур для основания УМ СВЧ имеет следующий вид: (106,18; 99,81; 93,82; 88,19).

Матрица проводимостей (этап 9) формируется с помощью метода тепловых характеристик [46]. Соответственно сформированная матрица проводимостей основания УМ СВЧ имеет следующий вид: (0,1;0,24;0,15;0,31).

Одним из завершающих этапов (этап 10) является проверка на определение ИП всех СЧ БРЛС. Если ИП определены для всех СЧ БРЛС, выполняются последние два этапа (11 и 12). Суть этапов заключается в формировании общей тепловой макромодели БРЛС. Исходными данными для формирования тепловой макромодели БРЛС являются все матрицы проводимостей всех СЧ, которые получают в результате выполнения этапов 4-9. Общий вид тепловой макромодели БРЛС представляется в виде матрицы проводимостей:

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \dots & \sigma_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{i1} & \dots & \sigma_{ij} \end{pmatrix} \quad (12)$$

где: σ_{ij} – проводимость i -го элемента j -го фрагмента.

Таким образом, разработанный автором алгоритм позволяет сформировать тепловую макромодель БРЛС в виде матрицы теплопроводностей. Кроме того, тепловую макромодель можно представить при помощи электротепловой аналогии [31]. Общий вид тепловой макромодели в виде тепловой цепи представлен на рисунке 28.

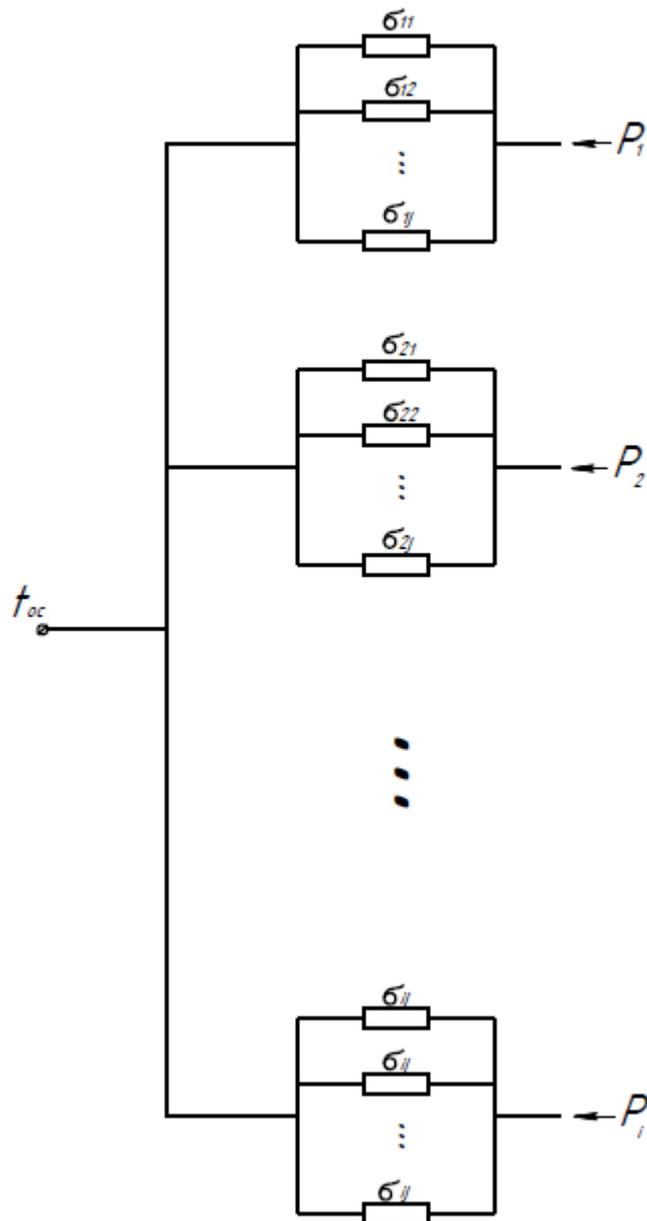


Рисунок 28 – Общий вид тепловой макромодели БРЛС

Проведем оценку точности разработанной методики формирования тепловых макромоделей конструкции БРЛС на примере БРЛС «Ратник». Для точной оценки точности необходимо сравнить результаты физического (натурного) эксперимента с вычисленной тепловой макромоделью. В нашем случае проведение натурного эксперимента крайне затруднительно и экономически нерентабельно, поэтому автор выполнил ряд вычислительных экспериментов.

Вычислительный эксперимент проводился в САПР SolidWorks в программном пакете FlowSimulation. При этом точными будем считать результаты, полученные в результате анализа теплового режима без использования тепловой макромоделей конструкции БРЛС. Расчет проводился при следующих исходных данных: фиксированный расход охлаждающего воздуха (250 кг/ч), фиксированная тепловая мощность СЧ БРЛС ($P_{\text{УМ СВЧ}}=180$ Вт, $P_{\text{БЦВМ}} = 80$ Вт, $P_{\text{ПЗМ}}=75$, $P_{\text{ГК}}=10$). Результаты анализа теплового режима представлены в таблице 8.

Таблица 8 Результаты анализа теплового режима БРЛС «Ратник»

СЧ	УМ СВЧ	ПЗМ	БЦВМ	ГК
$T_{\text{к}}, ^\circ\text{C}$	106,18	79	70	67

Проведем оценку точности полученной макромоделей для УМ СВЧ. Как описывалось ранее, выбор точности разбиения на ИП определяется в пределах от 2 до 10 %, поэтому автором предлагается сформировать тепловые макромоделей с точностью в 2, 4, 6, 8 и 10 %. Результаты моделирования представлены в таблице 9.

Таблица 9 Результаты моделирования

Точность фор-ия фрагмента	Диапазоны температур, °С	Кол- во фрагм ентов	Тепловая макромодель , Вт/°С	$T_{к}^*$, °С	$\frac{T_{к}}{T_{к}^*}$, %	Время расчета, мин.
2%	[106,18;104,05), [104,05;101,97), [101,97;99,93), [99,93;97,93), [97,93;95,97), [95,97;94,05), [94,05;92,17), [92,17;90,33), [90,33;88,52), [88,52;86,75), [86,75;85,02).	11	(0,012;0,016; 0,017;0,023; 0,029;0,43; 0,091;0,113; 0,145;0,31; 0,014)	107,35	1,1	47
4%	[106,18;101,93), [101,93;99,89), [99,89;95,89), [95,89;93,98), [93,98;90,22), [90,22;86,61), [86,61;83,16).	7	(0,031;0,044; 0,028;0,043;0 ,091; 0,11;0,14)	107,56	1,3	40
6%	[106,18; 99,81), [99,81; 93,82), [93,82; 88,19), [88,19; 82,89).	4	(0,1;0,24;0,15 ;0,31)	107,77	1,5	33
8%	[106,18; 97,66), [97,66;89,85), [89,85;82,66).	3	(0,073;0,016; 0,56)	108,34	2,1	25
10%	[106,18; 95,56), [95,56; 86,01), [86,01; 77,41)	3	(0,01;0,25;0,4 5)	108,84	2,5	25

Таким образом, результаты эксперимента, представленные в таблице 9 показывают, что при максимальном числе ИП точность расчета составляет 1,1 %, но при этом время расчета равно 47 мин. При минимальном числе изотермических поверхностей точность расчета составляет 2,5 %.

Учитывая зависимость точности вычисления и времени расчет от количества ИП можно определить оптимальное соотношения ИП.

Таким образом, результаты исследования, изложенные в разделе, позволяют сделать следующие выводы:

- стационарный тепловой режим конструкций БРЛС МЛА с высокой точностью (1-3)% определяется теплообменом системы изотермических поверхностей СЧ БРЛС;
- предложенная методика формирования макромоделей конструкции БРЛС позволяет выбирать рациональное соотношение между временем и точностью анализа теплового режима конструкции БРЛС.

2.3 Разработка методики макро моделирования штыревого радиатора

Как было установлено в первой главе диссертации, повышение эффективности системы ПВО БРЛС МЛА охлаждения может быть достигнуто путем оптимизации параметров радиаторов с целью достижения максимального значения его коэффициента теплоотдачи.

Исследованиям эффективности теплоотдачи различных радиаторов посвящены многочисленные работы, среди которых основополагающими являются труды Дульнева Г.Н., Михеева М.А., Авдеевского В.С., Роткопа Л.Л., а так же работы современных авторов [31,41,47].

Как известно, коэффициент теплоотдачи является функцией от большого количества переменных (скорости охлаждающего воздуха, температуры охлаждающего воздуха, коэффициента теплопроводности материала и др.).

Установление зависимости между коэффициентом теплоотдачи и параметрами конструкции радиатора возможно либо аналитически, либо экспериментально. Анализ литературных источников [31,37,47,48,49] показывает, что зависимости между параметрами радиатора и

коэффициентом теплоотдачи недостаточно исследованы. В частности, в настоящее время не установлен исчерпывающий набор параметров конструкции радиатора, существенно влияющих на коэффициент его теплоотдачи. Из анализа [31,41,47], следует, что при прочих равных условиях (при равных определяющих геометрических размерах, расходе воздуха и мощности источника тепла, теплопроводности, степени черноты и т.п.) наиболее эффективными являются штыревые радиаторы с шахматным расположением ребер. По этой причине в работе рассматривался именно данный тип радиаторов. В результате анализа различных профилей ребер (круг, квадрат, ромб, шестиугольник) шестиугольный профиль был выбран как наиболее эффективный.

С целью устранения указанного недостатка автором была предложена методика макро моделирования штыревого радиатора.

Ниже представлен алгоритм указанной методики:

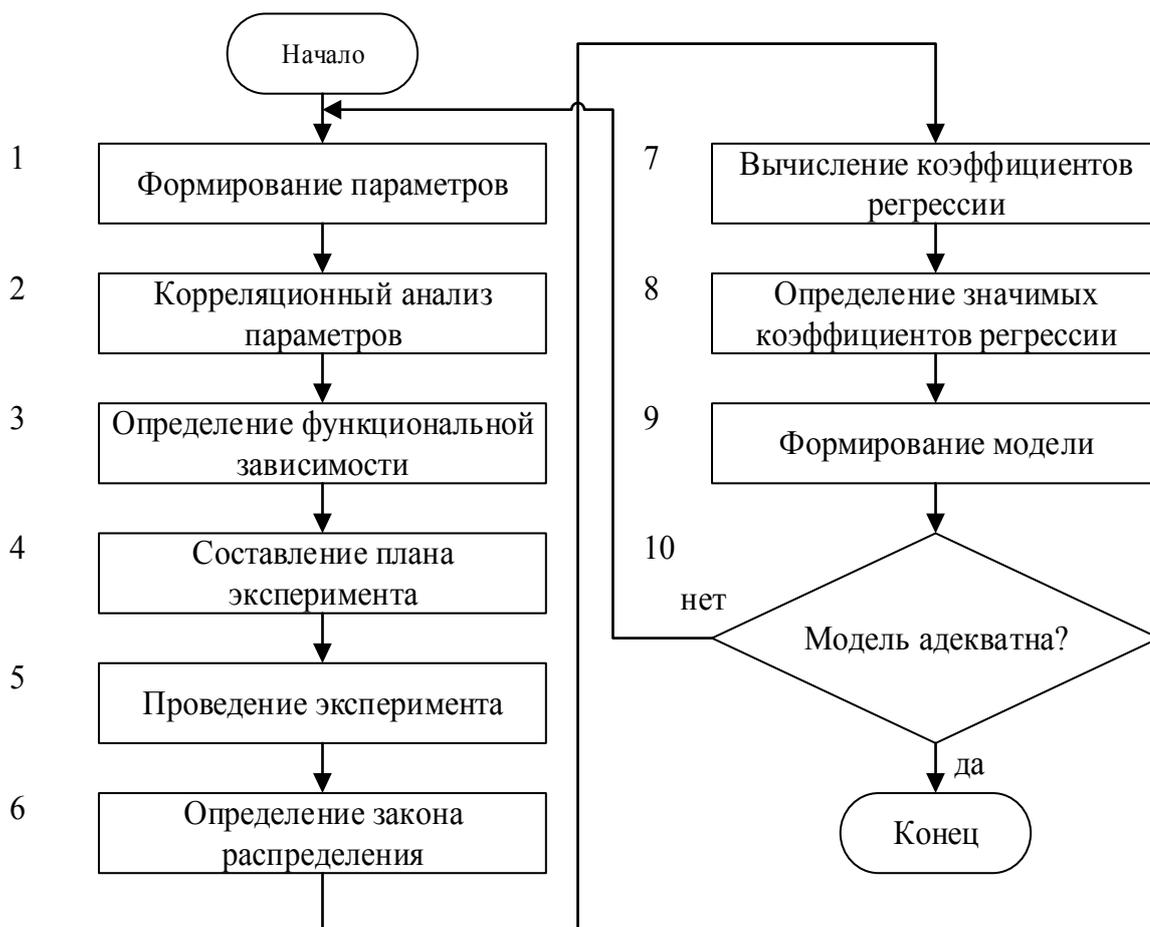


Рисунок 29 – Алгоритм методики макро моделирования радиатора

Для получения аналитической зависимости влияния конструктивных параметров радиатора на коэффициент его теплоотдачи используются статистические методы анализа [50,51].

Алгоритм методики содержит следующие этапы:

Этап 1 – формирование множества параметров, предположительно влияющих на функцию отклика.

Этап 2 – проведение корреляционного анализа с использованием сформированного множества параметров на этапе 1 с целью определения коэффициента корреляции и тесноты связи. Все параметры, имеющие «тесную» связь с функцией отклика, будут учитываться, параметры со «слабой» связью необходимо не учитывать.

Этап 3 – определение функциональной зависимости функции отклика.

Этап 4 – формирование плана эксперимента, заключающегося в выборе интервалов варьирования факторов и составлении таблицы экспериментов.

Этап 5 – проведение эксперимента в соответствии со сформулированным планом эксперимента (этап 4).

Этап 6 – определения закона распределения.

Этап 7 – вычисление коэффициентов регрессии с использованием данных, полученных на этапе 5.

Этап 8 – определение значимых коэффициентов регрессии. Все значимые коэффициенты необходимо учитывать при формировании модели.

Этап 9 – формирование модели с использованием данных полученных на этапе 8.

Этап 10 – проверка адекватности сформированной модели. Проверка проводится с использованием критерия Фишера.

Рассмотрим применение алгоритма методики на примере штыревого радиатора.

На этапе 1 необходимо сформировать множество параметров конструкции штыревого радиатора, предположительно влияющих на значение функции отклика. Как отмечалось ранее, эффективность радиатора

определяется значением его коэффициента теплоотдачи, поэтому в качестве функции отклика будем считать коэффициент теплоотдачи радиатора.

Автором предложены следующие параметры радиатора, влияющие на коэффициент теплоотдачи: шаг установки ребер, высота ребра, углы раскрыва ребра, длина ребра, ширина ребра, высота ребра, угол атаки. Для примера на рисунке 30 представлены геометрические параметры конструкции шестиугольного профиля ребра радиатора.

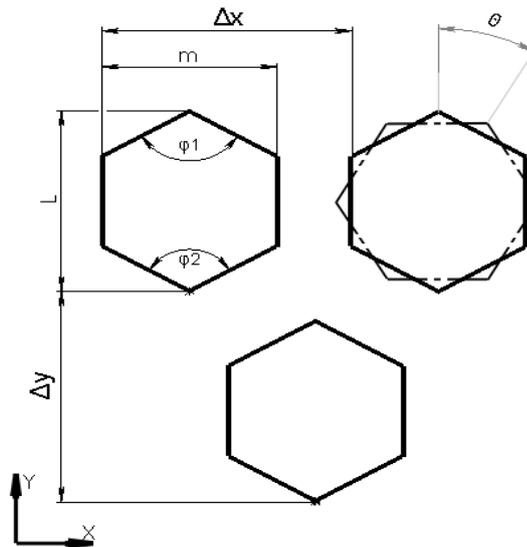


Рисунок 30 – Шестиугольный профиль ребра

(шаг установки ребер Δ , углы раскрыва ребра (передний φ_1 и задний φ_2),
угол атаки Θ , длина ребра L , ширина ребра m)

Таким образом сформировано исчерпывающее множество конструктивных параметров $X(x_1, x_2, \dots, x_m)$ радиатора, предположительно влияющих на коэффициент теплоотдачи.

Для проведения корреляционного анализа потребовалось провести ряд экспериментальных исследований, направленных на определение значения тесноты связи. Для этого были приняты следующие исходные данные: расход воздуха, плотность теплового потока, размер основания радиатора, размеры воздушного канала (постоянные величины). В теории экспериментов независимые параметры $X(x_1, x_2, \dots, x_m)$ принято называть

факторами [52]. Экспериментальный анализ влияющих факторов проводился с использованием САПР SolidWorks FlowSimulation.

В качестве примера на рисунке 31 представлен график зависимости коэффициента теплоотдачи от переднего угла раскрыва ребра радиатора.

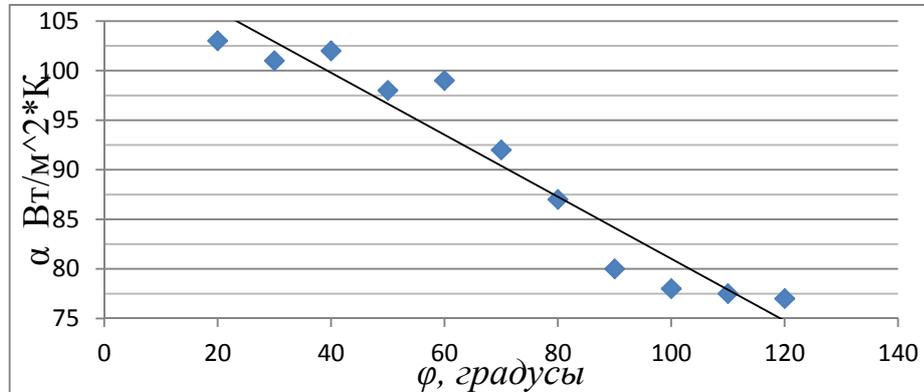


Рисунок 31 – Зависимость коэффициента теплоотдачи от переднего угла раскрыва

При значениях коэффициента корреляции $[\pm 0,7; \pm 1]$ характер связи является сильным [53]. В представленном примере значение коэффициента корреляции составляет примерно $-0,97$. Знак минус показывает, что значение теплоотдачи уменьшается с увеличением угла раскрыва штыря. Полученное значение коэффициента корреляции доказывает, что связь между параметрами является сильной. Вычисление значения коэффициента корреляции получено при помощи программы STATISTICA, разработанной компанией StatSoftInc [54,55]. Результаты корреляционного анализа представлены в таблице 10.

Таблица 10 Результаты корреляционного анализа

№	Фактор	Значение R	Теснота связи
1	Передний угол раскрыва	-0,97	Тесная
2	Задний угол раскрыва	-0,91	Тесная
3	Высота штыря	0,89	Тесная
4	Ширина штыря	-0,96	Тесная
5	Длина штыря	-0,98	Тесная
6	Шаг установки по X	0,95	Тесная
7	Шаг установки по Y	-0,65	Слабая
8	Угол атаки	-0,4	Слабая

Результаты исследования параметров влияющих на эффективность радиатора, показали, что наиболее значимыми факторами являются угол профиля, высота, ширина и длина штыря, а также шаг установки штырей по X.

На этапе 3 необходимо определить вид функциональной зависимости. При определении общего вида математической модели [52] автором выбрана модель, описанная полиномом первой степени:

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j \cdot x_j + \sum_{\substack{j \neq u \\ j, u=1}}^{C_k^2} b_{ju} \cdot x_j \cdot x_u \quad (13)$$

где: y – целевая функция (параметр оптимизации); b_0 – свободный член полинома; b_j – коэффициенты, учитывающие линейные эффекты; b_{ju} – коэффициенты, характеризующие эффекты попарного взаимодействия; j – номер фактора; k – число факторов; C_k^2 – число сочетаний из k факторов по два.

Условием составления плана эксперимента (этап 4) является формирование требования к нему.

Большое распространение получили планы с наименьшим числом уровней по каждому фактору, так как на практике число уровней часто оказывается ограниченным. Поэтому необходимо подобрать такой план эксперимента, который отвечает требованиям к наименьшему числу уровней варьирования факторов.

Получившие широкое распространение ортогональные и рототабельные композиционные планы 2-го порядка не удовлетворяют этому требованию, т.к. предусматривают использование каждого фактора на пяти уровнях (+1, 0, -1, + α и - α , где α – плечо звездных точек, отличающееся по величине от единицы). Смена уровней при реализации плана усложняет эксперимент, увеличивает его стоимость, а в ряде случаев делает его невозможным.

Требованию наименьшего числа уровней в полной мере удовлетворяют трехуровневые планы. В них каждый фактор варьируется всего на трех

уровнях: $-1,0$ и -1 . К такого рода планам относятся планы типа V_k . Эти планы являются точными, близкими к D-оптимальным, а также содержат относительно не большое число опытов, построенных на гиперкубе. Планы V_k предусматривают расположение уровней факторов в вершинах k -мерного куба с координатами ± 1 . Эти точки в количестве 2^k соответствуют полному факторному эксперименту. Кроме них в планах V_k входят центры $(k-1)$ -мерных граней, координаты которых принимают значения $0,0,\dots,\pm 1,0,\dots,0$.

Эти точки по аналогии с ортогональными и рототабельными планами условно можно называть «звездными» с величиной плеча $\alpha = \pm 1$. Число таких точек равно $2k$. Общее число точек плана V_k [56]:

$$N = 2^k + 2 \cdot k = 2^6 + 2 \cdot 6 = 76, \quad (14)$$

где: N – число опытов; k – количество факторов.

По результатам корреляционного анализа (этап 2) было сформировано 6 факторов. Исходя из этого с использованием формулы 14 было рассчитано, что необходимо 76 точек плана. Составим закодированный план эксперимента (таблица 1.Б представлена в приложении Б).

Поскольку провести 76 реальных экспериментов затруднительно и дорого (потребовалось бы 76 конфигураций конструкции радиатора), автором проведены эксперименты в программном пакете FlowSimulation САПР SolidWorks. Таким образом, было сформировано 76 конфигураций радиатора. Для каждой конфигурации был создан свой проект расчета в указанном программном пакете. Общими исходными данными для всех проектов являются следующие параметры: расход охлаждающего воздуха, тепловая мощность, размер воздушного канала, размер основания радиатора (следует отметить, что все перечисленные выше параметры фиксированы). Для оценки коэффициента теплоотдачи использовалось значение температуры воздуха на выходе радиатора, определяемое с помощью метода прозрачных мембран [43]. На рисунке 32 представлен график зависимости значения коэффициента теплоотдачи от номера эксперимента.

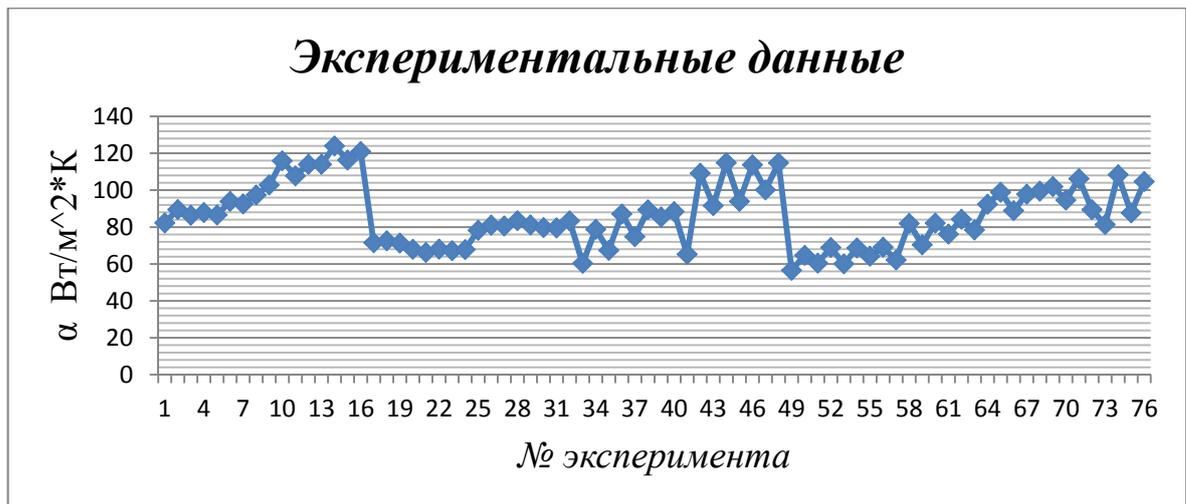


Рисунок 32 – Зависимость значения коэффициента теплоотдачи от номера эксперимента

В результате выполнения этапа 5 автором получены данные по каждому эксперименту (представлены в таблице 1.Б приложения Б).

Как правило, при достаточно большом количестве факторов предполагают, что закон распределения случайной величины имеет известную функцию распределения и является нормальным законом. Строго говоря, это является гипотезой, которую следует подтвердить или опровергнуть. Для определения закона распределения (этап б) воспользуемся простым, но весьма приближенным методом проверки о принадлежности к тому или иному закону распределения (проверка согласия). Необходимо построить гистограмму случайной величины и сопоставить ее с функцией предполагаемого закона распределения. Если экспериментальные точки лежат вблизи теоретического графика закона распределения, то предположение о законе распределения не противоречит выбранному закону распределения. Алгоритм построения гистограммы описан в [52]. Гистограмма построена с использованием программы STATISTICA.

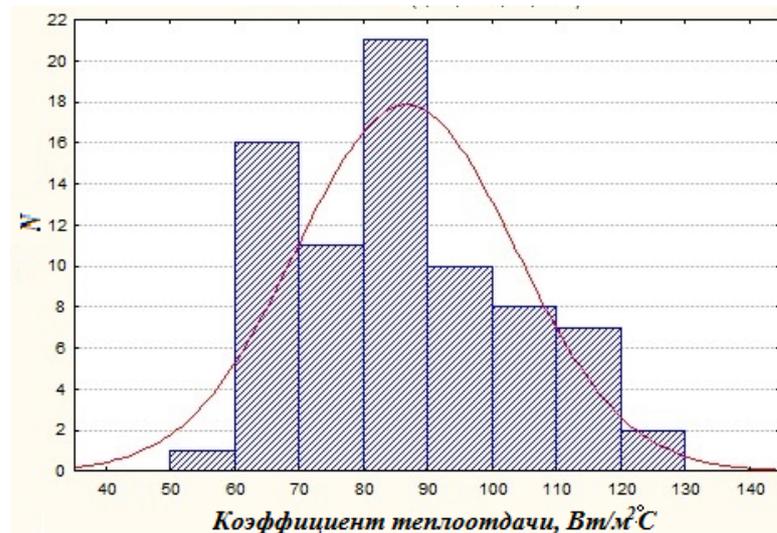


Рисунок 33 – Гистограмма распределения случайной величины α

Для более точной оценки закона распределения используют критерии согласия: Пирсона, Колмогорова-Смирнова и др. При помощи программы STATISTICA была построена не только гистограмма, но и проведена проверка гипотезы по критерию Колмогорова-Смирнова. Как следует из результатов (рис.33), случайная величина распределена по нормальному закону распределения.

Используя данные полученные на этапе 5, вычислим коэффициенты регрессии (этап 7). Программа STATISTICA позволяет их определить. В результате были получены численные значения коэффициентов регрессии: $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$.

После определения коэффициентов регрессии (этап 7) необходимо определить, какие из коэффициентов являются значимыми (этап 8), а какие – нет. Уменьшение числа коэффициентов регрессии в формуле 13 позволит уменьшить сложность уравнения. В той же программе произведена оценка значимости коэффициентов (этап 8), при этом оказалось, что все коэффициенты являются значимыми. Коэффициенты попарного взаимодействия факторов не учитывались, поскольку не оказывают существенного (2,7%) влияния на значение коэффициента теплоотдачи.

Таким образом, в результате выполнения этапов 1-8 сформирована модель (этап 9), представленная следующим уравнением (15):

$$\alpha = b_0 + x_1(b_1) + x_2(b_2) + x_3(b_3) + x_4(b_4) + x_5(b_5) + x_6(b_6) \quad (15)$$

где: x_1 – передний угол штыря, x_2 – задний угол штыря, x_3 – ширина штыря, x_4 – длина штыря, x_5 – высота штыря, x_6 – шаг установки штырей.

На этапе 10 при помощи критерия Фишера (F_p) была проведена проверка адекватности полученной модели. С этой целью сравнивались два значения критерия Фишера: табличное и расчетное. Если расчетное значение оказывалось меньше табличного ($F_p < F_T$), модель – признавалась адекватной, в противном случае модель отвергалась. Значение F_p определяется в соответствии с формулой (16):

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_{вп}^2} \quad (16)$$

Указанная проверка адекватности модели также производилась с использованием программы STATISTICA. В результате проверки модель оказалась адекватной. Функция отклика имеет следующий вид уравнения (17):

$$\alpha = 100,46 + x_1(-9,93) + x_2(-3,99) + x_3(-2,8) + x_4(-3) + x_5(0,57) + x_6(3,31), \quad (17)$$

Таким образом, исследования, выполненные в разделе, позволяют сделать следующие выводы:

- разработана тепловая макромодель штыревого радиатора, отличающаяся от известных системным подходом к выбору всех значимых параметров, влияющих на его теплоотдачу, что позволяет сделать вывод, что эта макромодель позволяет обеспечить максимальную теплоотдачу;
- разработанная методика формирования макромодели радиатора может быть распространена на другие типы радиаторов.

2.4 Разработка методики распределения воздушных потоков

В настоящее время вопросами оптимизации распределения воздушных потоков орбренных каналов и моделированию систем воздушного охлаждения бортовой авиационной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) посвящен ряд работ ([36,57] и др.). В указанных работах рассмотрены отдельные части системы воздушного охлаждения и решены оптимизационные задачи для них, вместе с тем вся система воздушного охлаждения (СВО) целиком не рассматривается.

Как упоминалось ранее (раздел 1.3), основная (88%) часть тепловой энергии передается от источников тепловой энергии в окружающую среду за счет конвекции. Из раздела 1.2 следует, что расход охлаждающего воздуха строго фиксирован, поэтому эффективное использование воздуха (съем тепловой энергии с поверхности СЧ БРЛС) определяет эффективность СВО.

Исходя из вышеизложенного, автором сформулирована задача разработки методики распределения потоков ОВ, обеспечивающей нормальный тепловой режим БРЛС.

Автором предлагается следующая методика представленная на рисунке 34.

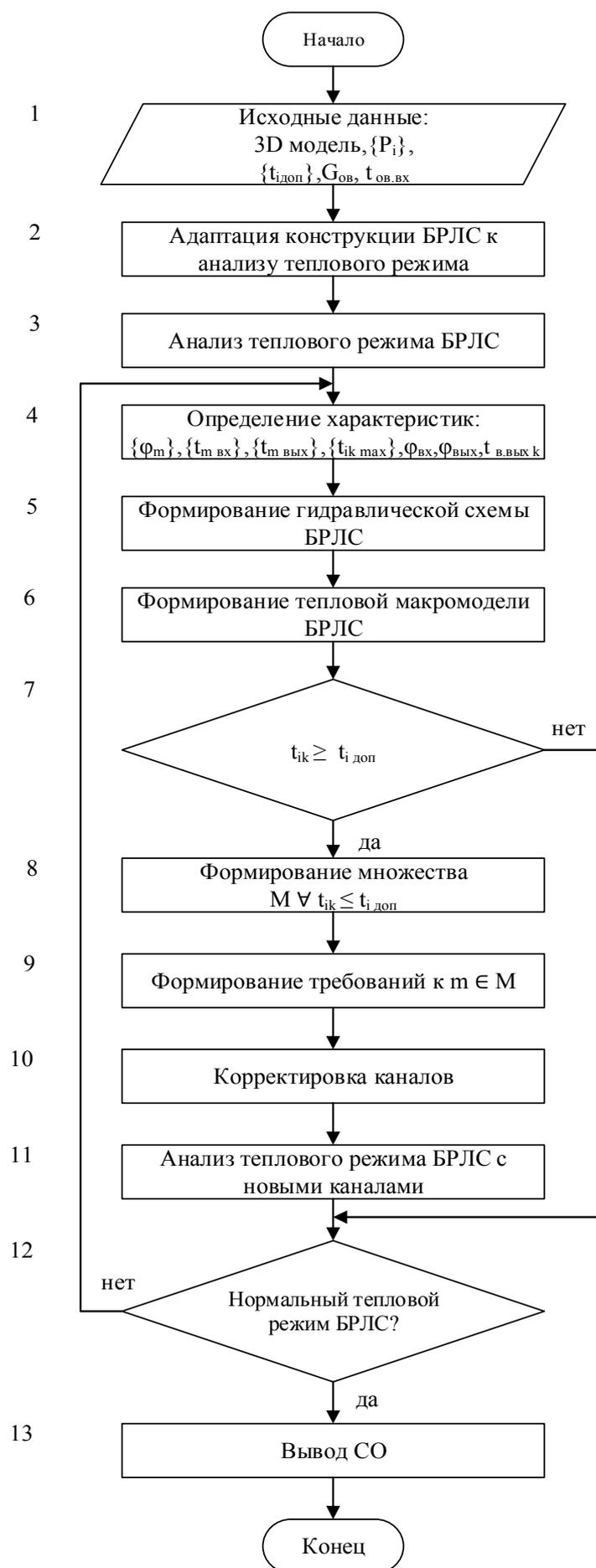


Рисунок 34 – Методика распределения воздушных потоков БРЛС

Рассмотрим предложенную методику по этапам.

Этап 1 – Задаются следующие исходные данные:

- 3D модель конструкции БРЛС;
- матрица мощностей всех СЧ БРЛС $\{P_i\}$;
- матрица допустимых температур поверхностей СЧ БРЛС $\{t_{i \text{ доп}}\}$;
- расход охлаждающего воздуха ($G_{\text{об}}$);
- температура входного воздуха ($t_{\text{об.вх}}$).

Этап 2 – адаптация исходной конструкции БРЛС к анализу теплового режима с помощью алгоритма предложенного в разделе 2.1.

Этап 3 – анализ теплового режима БРЛС.

Этап 4 – определение следующих характеристик:

- перепады давлений каждого канала $\{\varphi_m\}$;
- температуры входного $\{t_{\text{м.вх}}\}$ и выходного $\{t_{\text{м.вых}}\}$ воздуха для каждого канала;
- входное ($\varphi_{\text{вх}}$) и выходное ($\varphi_{\text{вых}}$) давление в системе;
- температуры корпусов всех СЧ БРЛС ($t_{ik \text{ max}}$).

Следует отметить, что все характеристики каналов (давление и температура) определяются при помощи метода прозрачных мембран [43], а количество воздушных каналов задается конструкцией БРЛС.

Этап 5 – формирование гидравлической схемы БРЛС с использованием данных полученных на этапе 4. Используя матрицы перепадов давления и значений входного и выходного давления, в системе формируется гидравлическая схема БРЛС. На рисунке 35 представлен общий вид гидравлической схемы.

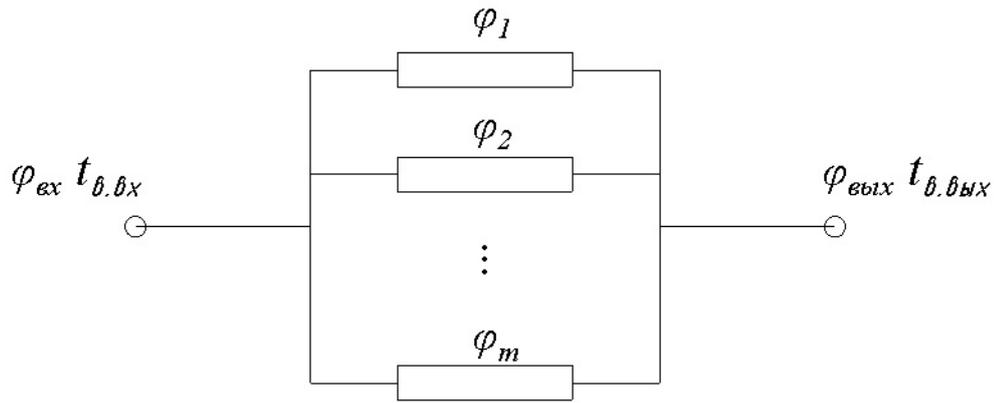


Рисунок 35 – Общий вид гидравлической схемы БРЛС

Этап 6 – формирование тепловой макромоделли БРЛС с использованием методики, предложенной в разделе 2.2.

Этап 7 – проверка удовлетворения условия $t_{ik \max} \geq t_{i \text{ доп.}}$. Если требование выполняется для всех СЧ БРЛС, то осуществляется переход к этапу 12. Иначе выполняется переход к следующему этапу.

Этап 8 – формирование множества M , состоящего из m каналов, для которых выполняется условие $t_{ik \max} \geq t_{i \text{ доп.}}$

Этап 9 – формирование требований ко всем каналам $m \in M$ и переход к следующему этапу.

Этап 10 – корректировка параметров каналов заключается в изменении сечения канала при ограничениях, накладываемых конструкцией БРЛС. Следует отметить, что каналы могут быть образованы одной и более СЧ БРЛС (например: канал, образованный стенкой кожуха и одной из СЧ БРЛС, канал образованный двумя СЧ БРЛС и т.д.). Общий случай канала, сформированного двумя СЧ, представлен на рисунке 36.

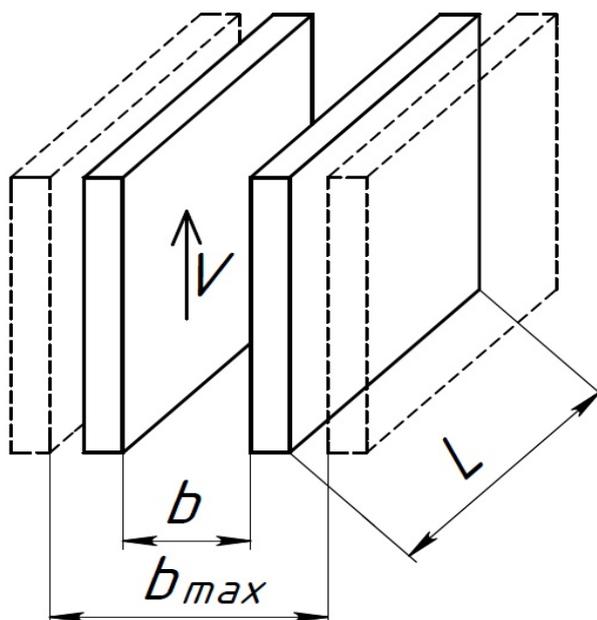


Рисунок 36 – Канал между СЧ БРЛС

На рисунке 36 представлен канал образуемый между двумя СЧ БРЛС с геометрическими характеристиками канала:

b – ширина канала, м; b_{max} – максимальная допустимая ширина канала, м; L – длина канала (выбирается в зависимости от движения воздушных потоков), м; V – скорость движения воздуха в канале, м/с.

С помощью данных, полученных на этапе 4, и уравнения Бернулли [58], вычисляются скорость и объем охлаждающего воздуха для всех каналов, принадлежащих множеству M . Определив параметры V_m и зная площадь сечения каждого канала, вычисляется G_m для всех каналов:

$$G_m = V_m \cdot S_m \cdot 3600, \quad (18)$$

где: G_m – расход ОВ в m -ом канале, кг/ч; V_m – скорость ОВ в m -ом канале, м/с; S_m – площадь сечения m -го канала, m^2 .

$$S_m = b_m \cdot L_m, \quad (19)$$

где: b_m – ширина m -го канала, м; L_m – длина m -го канала, м.

Далее, используя тепловую макромодель БРЛС, необходимо вычислить отведенную тепловую мощность для каждого канала:

$$P_{ij} = \sigma_{ij} \cdot (t_{m \text{ вых}} - t_{m \text{ вх}}), \quad (20)$$

где: P_{ij} – отведенная тепловая мощность в ОС от i -ой СЧ БРЛС j -го фрагмента, Вт.

Таким образом, вычислив все значения P_{ij} для всех каналов, не удовлетворяющих условию этапа 7, можно вычислить суммарную тепловую мощность, отводимую в каждом канале. Для этого воспользуемся следующей формулой:

$$P_m = \sum_{i=j=1}^{I,J} P_{ij}, \quad (21)$$

где: P_m – суммарная тепловая мощность, отводимая в ОС в m -ом канале, Вт.

Как отмечалось ранее, канал может быть сформирован из одной и более СЧ, а следовательно, для каждого канала $m \in M$ количество i -ых СЧ определяется индивидуально.

Для формирования требований к СВО определим тепловую мощность, которую необходимо дополнительно передать в окружающую среду. Указанная величина вычисляется по известным значениям P_m и P_i для каждой СЧ:

$$P_{\text{тр}} = \sum_{i=1}^I P_i - P_m, \quad (22)$$

где: $P_{\text{тр}}$ – требуемая тепловая мощность, которую необходимо отвести от m -го канала, Вт; i – количество СЧ, формирующих канал m .

После определения $P_{\text{тр}}$ необходимо определить требуемый дополнительный расход воздуха для отвода указанной тепловой энергии. Вычисление дополнительного расхода ОВ выполняется по формуле [31]:

$$G_{m \text{ доп}} = \frac{0,86 \cdot P_{\text{тр}}}{C_p \cdot (t_{m \text{ вых}} - t_{m \text{ вх}})}, \quad (23)$$

где: $G_{m \text{ доп}}$ – требуемый дополнительный расход ОВ для m -го канала, кг/ч; $P_{\text{тр}}$ – суммарная тепловая мощность, Вт; C_p – теплоемкость теплоносителя, кДж/кг·°С; ΔT – перегрев относительно теплоносителя, °С.

Отсюда, зная требуемый расход ОВ, определяем общий расход ОВ на каждый канал в соответствии с формулой:

$$G_{m \Sigma} = G_m + G_{m \text{ доп}}, \quad (24)$$

где: $G_{m \Sigma}$ – общий расход ОВ на m -ый канал, кг/ч.

Используя формулу 24 (для расхода), выразим значение требуемой площади сечения m -го канала:

$$S_{m \text{ нов}} = \frac{G_{m \Sigma}}{V_m \cdot 3600}, \quad (25)$$

где: $S_{m \text{ нов}}$ – новое значение площади сечения m -го канала, м^2 .

Таким образом, необходимо скорректировать конструкцию БРЛС с новыми каналами, после чего совершается переход к следующему этапу.

Этап 11 – анализ теплового режима БРЛС с новыми значениями каналов.

Этап 12 – проверка условия на нормальный тепловой режим БРЛС, если условие выполняется, осуществляется переход к следующему этапу, иначе к этапу 4.

Этап 13 – вывод сформированной СО.

Таким образом, в разделе предложена методика распределения воздушных потоков, позволяющая обеспечить нормальный тепловой режим путем перераспределения охлаждающего воздуха в конструкции БРЛС.

Выводы к главе:

- предложен алгоритм адаптации конструкции БРЛС к анализу теплового режима, который в отличие от известных позволяет учесть влияние кабельной сети, волноводов и несущих конструкций на эффективность теплообмена, а при анализе теплового режима конструкций БРЛС МЛА обеспечивает сокращение примерно в 4,5 раза времени анализа при погрешности около 3,5 %;

- установлено, что стационарный тепловой режим конструкций БРЛС МЛА с высокой точностью (1-3)% определяется теплообменом системы ИП составных частей БРЛС;

- предложена методика формирования макромоделей конструкции БРЛС, которая позволяет выбирать рациональное соотношение между временем и точностью анализа теплового режима конструкции БРЛС;
- разработана тепловая макро модель штыревого радиатора, отличающаяся от известных системным подходом к выбору всех значимых параметров, влияющих на его теплоотдачу, что позволяет сделать вывод, что эта макро модель позволяет обеспечить максимальную теплоотдачу;
- предложена методика распределения воздушных потоков, позволяющая обеспечить нормальный тепловой режим путем перераспределения охлаждающего воздуха в конструкции БРЛС.

Глава 3 Методика конструирования теплонагруженных БРЛС

3.1 Постановка задачи и выбор критерия оптимизации

Целью диссертационной работы является повышение надежности БРЛС путем обеспечения оптимального температурного поля конструкции. Оптимальным температурным полем считается распределение температур элементов конструкции, при котором обеспечивается максимальное значение вероятности безотказной работы (ВБР) БРЛС за время полета МЛА.

При компоновке конструкции БРЛС может быть разработано n альтернативных вариантов конструкции, которые образуют множество V мощностью n .

В свою очередь каждый из вариантов V_i , принадлежащих множеству V , может порождать некоторое число отличающихся друг от друга вариантов СО. Отличия заключаются в отсутствии (наличии) ребренной поверхности радиатора, различном распределении потоков охлаждающего воздуха и т.п. Таким образом, общее число вариантов W построения СО может существенно превышать число вариантов компоновки конструкции БРЛС.

Задача синтеза оптимальной СО может быть сформулирована следующим образом: определить вариант построения СО w_0 из множества W , обеспечивающий максимальное значение ВБР БРЛС за время полета при условии обеспечения нормального теплового режима конструкции БРЛС.

В соответствии с формулой 1 (раздел 1.1) ВБР зависит от времени полета t . Учитывая, что t фиксировано, максимальное значение ВБР обеспечивается при минимальном значении λ_3 .

С учетом ограниченного времени полета и требований минимальной массы БРЛС обычно конструкции БРЛС не предусматривают резервирование

СЧ. Поэтому структурная модель надежности БРЛС – последовательная, а эксплуатационная интенсивность отказов БРЛС равна:

$$\Lambda_{\text{э}} = \sum_{i=1}^N \lambda_{\text{э}i}, \quad (26)$$

где: $\lambda_{\text{э}i}$ – эксплуатационная интенсивность отказов i -ой СЧ БРЛС, 1/час;
 N – число СЧ.

В свою очередь $\lambda_{\text{э}i}$ определяется выражением:

$$\lambda_{\text{э}i} = \lambda_{\text{э}i} \cdot \prod_{j=1}^N K_j, \quad (27)$$

где: K_j – коэффициенты, учитывающие условия эксплуатации и электрические режимы работы СЧ БРЛС.

В силу того, что для конкретного варианта конструкции БРЛС условия эксплуатации не меняются или меняются несущественно (при монтаже радиатора), можно принять:

$$\lambda_{\text{э}i} = \Lambda_{\text{э}i} \cdot K_{Ti}, \quad (28)$$

где: $\Lambda_{\text{э}i}$ – эксплуатационная интенсивность отказов i -ой СЧ БРЛС с учетом всех коэффициентов, учитывающих условия эксплуатации и электрические режимы работы СЧ БРЛС, кроме значений температур; K_T – коэффициент, учитывающий распределение температур.

Подставив выражение 26 в 28, получим значение эксплуатационной интенсивности отказов БРЛС:

$$\Lambda_{\text{э}} = \sum_{i=1}^N \Lambda_{\text{э}i} \cdot K_{Ti}, \quad (29)$$

Поскольку минимальное значение $\Lambda_{\text{э}}$ обеспечивает максимум ВБР БРЛС, то в качестве критерия оптимизации СО выбираем $\Lambda_{\text{э}}$.

С учетом изложенного задача синтеза оптимальной СО БРЛС может быть представлена в следующем виде:

$$\Lambda_{\text{э}0} \rightarrow \min \Lambda_{\text{э}j}, j = 1 \dots m, \quad (30)$$

при $t_{ij \max} \leq t_{ij \text{ доп}}$

где: m – число вариантов построения СО (мощность множества W),
 $t_{ij \max}$, $t_{ij \text{ доп}}$ – максимальная температура поверхности корпуса i -ой СЧ j -ого варианта конструкции БРЛС и ее допустимое значение.

3.2 Выбор метода оптимизации

Задача оптимального синтеза СО БРЛС, сформулированная в разделе 3.1, относится к задачам дискретной оптимизации. Методы решения задач дискретной оптимизации делятся на следующие группы [59]:

1. Методы отсечения;
2. Комбинированные методы;
3. Приближенные методы.

Поскольку оптимизационная задача (30) является линейной, то наиболее подходящим методом ее решения является метод отсечений. Суть метода заключается в том, что по результатам анализа ограничений задачи на каждом этапе отбрасываются варианты СО конструкции БРЛС, которые заведомо не могут быть оптимальными. Таким образом снижается размерность решаемой задачи, что позволяет перейти от полного перебора вариантов к направленному перебору.

Исходя из этого, решение задачи содержит два основных этапа.

На первом этапе методом отсечений формируется подмножество допустимых вариантов СО, удовлетворяющих ограничениям (30).

На втором этапе с использованием методов оптимизации определяется оптимальный вариант.

Рассмотрим некоторые методы отсечения, пригодные для решения задачи оптимизации в нашем случае. К таким методам относится, например, метод Гомори [60].

Указанный метод относится к методам решения задач целочисленного программирования. Суть метода заключается в формировании ограничений, которые позволяют «отсекать» нецелочисленные решения задачи, при этом не «отсекая» ни одного целочисленного решения. В основе метода Гомори находится следующий алгоритм, который основан на симплексном методе и содержит следующие этапы [61]:

1. Задача линейного программирования решается без учета условия целочисленности симплексным или двойственным симплекс-методом. Если все элементы оптимального плана являются целыми числами, то решение заканчивается для задачи целочисленного программирования.

2. Если среди элементов оптимального решения есть нецелые числа, то необходимо выбрать элементы с наибольшей дробной частью и составить дополнительное ограничение (сечение), которое отсекает нецелочисленные решения. Дополнительные ограничения вводятся в том случае, если значение базисной переменной в оптимальном плане является дробным числом. Тогда некоторые элементы в строке симплекс-таблицы – являются дробным числом. Вычисляя дробные части, формулируется неравенство по строке симплекс-таблицы, которое обладает всеми свойствами правильного отсечения.

3. Неравенство преобразуется в уравнение путем введения дополнительной неотрицательной переменной и включается в оптимальную симплексную таблицу.

4. Полученная расширенная задача решается двойным симплекс-методом. Если новый оптимальный план будет целочисленным, то задача решена. В противном случае необходимо вернуться к пункту 2 алгоритма.

Если в процессе решения в симплексной таблице появляется уравнение с нецелым свободным членом и целыми коэффициентами, то данная задача не имеет целочисленного решения.

Поскольку в основе представленного метода лежит симплекс-метод, рассмотрим его как один из методов решения сформулированной ранее задачи.

Симплекс-метод является универсальным методом решения задачи линейного программирования с любым числом переменных и с любым числом ограничений. Суть метода заключается в построении базисных решений, на которых монотонно убывает линейный функционал, до ситуации, пока выполняются необходимые условия локальной

оптимальности. Основное свойство симплекс-метода заключается в том, что решение задачи осуществляется итерационно. На каждой итерации алгоритм переходит к новой угловой точке, которая потенциально может улучшить значение целевой функции. Этот процесс перехода от одной угловой точки к следующей заканчивается, когда дальнейшее улучшение значения целевой функции невозможно [62].

Последовательность вычисления симплекс-метода можно разделить на два основных этапа [63]:

Этап 1 – в последней строке исходной симплекс-таблицы выбирается наименьший отрицательный элемент. Столбец, соответствующий этому элементу, называется ведущим. Он определяет переменную, которая будет введена в базис на данном этапе.

Этап 2 – вычисляются отношения свободных членов к элементам ведущего столбца (симплекс-отношение). Находятся наименьшее неотрицательное из этих симплекс-отношений. Оно соответствует ведущей строке, которая определяет переменную, выводимую из базиса.

Этап 3 – если все симплекс-отношения окажутся отрицательными, то задача не имеет решений (оптимум целевой функции не достигается).

Этап 4 – на пересечении ведущей строки и ведущего столбца находится ведущий элемент.

Этап 5 – если имеется несколько одинаковых по величине симплекс-отношений, то выбирают любое из них. То же самое относится к отрицательным элементам последней строки симплекс-таблицы.

Этап 6 – после нахождения ведущего элемента переходят к следующей таблице. Для этого вначале заполняется первый столбец, записывая новые базисные элементы.

Этап 7 – далее элементы ведущей строки, за исключением симплекс-отношения, делятся на ведущий элемент.

Этап 8 – остальные элементы ведущего столбца принимают равными нулю.

Этап 9 – оставшиеся элементы симплекс-таблицы вычисляются по правилу прямоугольника: мысленно вычерчивается прямоугольник, одна вершина которого совпадает с разрешающим элементом, а другая – с элементом, образ которого ищется; остальные две вершины определяются однозначно. Тогда искомый элемент z будет равен соответствующему элементу первой таблицы минус дробь, в знаменателе которой стоит разрешающий элемент, а в числителе – произведение элементов из двух неиспользованных вершин прямоугольника.

Этап 10 – Записывается соответствующий опорный план и снова проверяется условие оптимальности.

Этап 11 – Вычисляется оптимальное значение целевой функции.

Рассмотрим достоинства и недостатки симплекс-метода. Достоинством метода при небольшом числе факторов является возможность быстро получить оптимум целевой функции. Недостатком симплекс-метода является необходимость на каждом шаге пересчитывать все коэффициенты и свободные члены, что приводит к увеличению объема вычислений и, как следствие, замедляет поиск оптимума целевой функции. Кроме того, при большом количестве ограничений существенно затрудняется нахождение оптимума целевой функции.

Для решения поставленной задачи (раздел 3.1) в качестве математического метода выбираем симплекс-метод, поскольку метод позволит провести направленный перебор. Рассмотрим подробнее применение симплекс-метода к поставленной задаче оптимизации.

На первом шаге формируется множество вариантов конструкций, удовлетворяющих требованию по обеспечению нормального теплового режима и для которых возможно решить задачу обеспечения нормального теплового режима за счет перераспределения воздушных ОВ и формирования радиатора. На втором шаге из сформированного множества допустимых вариантов конструкций производится поиск оптимальной конструкции за счет перераспределения воздушных потоков и формирования

радиатора для СЧ, вносящих существенный вклад в значение эксплуатационной интенсивности отказов БРЛС. В результате выбирается вариант конструкции БРЛС с минимальным значением эксплуатационной интенсивности отказов.

Таким образом, в разделе проведен обзор и выбран один из математических методов оптимизации. В качестве метода оптимизации автором был выбран симплекс-метод.

3.3 Разработка методики конструирования теплонагруженных БРЛС

Алгоритм синтеза СО предназначен для решения оптимизационной задачи формирования конструкции БРЛС МЛА с максимальной при заданных исходных данных надежностью при условии ограничений на объем и температуру охлаждающего воздуха. Алгоритм объединяет результаты, полученные в предыдущей главе диссертационной работы.

Исходными данными являются: множество V исходных вариантов конструкции БРЛС, задаваемых 3D моделями. Варианты конструкции содержат одинаковые СЧ и отличаются только вариантами компоновки. Поэтому для всех конструкций будут одинаковыми: значения мощностей, потребляемых СЧ (P_i); допустимые температуры поверхности корпуса СЧ ($t_{i \text{ доп}}$); значения эксплуатационной интенсивности отказов СЧ ($\lambda_{эi}$); значения зависимостей температурных коэффициентов СЧ (K_{Ti}); допустимый расход и температура охлаждающего воздуха ($G_{\text{ов}}, t_{\text{вх.ов}}$).

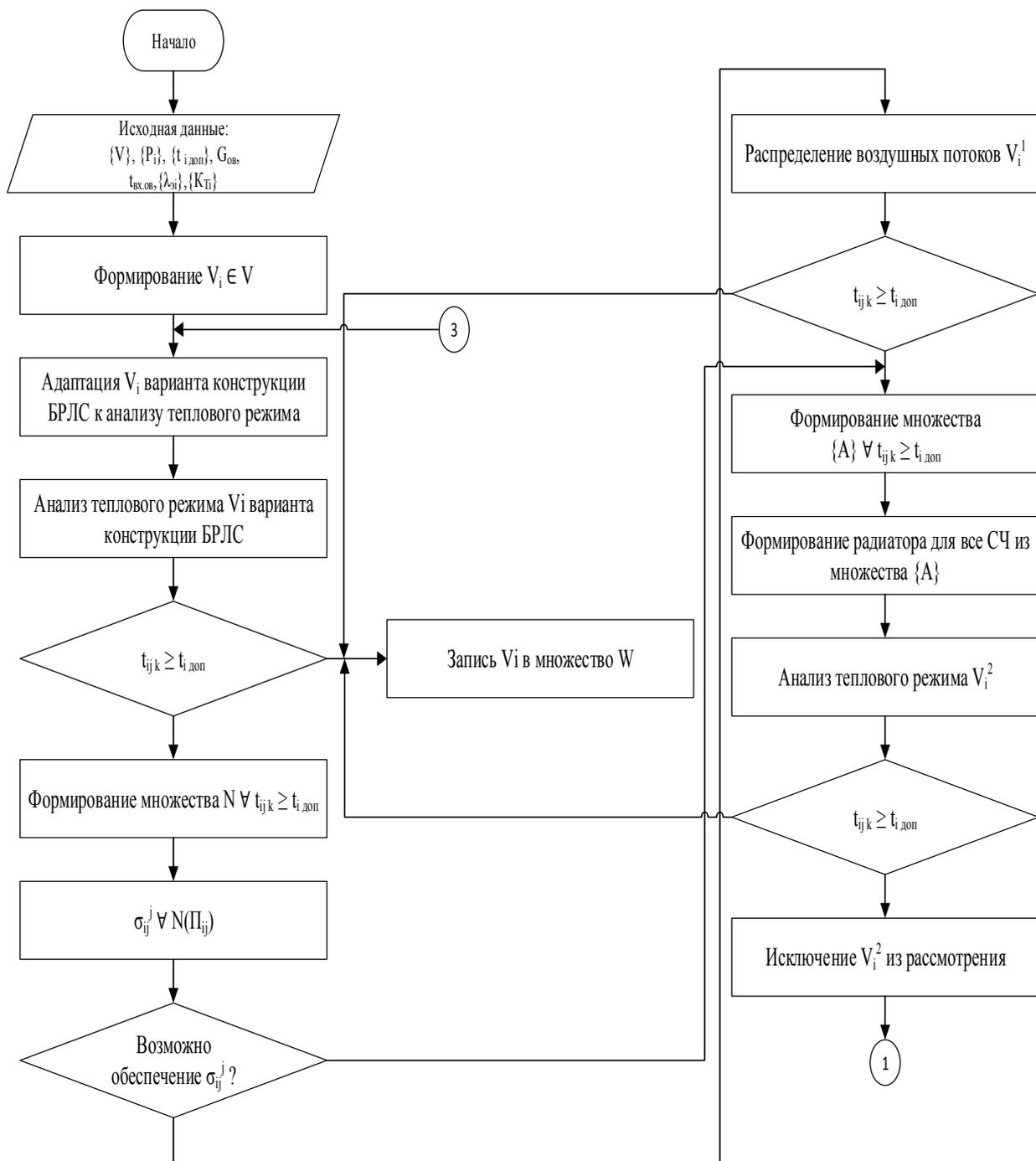
Обобщенная методика, на основе которой разработан алгоритм, реализует метод отсечений и представляет собой следующую последовательность действий.

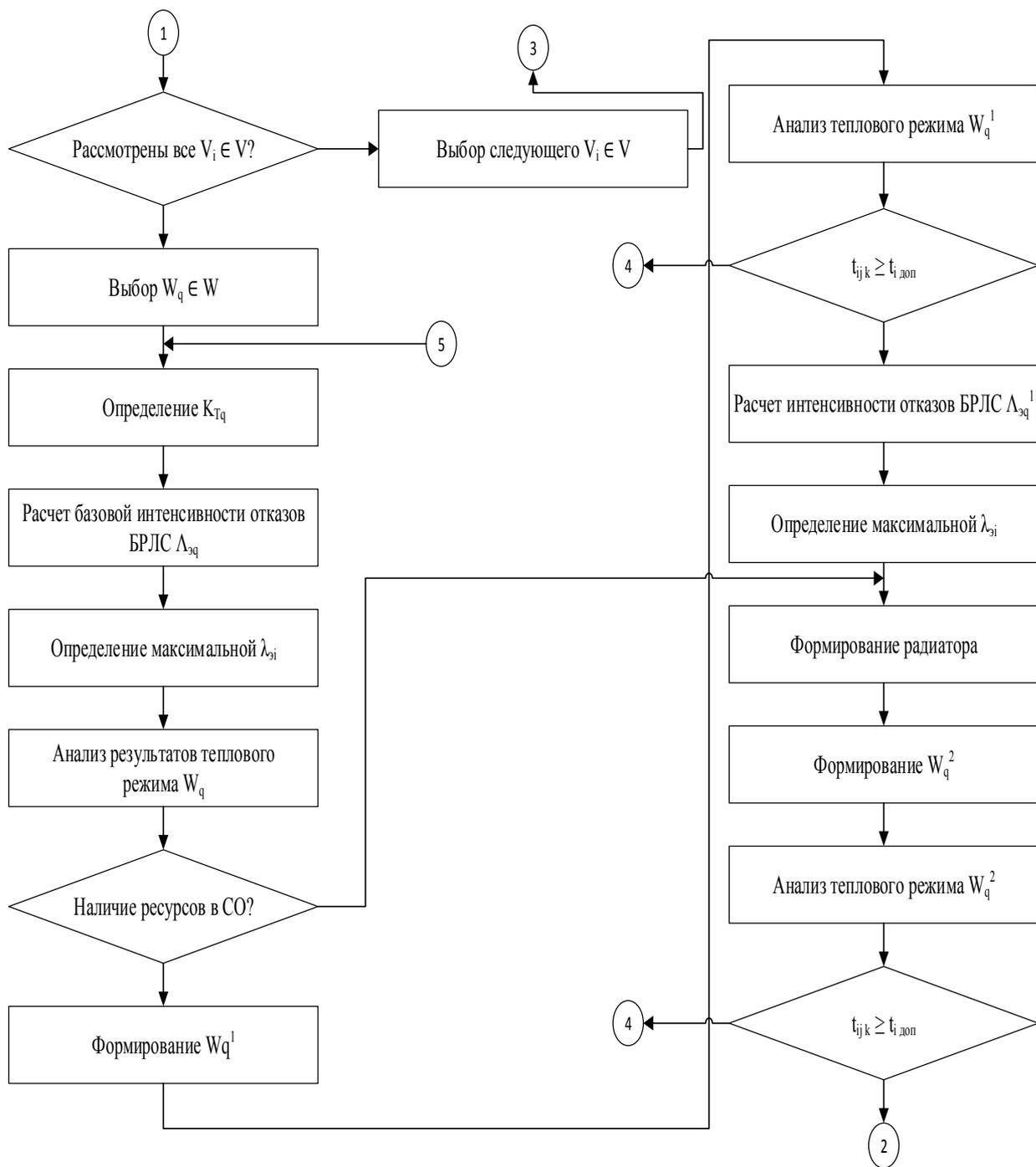
Исходное множество вариантов конструкции БРЛС V путем анализа теплового режима конструкции и ее доработки с целью обеспечения

нормального теплового режима преобразуется в множество допустимых вариантов W . Каждый вариант конструкции БРЛС, принадлежащий множеству, обеспечивает нормальный тепловой режим. Таким образом, сокращается размерность решаемой задачи.

Исходя из множества допустимых вариантов W определяется оптимальный вариант конструкции. Оптимальный вариант определяется симплекс-методом, позволяющим распределить ресурсы СО для получения максимальной надежности.

Методика конструирования теплонагруженных БРЛС представлена на рисунке 37.





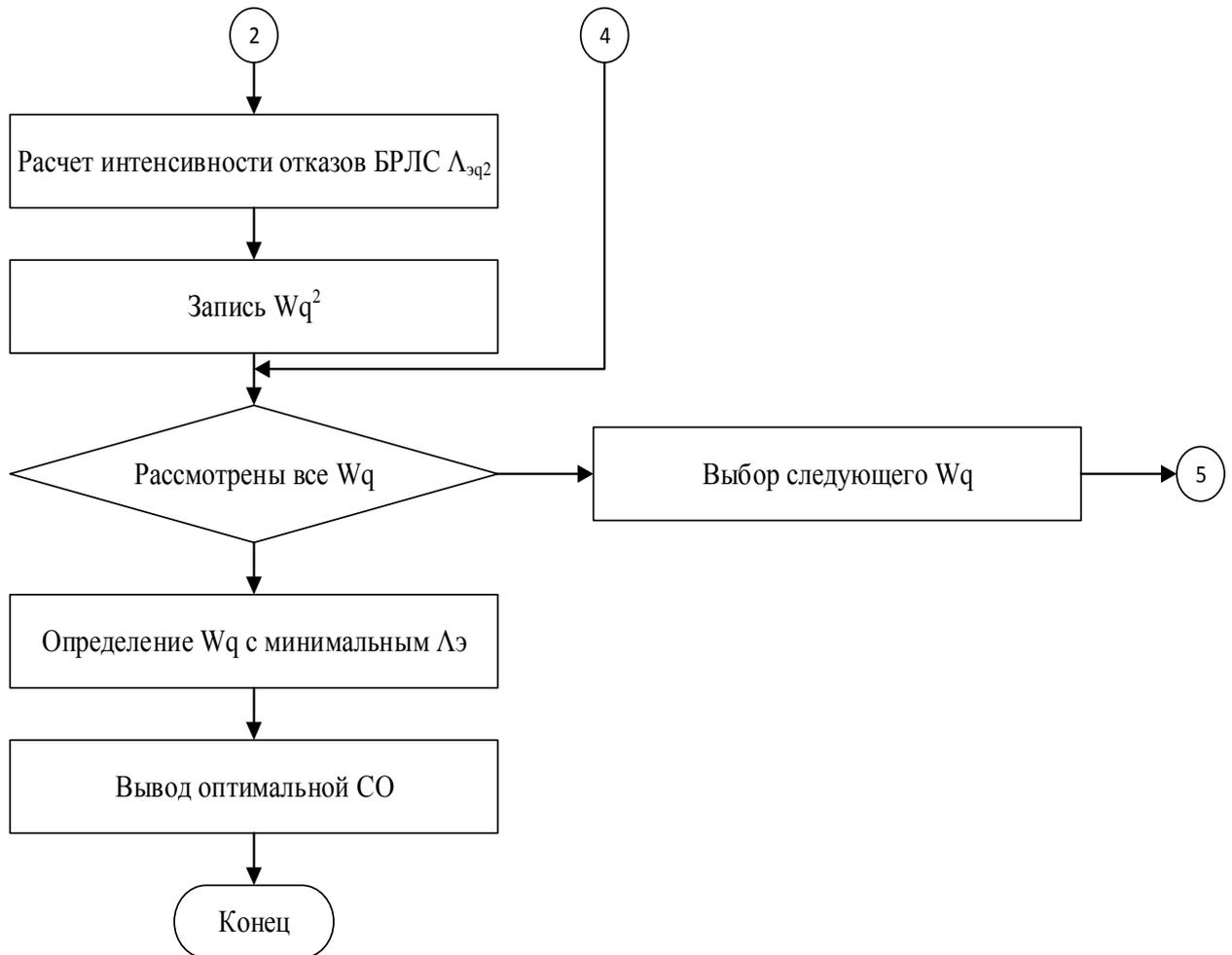


Рисунок 37 – Методика конструирования теплонагруженных БРЛС

Рассмотрим предложенный алгоритм поэтапно.

Этап 1 – задаются следующие исходные данные:

- множество вариантов конструкции $\{V\}$;
- множество тепловых мощностей СЧ БРЛС $\{P_i\}$;
- множество допустимых температур корпусов СЧ БРЛС $\{t_{i \text{ доп}}\}$;
- множество эксплуатационных интенсивностей отказов СЧ БРЛС $\{\lambda_{эi}\}$;
- множество значений температурных коэффициентов $\{K_{Ti}\}$;
- фиксированный расход ОВ ($G_{\text{ОВ}}$);
- входная температура ОВ ($t_{\text{вх.ОВ}}$).

Этап 2 – формирование $V_i \in V$.

Этап 3 – адаптация конструкции к анализу теплового режима варианта V_i . Адаптированная модель разрабатывается в соответствии с алгоритмом, изложенным в разделе 2.1.

Этап 4 – анализ теплового режима V_i . Формирование тепловой макромодели V_i в виде системы изотермических поверхностей Π_{ij} . Эта задача решается в соответствии с методикой, изложенной в разделе 2.2.

Этап 5 – анализ выполнения температурных ограничений для каждой поверхности системы Π_{ij} . Если ограничение $t_{ij\kappa} \leq t_{i\text{доп}}$ выполняется для всех СЧ БРЛС, то вариант конструкции V_i записывается в множество допустимых вариантов W . Далее осуществляется переход к этапу 2. Если ограничение не выполняется, осуществляется переход к этапу 6.

Этап 6 – формирование тепловой макромодели конструкции σ_{ij} . Решение задачи формирования тепловой макромодели рассмотрено в разделе 2.2. По тепловой модели и данным расчета теплового режима определяется подмножество N поверхностей (Π_{ij}) элементов, не удовлетворяющих требованию этапа 5.

Этап 7 – определение теплового потока, который необходимо дополнительно отвести от σ_{ij} для всех N поверхностей, не удовлетворяющих условию этапа 5.

Проверяется возможность отвода дополнительного теплового потока путем перераспределения охлаждающего воздуха. При возможном обеспечении σ_{ij}^j выполняется переход к следующему этапу, иначе к этапу 9.

Этап 8 – решение задачи перераспределения воздушных потоков. Проверяется выполнение ограничения (этап 5). Если ограничение выполняется, формируется модифицированный вариант V_i^1 (запись в множество допустимых решений W), иначе переход к следующему этапу.

Этап 9 – для всех СЧ, для которых не выполняется проверка ограничения (этап 5), определяются каналы (множество $\{A\}$), которые являются исходными данными для макромодели радиатора, рассмотренной в разделе 2.3.

Этап 10 – синтезирование оптимальной макромодели радиатора для всех каналов, выделенных на этапе 9.

Этап 11 – анализ теплового режима конструкции V_i^2 . Проверка ограничения (этап 5). В случае выполнения ограничения вариант конструкции V_i^2 включается в состав подмножества W , иначе переход к следующему этапу.

Этап 12 – исключение V_i варианта конструкции из дальнейшего рассмотрения. Проверка на рассмотрение всех вариантов конструкции V . Если все варианты конструкции рассмотрены, значит сформулировано допустимое множество решений, и выполняется переход к следующему этапу, иначе переход к этапу 3.

Этап 13 – выбор варианта W_q из W , а также определение значения K_{Tq} и значений эксплуатационной интенсивности отказов БРЛС $\Lambda_{эq}$. Это значение является базовым.

Этап 14 – анализ коэффициентов влияния интенсивности отказов СЧ $\lambda_{эi}$ на значение интенсивности отказов БРЛС $\Lambda_{эq}$. Формируется группа СЧ, существенно влияющих на $\Lambda_{эq}$.

Этап 15 – анализ теплового режима варианта W_q с целью определения возможностей ресурсов перераспределения воздушных потоков. В случае наличия ресурсов выполняется переход к следующему этапу, иначе к этапу 17.

Этап 16 – перераспределение воздушных потоков в пользу СЧ, существенно влияющих на $\Lambda_{эq}^1$. Проверка условия этапа 5; если условие выполняется, осуществляется переход к следующему этапу, иначе к этапу 13.

Этап 17 – в соответствии с этапами 9, 10 синтезируется оптимальный радиатор для СЧ, существенно влияющих на $\Lambda_{эq}^1$.

Этап 18 – рассчитывается значение $\Lambda_{эq}^2$, которое является окончательным для варианта W_q .

Этап 19 – проверка условия перебора всех вариантов из множества W . Если перебраны все варианты, выполняется переход к следующему этапу, иначе к этапу 13.

Этап 20 – из полученных значений эксплуатационной интенсивности отказов БРЛС выбирается вариант с минимальным значением – оно и будет оптимальным.

Основой алгоритма является методика теплового макро моделирования сложных конструктивных сборок БРЛС. Применение указанной методики позволяет оценить ресурсы СО и перераспределить их таким образом, чтобы обеспечить максимальное ВБР. Соответственно в алгоритме используются результаты, полученные в главе 2, а именно тепловая макро модель штыревого радиатора и методика распределения воздушных потоков.

Таким образом, в разделе рассмотрен алгоритм синтеза системы охлаждения, позволяющий оптимизировать температурное поле конструкции БРЛС, благодаря чему обеспечить максимальную надежность системы.

Выводы к главе:

- показано, что максимальная надежность конструкции БРЛС может быть достигнута путем оптимизации ее температурного поля;
- разработана методика конструирования теплонагруженных БРЛС, позволяющая обеспечить максимальную надежность конструкции БРЛС путем оптимизации ее температурного поля.

Глава 4 Экспериментальные исследования методики конструирования теплонагруженных БРЛС малоразмерных ЛА

4.1 Исследования теплового режима БРЛС

В главе 3 был разработан алгоритм синтеза системы охлаждения БРЛС, позволяющий оптимизировать температурное поле конструкции БРЛС при ограничениях на расход охлаждающего воздуха.

Проверим адекватность алгоритма на примере БРЛС Ku-диапазона в рамках проекта НЦ СРМ МАИ «Разработка и организация высокотехнологичного производства малогабаритной многорежимной бортовой радиолокационной системы Ku-диапазона волн для оснащения перспективных беспилотных и вертолетных систем». Конструкция указанной станции была рассмотрена в главе 1 раздела 1.2.

Исходными данными являются: 3D модель конструкции БРЛС, тепловая мощность СЧ БРЛС (тепловая мощность СЧ: $P_{\text{БЦВМ}}=60$ Вт; $P_{\text{ГК}}=10$ Вт; $P_{\text{УМ СВЧ}}=200$ Вт; $P_{\text{ПЗМ}}=75$ Вт), допустимые температуры поверхностей СЧ БРЛС ($t_{\text{БЦВМ}}=70$ °С; $t_{\text{ГК}}=70$ °С; $t_{\text{УМ СВЧ}}=75$ °С; $t_{\text{ПЗМ}}=75$ °С), значения интенсивности отказов всех СЧ БРЛС ($\lambda_{\text{БЦВМ}}=0,000125$ 1/час; $\lambda_{\text{ГК}}=0,00002$ 1/час; $\lambda_{\text{УМ СВЧ}}=0,000813$ 1/час; $\lambda_{\text{ПЗМ}}=0,00025$ 1/час), значения температурных коэффициентов СЧ БРЛС, расход ОВ ($G=250$ кг/ч), температура ОВ ($t_{\text{ВХ ОВ}}=55$ °С).

Проведем адаптацию конструкции БРЛС к анализу теплового режима, предложенную автором в разделе 2.1.

Сначала выполним анализ теплового режима базового варианта конструкции БРЛС и эксплуатационную интенсивность отказов БРЛС.

Для этого используем результаты расчетов теплового режима (главы 1, раздел 1.2), а также данные таблицы 6 (раздел 1.2) и результаты исследования (раздел 1.1), отметив, что эксплуатационная интенсивность отказов повышается на 30% при повышении температуры окружающей среды на 10 °С. Рассчитаем значения эксплуатационной интенсивности отказов каждой СЧ БРЛС. Данные расчета представлены в таблице 11.

Таблица 11 Результаты анализа базисного варианта БРЛС

Наименование СЧ	Λ_i , 1/час	$T_{к}$, °С
УМ СВЧ	0,002995	101
ПЗМ	0,000463	83
БЦВМ	0,000175	73
ГК	0,00003	69

Вычислим общую эксплуатационную интенсивность отказов БРЛС с помощью данных таблицы 11. Используя формулу 29 определим, значение эксплуатационной интенсивности отказов: 0,003663 1/час. Выберем это значение в качестве базового.

Для базового варианта используем методику распределения воздушных потоков, предложенную автором в разделе 2.4. В результате были рассчитаны значения требуемых перепадов давлений в каналах отвода тепла. Для перераспределения потоков ОВ автором было предложено «перекрыть» часть выходной перфорации, что позволит перераспределить воздушные потоки в направлении СЧ, требующих дополнительного съема тепла. Результаты теплового расчета сведены в таблицу 12.

Таблица 12 Результаты расчета с распределенными потоками ОВ

Наименование СЧ	Λ_i , 1/час	$T_{к}$, °С
УМ СВЧ	0,00257	98
ПЗМ	0,00035	70
БЦВМ	0,000132	66
ГК	0,000026	63

Из анализа данных таблицы следует, что температуры всех корпусов СЧ БРЛС не превышают допустимых значений, а суммарная эксплуатационная интенсивность отказов составляет 0,003078 1/час.

Из анализа таблицы 12 делаем вывод, что наибольший вклад в итоговую вероятность безотказной работы вносит УМ СВЧ. Для исследования воспользуемся стандартным радиатором [64]. Модель такого радиатора представлена на рисунке 38.

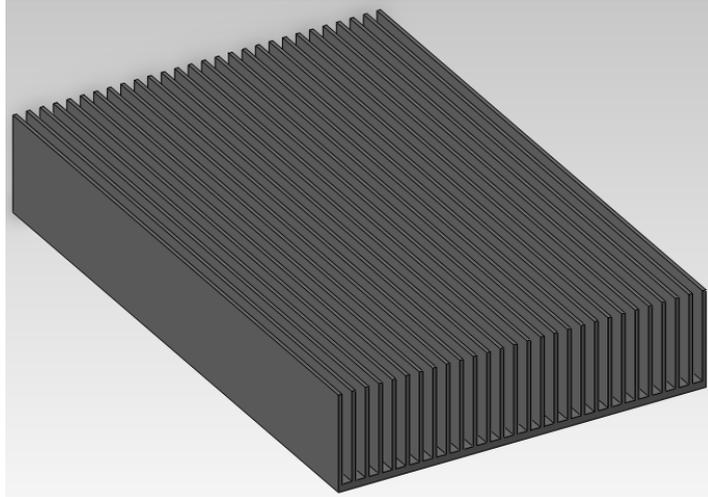


Рисунок 38 – Модель стандартного радиатора

В таблице 13 представлены данные второго варианта конструкции.

Таблица 13 Данные расчета

Наименование СЧ	Λ_i , 1/час	T_k , °C
УМ СВЧ	0,002234	90
ПЗМ	0,00035	70
БЦВМ	0,000132	66
ГК	0,000026	63

Отметим, что применение стандартного радиатора позволило снизить температуру СЧ БРЛС с максимальной эксплуатационной интенсивностью отказов; суммарное значение показателя составляет 0,002742 1/час. Вместе с тем, как видно из данных таблицы 13, температура корпуса по-прежнему не удовлетворяет требованиям к допустимой температуре; кроме того, УМ СВЧ имеет наибольшую эксплуатационную интенсивность отказов из всех СЧ БРЛС. Таким образом, стандартный радиатор не обеспечивает необходимого значения эксплуатационной интенсивности отказов.

Автором была разработана тепловая макромодель штыревого радиатора (раздел 2.3). Используя предложенную конструкцию радиатора, сконфигурируем его с использованием тепловой макромодели и проведем

повторный тепловой расчет. Разработанная модель радиатора представлена на рисунке 39.

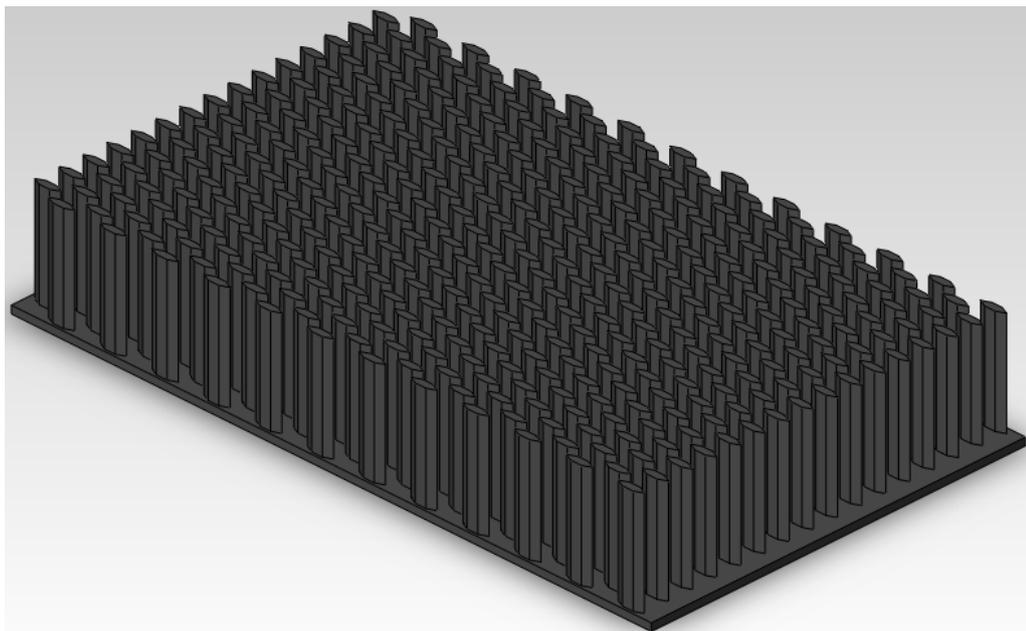


Рисунок 39 – Модель разработанного радиатора

Результаты расчета представлены в таблице 13.

Таблица 13 Данные расчета

Наименование СЧ	λ_i , 1/час	T_k , °С
УМ СВЧ	0,001469	74
ПЗМ	0,00035	70
БЦВМ	0,000132	66
ГК	0,000026	63

Из таблицы 13 видно, что температура корпуса УМ СВЧ меньше допустимого значения, а суммарное значение эксплуатационной интенсивности отказов составляет 0,001977 1/час.

Таким образом, использование разработанных автором методик и тепловых макромоделей позволило более чем в два раза снизить эксплуатационную интенсивность отказов БРЛС с 0,003663 до 0,00197 (или соответственно увеличить время безотказной работы с 273 до 506 часов) при обеспечении нормального теплового режима.

4.2 Исследования теплового режима СВО АФАР

4.2.1 Разработка плиты СВО для модулей источников питания АФАР

Рассмотрим использование полученных методик на примере СВО АФАР. На рисунке 40 представлен модуль источника питания (МИП), имеющий тепловую мощность 80 Вт. Отметим также, что в АФАР содержится 14 единиц МИП, а общая тепловая мощность составляет 1120 Вт.

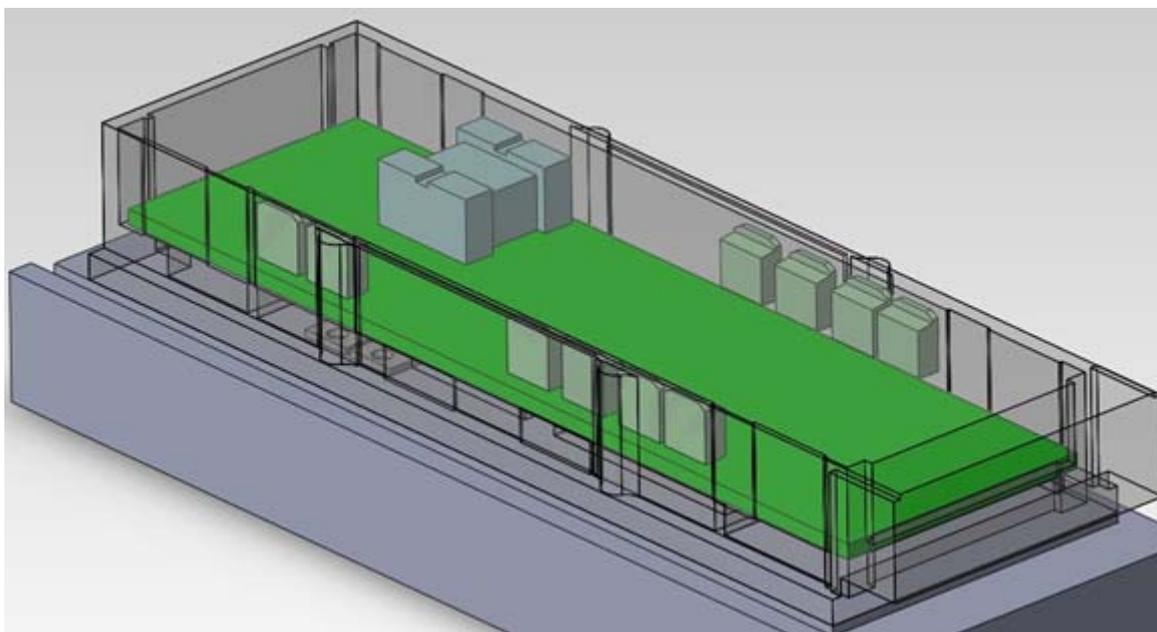


Рисунок 40 - Исходная модель МИП

На боковых стенках МИП расположены мощные транзисторы (10 шт.) общей тепловой мощностью 70 Вт; дополнительные 10 Вт тепловой энергии выделяют остальные элементы. Следует отметить, что при расчете базового варианта конструкции (без радиатора) температура корпуса превысила +140 °С.

По оценочным расчетам эксплуатационная интенсивность отказов для МИП при нормальном тепловом режиме составляет 0,001176 1/час. С учетом

температуры корпуса МИП базового варианта, эксплуатационная интенсивность составит 0,003359 1/час.

На первом этапе необходимо было оценить требуемое количество охлаждающего воздуха для охлаждения одного модуля. По формуле 23 (раздел 2.4) было установлено, что требуемый расход воздуха составляет 45 кг/ч при температуре ОВ 55 °С. При этом допустимая температура установленных транзисторов составляет +125 °С. Вместе с тем при рассчитанном значении теплового сопротивления (3,5 °С/Вт) между чипом (кристаллом) и корпусом транзистора, температура корпуса МИП не должна превышать +100 °С.

На втором этапе, используя результаты диссертационной работы, полученные в разделе 2.3, автором была предложена конструкция штыревого радиатора. На рисунке 41 представлена 3D модель радиатора и МИП.

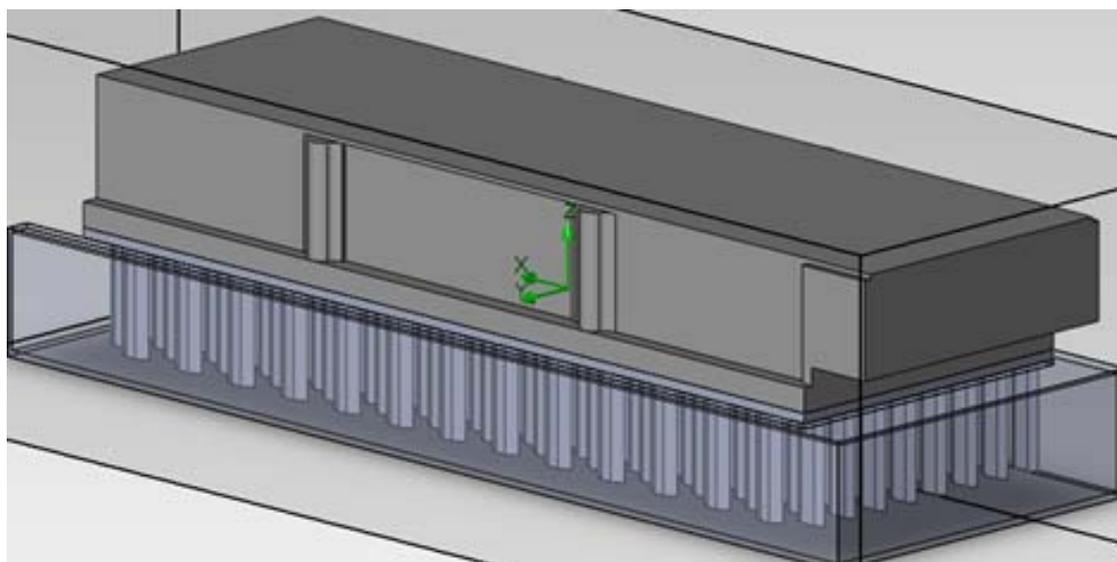


Рисунок 41 – Конструкция радиатора вместе с МИП

Результаты теплового моделирования с рассчитанным расходом воздуха представлены на рисунке 42.

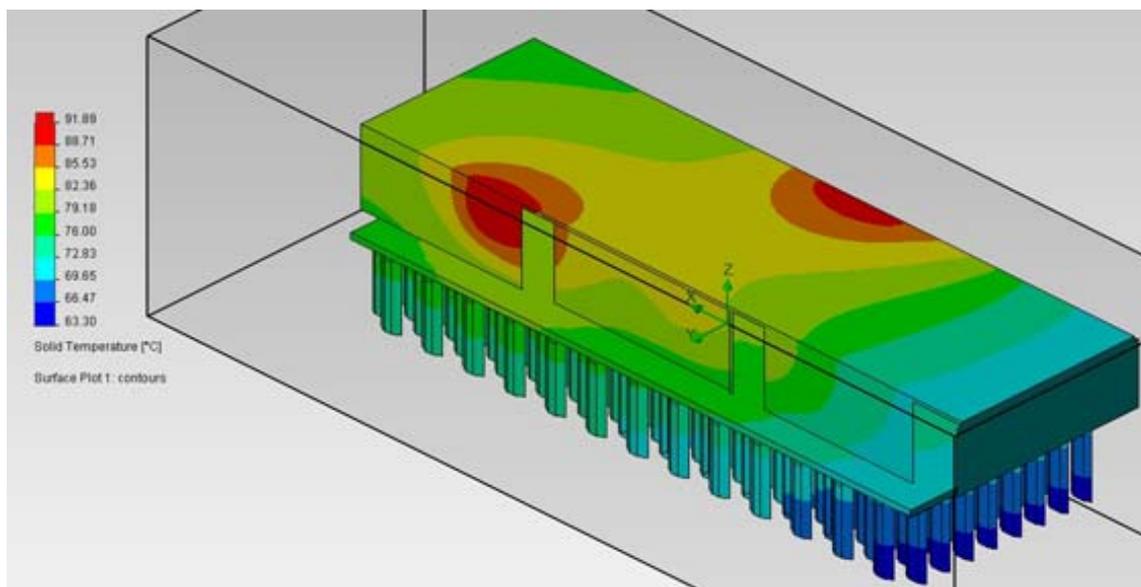


Рисунок 42 – Результаты теплового моделирования МИП

Результаты теплового моделирования МИП с разработанным радиатором показали, что температура на корпусе МИП с предложенной автором конфигурацией радиатора не превысит 91,89 °С, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к допустимой температуре корпуса. При этом эксплуатационная интенсивность отказов МИП составит 0,00107 1/час, следовательно, удалось снизить эксплуатационную интенсивность отказов на 32 %.

На третьем этапе необходимо было рассчитать общий расход воздуха, требуемый для охлаждения 14 МИП. Общее количество воздуха составляет 630 кг/ч. Для обеспечения указанного расхода воздуха необходимо выбрать вентилятор. Для этого по каталогу продукции фирмы «Июлла» [65] был выбран вентилятор: 0,8ЭВ-2,8-120-3661. Учитывая, что один вентилятор указанного типа обеспечивает расход 280 кг/ч, минимальное количество вентиляторов составляет 3 шт.

Учитывая, что МИП устанавливаются на плиту СВО, автором предложен вариант такого размещения МИП на плиту. Модель плиты СВО представлена на рисунке 44.

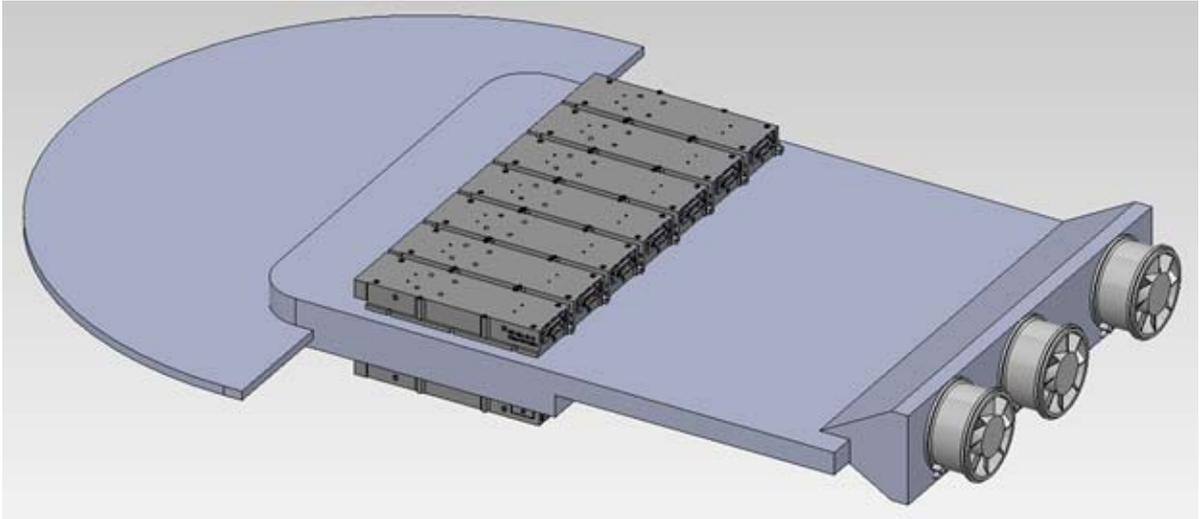


Рисунок 43 – Конструкция платы СВО

Как видно из рисунка 43, плата содержит три вентилятора и 14 МИП. Задача формулируется следующим образом: необходимо определить конфигурацию каналов для обеспечения требуемого расхода ОВ на каждый МИП.

На четвертом этапе решается выше сформулированная задача. Указанная задача относится к классу аэродинамических задач. При этом важным элементом аэродинамической системы является радиатор, который находится в воздушном канале и создает аэродинамическое сопротивление. На рисунке 44 представлена конфигурация каналов платы СВО, а на рисунке 45 представлена обратная сторона платы СВО. Расходы в каждом канале определялись по методу прозрачных мембран [43].

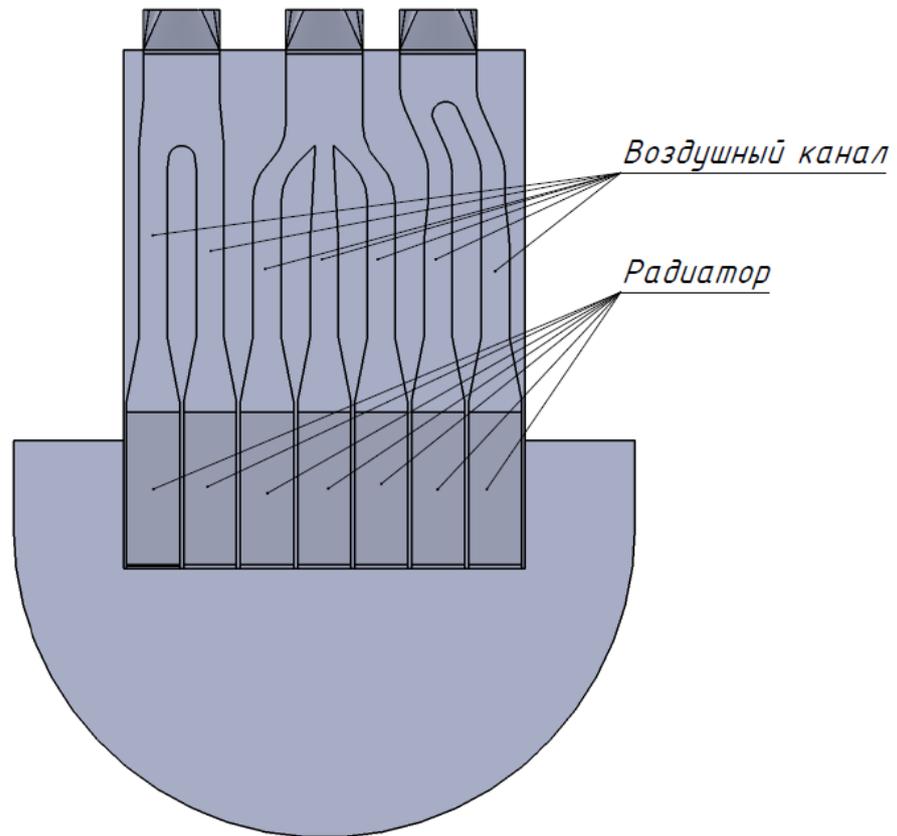


Рисунок 44 – Конфигурация каналов плиты СВО

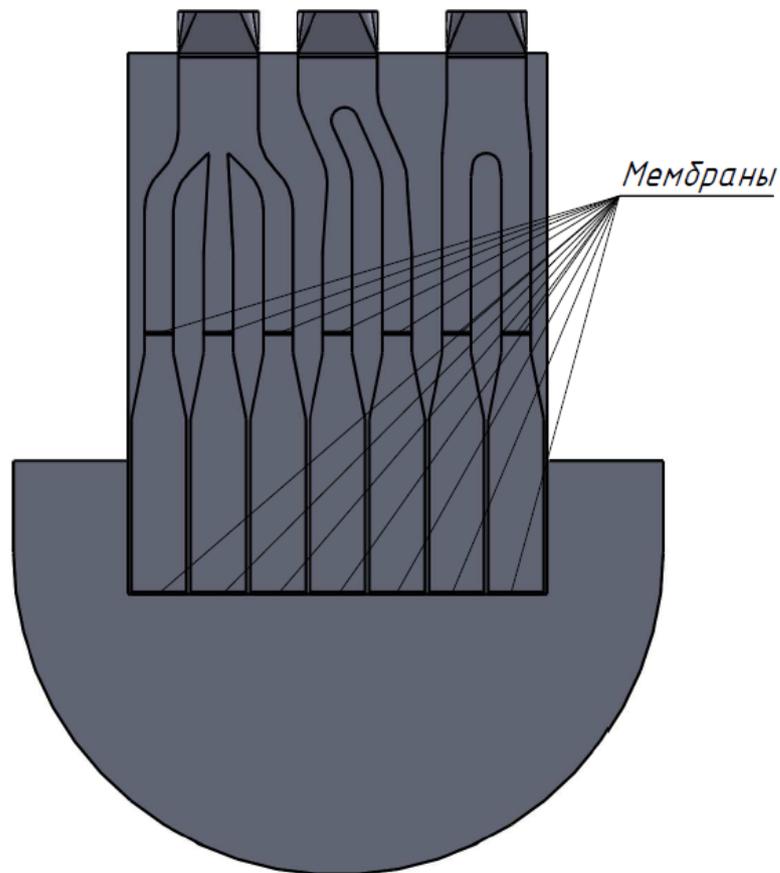


Рисунок 45 – Конфигурация обратной стороны плиты СВО

Мембраны необходимы для измерения расхода ОВ в каждом канале.

В результате моделирования были определены следующие характеристики каналов: скорость в каждом канале, расход ОВ в каждом канале. На рисунке 46 представлено распределение скорости ОВ в каждом канале.

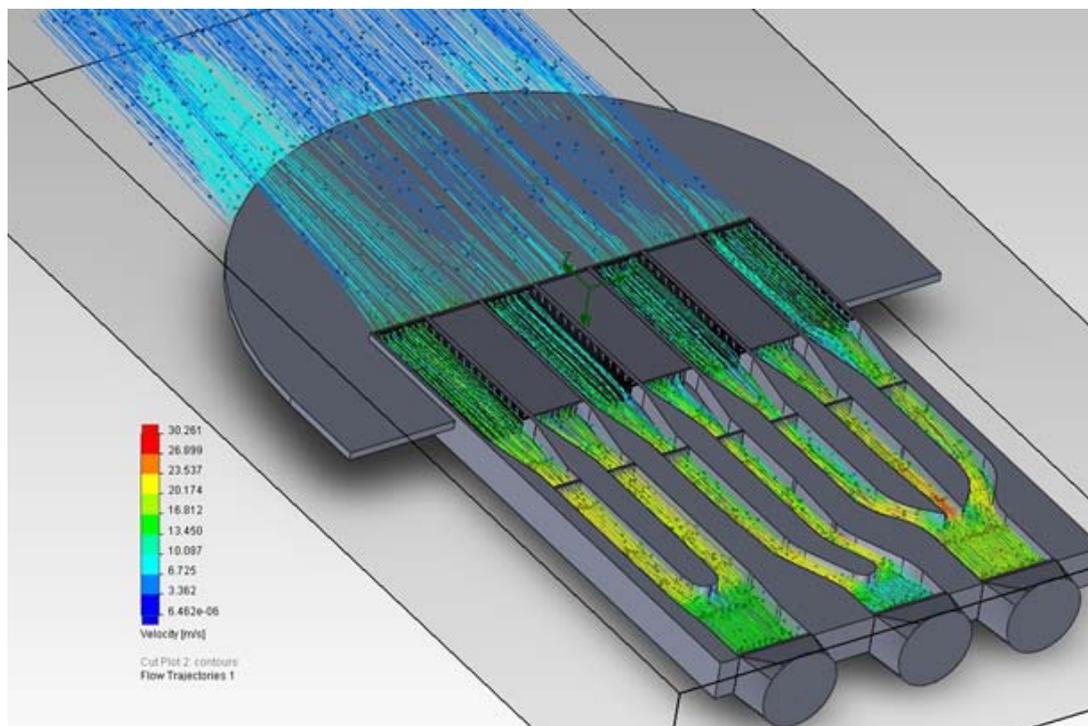


Рисунок 46 – Результаты аэродинамического анализа каналов плиты СВО

В таблице 15 представлены численные значения расходов и скорости ОВ в каждом канале.

Таблица 15 Численные значения расходов и скоростей ОВ

Номер канала	Расход ОВ, кг/ч	Скорость ОВ, м/с
1	47,55	16,4
2	47,38	16,5
3	45,2	13,78
4	46,02	14,1
5	45	14,37
6	45,6	13,55
7	46,6	12,52
8	47,21	15,95
9	47,68	16,1
10	45,27	14,2
11	46,13	14,27
12	45	14,16

Продолжение таблицы 15

13	45,33	13,93
14	45,52	16,2

Таким образом, в ходе решения задачи разработки плиты СВО для модулей источника питания АФАР были выполнены следующие работы: предварительный анализ теплового режима МИП (при этом установлено, что температура корпуса составляет $+140^{\circ}\text{C}$) и рассчитано базовое значение эксплуатационной интенсивности отказов $0,003359$ 1/час; рассчитано значение расхода ОВ для каждого МИП (45 кг/ч), которое позволит обеспечить нормальный тепловой режим; разработан радиатор для МИП, при использовании которого температура корпуса МИП по результатам теплового анализа не превышает 92°C , и рассчитано значение эксплуатационной интенсивности отказов $0,00107$ 1/час.; выбран тип вентилятора ($0,8ЭВ-2,8-120-3661$) и определено количество вентиляторов (3 шт.) общим расходом ОВ 860 кг/ч, позволяющее обеспечить требуемый расход ОВ для 14 МИП АФАР; разработана конфигурация каналов плиты СВО. Из полученных данных следует, что эксплуатационная интенсивность отказов МИП снизилась на 32% . Данные, представленные в таблице 15, показывают, что при разработанной конфигурации каналов плиты СВО требование по расходу ОВ будет выполняться, а следовательно, будет обеспечен нормальный тепловой режим.

Выводы к главе:

- показана эффективность разработанных методов и алгоритмов на примере конструкций БРЛС: БРЛС Ку-диапазона и «Арбалет АФАР»;
- применение методов и алгоритмов к конструкции БРЛС позволило повысить надежность станции на 53% ;

– применение методов и алгоритмов конструкции «Арбалет АФАР» позволило повысить надежность станции на 32%.

Заключение

В результате проведенных исследований в диссертации получены следующие основные научные результаты.

1. Установлено, что все основные параметры БРЛС являются температурозависимыми. На примере УМ СВЧ БРЛС показано, что при повышении температуры на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ его интенсивность отказов увеличивается примерно на 30 %.

2. Установлено, что около 88 % тепловой энергии передается в окружающую среду за счет принудительной конвекции, эффективность которой определяется теплоотдачей продуваемых плоских и оребренных каналов конструкции БРЛС.

3. Установлено, что теплоотдача тепловой энергии охлаждающему воздуху систем ПВО современных БРЛС МЛА не превышает 32 % его максимальной тепло емкости. Поэтому повышение эффективности систем ПВО БРЛС МЛА может быть достигнуто путем оптимизации параметров радиаторов с целью достижения максимального значения коэффициента теплоотдачи и выбором параметров продуваемых каналов, обеспечивающих оптимальное распределение охлаждающего воздуха.

4. Алгоритм адаптации БРЛС к анализу теплового режима, который в отличие от известных позволяет учесть влияние кабельной сети, волноводов и несущих конструкций на эффективность теплообмена и позволяет при анализе теплового режима конструкций БРЛС МЛА сократить время анализа примерно в 4,5 раза при погрешности результата анализа около 3,5 %.

5. Методика формирования макромодели конструкции БРЛС, позволяющая выбирать рациональное соотношение между временем и точностью анализа теплового режима конструкции БРЛС и отличающаяся от

известных возможностью интегральной оценки значений температурного поля конструкции БРЛС.

6. Тепловая макромодель штыревого радиатора, отличающаяся от известных системным подходом к выбору всех значимых параметров, влияющих на его теплоотдачу.

7. Методика распределения воздушных потоков, позволяющая обеспечить нормальный тепловой режим путем перераспределения охлаждающего воздуха в конструкции БРЛС и отличающаяся от известных комплексной оценкой особенностей конструкции БРЛС.

8. Методика конструирования теплонагруженных БРЛС, позволяющая обеспечить максимальную надежность конструкции БРЛС путем оптимизации ее температурного поля и отличающаяся от известных системным подходом к решению задачи повышения надежности БРЛС за счет использования ресурсов конструкции БРЛС.

9. Применение разработанных методик, алгоритмов и тепловых макромоделей позволяет повысить надежность конструкции: БРЛС на 53 %; «Арбалет АФАР» на 32 %.

10. Результаты диссертационной работы внедрены на предприятиях АО «Корпорация «Фазотрон-НИИР» и НЦ СРМ МАИ, что подтверждено актами использования результатов работы.

11. Результаты диссертационной работы отражены в 10 научных работах, в том числе в 3 статьях в периодических печатных изданиях, входящих в перечень ВАК, одной заявке на полезную модель, тезисах 6 докладов на научно-технических конференциях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Беспилотные летательные аппараты БПЛА (дрон). URL:[http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Беспилотный_летательный_аппарат_\(дрон,_БПЛА\)#2016-2017](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Беспилотный_летательный_аппарат_(дрон,_БПЛА)#2016-2017) (Дата обращения: 02.02.2018). [Online]
2. Анализ авиационного рынка URL:http://www.helirussia.ru/ru/dlya_smi/press_relizyi/2015/11/24/ekspozicziya_bpla_na_helirussia_2016_rasshiritsya/ (Дата обращения: 16.02.2018).
3. Классификация UVS International URL:<http://arsenal-info.ru/b/book/3398882726/14> (Дата обращения: 09.02.2018).
4. Канщенков А.И. Интеллект для беспилотника // Авиапанормама №4, 2012г..
5. Нечаев Е.Е., Дерябин К.С. Современные бортовые радиолокационные станции и антенные решетки многофункциональных авиационных комплексов военного назначения // "Научный вестник МГТУ ГА", №221, 2015 г., стр.90-105.
6. Продукция Корпорация Фазотрон-НИИР URL:<http://www.phazotron.com/produksiya-i-uslugi/> (Дата обращения: 25.02.17).
7. Description EL/M-2055 URL:http://www.deagel.com/Sensor-Systems/ELM-2055_a002570001.aspx (Дата обращения: 17.02.2018).
8. Description Thales I-Master URL:<https://www.thalesgroup.com/sites/default/files/asset/document/I-Master%20Datasheet.pdf> (Дата обращения 21.02.2018).
9. Бортовые РЛС наземных движущихся целей EL/M-2055 URL:<http://radiocom-review.blogspot.ru/2012/10/iai-elm-2055.html> (Дата обращения (22.02.2018).
10. Отечественные бортовые РЛС URL:<http://kaf401.rloc.ru/files/BRLSChars.pdf> (Дата обращения: 25.02.2017).

11. Справочник по радиолокации/Под ред. М.И. Скольникова. Пер. с англ. под общей ред. В.С. Вербы. В2 книгах. Книга 1 М.: Техносфера, 2014.- 672 с.
12. Чеканов А.Н. Расчет и обеспечение надежности электронной аппаратуры: учебное пособие/ А.Н. Чеканов. -М.: КНОРУС, 2014.-438 с.
13. Над ежность электрорадиоизделий. Справочник. -М.: МО РФ, 2006.- 641 с.
14. Сухарев М.И. Расчет надежности изделия БРЛС (АБВР.461334.004). 2018г..
15. Автоматическая система расчета надежности URL: <http://www.elstandart.spb.ru/ru/> (Дата обращения: 03.02.2018).
16. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны/ Под ред. Д.И. Воскресенского. Изд. 2-е, доп. и перераб.-М.: Радиотехника, 2006.-376 с.:ил.
17. Говард Джонсан, Мартин Грэхем. Конструирование высокоскоростных цифровых устройств: начальный курс черной магии: Пер. с англ. Москва : Издательский дом "Вильямс", 2006. - стр.525-526.
18. Литвинов В.П., Богуславский С.В. Особенности теплового расчета и конструкции термостатированных кварцевых генераторов // "Научный вестник МГТУ ГА" №171, 2011 г., стр.58-65.
19. Хоменко И.В. Кварцевые резонаторы и генераторы: учеб. пособие/ И.В. Хоменко, А.В. Косых; Минобрнауки России, ОмГТУ.-Омск: Изд-во ОмГТУ, 2018.-160с.:ил.
20. Саршинова Е.И., Черников Д.В. Дополнительные требования к ферритовым материалам при совершенствовании фазовращателей типа Реджиа-Спенсера// "Электричество" , №3, 2011 г., стр.57-61.
21. Гуськов Ю.Н. Основные направления разработки бортовых РЛС с АФАР трехсантиметрового диапазона// "Радиотехника", №9, 2009 г., стр.65-71..

22. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов. - М.: Радиотехника. 2004, 320 с.,ил.
23. Ушкар. Ушкар М.Н. Конструирование электронно-вычислительных средств: Учебное пособие к практическим занятиям. -М. : МАИ, 2007. - стр. 32-34.
24. Конструирование радиоэлектронных средств/ В.Ф.Борисов, О.П.Лавренов, А.С.Назаров, А.Н.Чекмарев/Под.ред. А.С.Назарова.-М.:Изд-во МАИ, 1996.-380с.,ил.
25. Альмовский А. А., Собачкин А. А., Одинцов Е. В., Харитонович А. И., Понамарев Н. Б. SolidWorks Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб.: БХВ- Петербург, 2005-800с.: ил.
26. Резников Г.В. Расчет и конструирование систем охлаждения ЭВМ/ Г.В.Резников. -М.:Радио и связь., 1988. - 222 с.:ил.
27. Овчинников В.А., Савельев А.Я. Конструирование ЭВМ и систем: Учебник для техн. вузов по спец. "Электрон. выч. маш.". -М. : Высш. шк., 1984. - 248 с.
28. Белоусов Е.Л., Ушкар М.Н. Конструирование блоков бортовой авиационной аппаратуры связи: Учебное пособие/Белоусов Е.Л., Ушкар М.Н./ Нижегородский государственный технический университет Нижний Новгород, 2005.-237 с.
29. Е.Л. Белоусов, М.Н. Ушкар. Конструирование блоков бортовой авиационной аппаратуры связи Учебное пособие. Нижний Новгород : НГТУ, 2005. -237 с.
30. Глушицкий. И.В. Охлаждение бортовой аппаратуры авиационной техники. Москва : Машиностроение, 1987.-184 с., ил.
31. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: Учебник для вузов по спец. "Конструир. произ. радио-аппаратуры". М. : Высш. шк., 1984.-247 с., ил.
32. Авдудевский В.С., Галицейский Б.М., Глебов Г.А. и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике: Учебное

пособие для авиационных специальностей ВУЗов/ Под общ. ред. В.С. Авдуевского, В.К. Кошкина. - 2-е изд., перераб. и доп. -М.: Машиностроение, 1992.-528 с., ил.

33. Корнеев В.М. Особенности конструирования и эксплуатации беспилотных летательных аппаратов самолетного типа - М.: "Издательские решения" 2018. - 42 с.

34. Коннов А.В., Владыкина И.С., Полянская Т.И., Жарихин С.В. Моделирование системы принудительного воздушного охлаждения коллектора многолучевого клистрона// "Электроника и микроэлектроника" Т.1 №1, 2015г., стр.234-238.

35. Сорокин А.Д. Расчет ребристого радиатора как элемента теплообменника с принудительной конвекцией URL:<http://www.electrosad.ru/Ohlajd/MetRR.htm> (Дата обращения: 14.05.2018).

36. Курщик В.Н., Шило Г.Н., Каспирович Н.А., Огренич Е.В. Оптимизация оребренного канала в системах принудительного воздушного охлаждения РЭА. Радіоелектроніка та інфокомунікації. 2014 г., 2, с. 34-37.

37. Л.И., Ройзен. Тепловой расчет оребренных поверхностей. Москва : Энергия, 1977. с. 256.

38. Маниленко, И.Н. Разработка методики проектирования ребристо-пластинчатых радиаторов радиоэлектронных устройств: дис. канд. техн. наук: 05.12.04/ Маниленко Иван Николаевич. - Владимир, 2012. -123 с.

39. Румянцев А.В. Методы конечных элементов в задачах теплопроводности: Учебное пособие/ Калинингр. ун-т. Калининград. 1995. - 170 с.

40. Егоров В.И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности. Учебное пособие.-СПб:СПб ГУ ИТМО,2006.- 77 с.

41. Михеев М.А., Михеева М.М. Основы теплообмена. Изд. 2-е, стереотип. М.: "Энергия", 1977. - 344 с.

42. Саратовский Н.В. Тепловые макромодели конструкций бортовых электронных средств для САПР инженерного анализа: дис. канд. тех. наук: 05.13.12/Саратовский Николай Владимирович.-Москва, 2013. -181 с.

43. Старенченко А.В. Методы прозрачных мембран в задачах анализа теплового режима бортовых РЛС/ "Научно-аналитический журнал Корпорации "Фазотрон-НИИР", №2, 2014г., стр. 84-85.

44. Дульнев Г.Н. Теплообмен в радиоэлектронных устройствах. М.-Л., Госэнергоиздат, 1963. 288 с.,ил.

45. Дульнев Г.Н., Тарновский Н.Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры. Учебное пособие для студентов высших технических заведений. -Л. : Энергия, 1971. - 248 с., ил.

46. Евстафьев В.В., Енгибарян И.А., Сахаров И.А. Основы конструирования и технологии производства РЭС. -М. : Издательский дом Академии Естествознания, 2016.-стр.77-78.

47. Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА. -М. : Советское радио, 1976. - 232 с.

48. Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. -Л. : Энергия, 1968.-360 с., ил.

49. Покорный Е.Г., Щербина А.Г. Расчет полупроводниковых охлаждающих устройств. Л.: «Наука», Ленинградское отд. 1969.- 206 с.

50. Л.З., Румшицкий. Математическая обработка результатов эксперимента. Москва : Наука, 1971. с. 56-69.

51. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. -М. : Физико-математической литературы, 1958. - стр.135-138.

52. Спирин Н.А., Лаврова В.В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента/ Н.А. Спирин, В.В. Лавров. Под. общ. ред. Н.А.Спирина. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004.-257 с.

53. Ферстер Э., Ренц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа/Перв. с немец. и предисловие В.М.Ивановой. -М. : Финансы и статистика, 1983. - 302 с.

54. Халафян А.А. Халафян А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных. 3-е изд. Учебник. -М. : ООО "Бином -Пресс", 2007.-512 с.: ил.

55. Боровиков В.П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA. -М: Горячая линия-Телеком, 2013.-288с.

56. М.А., Сахаров. Моделирование и оптимизация технологических процессов изготовления РЭС и БВС. -М. : МАИ, 1992. - стр.5-14.

57. Лужавин Ю.И., Хранилов В.П. Повышение эффективности проектирования систем воздушного охлаждения бортовой авиационной РЭА средствами интерактивного математического моделирования. Труды Нижегородского государственного технического университета им. Алексеева. 2013 г., 4, стр.140-149.

58. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям /Под ред. М.О.Штейнберга.-3-е изд., перераб. и доп. -М. : Машиностроение, 1992. - 672 с., ил..

59. Алексеев О.Г. Комплексное применение методов дискретной оптимизации. -М. : Наука Гл.ред. физ-мат. лит., 1987. - 248 с.

60. Землянухина Л.Н., Зинченко А.Б., Сантилова Л.И. Методические указания для студентов дневного и вечернего отделений механико-математического факультета по курсу "Методы оптимизации" «Линейное программирование и смежные вопросы». — Ростов-на-Дону, 1998. — стр. 24-33.

61. Г.П., Фомин. Математические методы и модели в коммерческой деятельности: учебник/Г.П. Фомин. -3-е изд., перераб. и доп.-. Москва : Финансы и статистика; ИФНФРАМ-М, 2009. - 640 с.

62. Таха, Хемди А. Введение в исследование операций, 7-е издание: Пер. с англ. -М. : Издательский дом "Вильямс", 2005.- 912 с., ил.

63. Юрьева А.А. Математическое программирование: учебное пособие. [Гриф УМО].-2-е изд. СПб : "Лань", 2014. - 432 с.
64. Ребристые радиаторы Chip dip URL:<https://www.chipdip.ru/catalog-show/ribbed-radiators> (Дата обращения: 05.12.18).
65. Каталог продукции Иолла URL:http://iolla.info/upload/katalog_iolla_2018.pdf (Дата обращения: 12.05.18).

Список иллюстраций

Рисунок 1 – Оценка динамики мирового и российского рынка БПЛА...	4
Рисунок 2 – Тенденции роста удельной плотности теплового потока.....	6
Рисунок 3 – Зависимость эксплуатационной интенсивности отказов твердотельного усилителя мощности СВЧ от температур.....	14
Рисунок 4 – Полотно АФАР.....	17
Рисунок 5 – Электрическая схема БРЛС с электромеханическим сканированием.....	20
Рисунок 6 – Электрическая схема БРЛС с ФАР.....	20
Рисунок 7 – БРЛС с электромеханическим сканированием.....	21
Рисунок 8 – БРЛС ФАР (МРЛЦН Корсар ФАР).....	22
Рисунок 9 – Диаграмма выбора системы охлаждения.....	23
Рисунок 10 – Общий вид БПЛА.....	24
Рисунок 11 – Температурное поле БРЛС БРЛС.....	25
Рисунок 12 – Перегрев в теплонагруженных блоках при циклическом режиме работы.....	26
Рисунок 13 – Тепловая схема теплообмена БРЛС с окружающей средой.	28
Рисунок 14 – Схема обдува типа «холодной стенки».....	30
Рисунок 15 – Схема обдува СЧ в замкнутом пространстве	30
Рисунок 16 – Обобщенная модель ПВО БРЛС МЛА.....	31
Рисунок 17 – Исходная 3D модель БРЛС.....	35
Рисунок 18 – Конструкция БРЛС для теплового расчета.....	36
Рисунок 19 – Зависимость расхода воздуха в канале от затенения.....	37
Рисунок 20 – Конструкция БЦВМ.....	39
Рисунок 21 – Упрощенная модель конструкции БЦВМ.....	40
Рисунок 22 – Алгоритм адаптации БРЛС к анализу теплового режима....	41
Рисунок 23 – Адаптированная конструкция БРЛС к анализу теплового режима.....	43

Рисунок 24 – Методика формирования макромоделей БРЛС.....	47
Рисунок 25 – Температурное поле УМ СВЧ.....	49
Рисунок 26 – Температурное поле основания УМ СВЧ.....	50
Рисунок 27 – Основание УМ СВЧ, состоящее из ИП.....	51
Рисунок 28 – Общий вид тепловой макромоделей БРЛС.....	52
Рисунок 29 – Алгоритм методики макроmodellирования радиатора.....	56
Рисунок 30 – Шестиугольный профиль ребра.....	58
Рисунок 31 – Зависимость коэффициента теплоотдачи от переднего угла раскрыва.....	59
Рисунок 32 – Зависимость значения коэффициента теплоотдачи от номера эксперимента.....	62
Рисунок 33 – Гистограмма распределения случайной величины α	63
Рисунок 34 – Методика распределения воздушных потоков БРЛС.....	66
Рисунок 35 – Общий вид гидравлической схемы БРЛС.....	68
Рисунок 36 – Канал между СЧ БРЛС.....	69
Рисунок 37 – Методика конструирования теплонагруженных БРЛС.....	81
Рисунок 38 – Модель стандартного радиатора.....	89
Рисунок 39 – Модель разработанного радиатора.....	90
Рисунок 40 – Исходная модель МИП.....	91
Рисунок 41 – Конструкция радиатора вместе с МИП.....	92
Рисунок 42 – Результаты теплового моделирования МИП.....	93
Рисунок 43 – Конструкция плиты СВО.....	94
Рисунок 44 – Конфигурация каналов плиты СВО.....	95
Рисунок 45 – Конфигурация обратной стороны плиты СВО.....	95
Рисунок 46 – Результаты аэродинамического анализа каналов плиты СВО.....	96

Приложение А

Тепловое поле основания УМ СВЧ

Таблица А.1

№ точки	Координата X	Координата Y	Температура, °С
1	0,090	0,278	103,80
2	0,090	0,289	103,80
3	0,090	0,300	103,51
4	0,090	0,312	102,85
5	0,090	0,323	101,84
6	0,090	0,335	100,33
7	0,090	0,346	98,27
8	0,090	0,266	103,52
9	0,090	0,255	102,91
10	0,090	0,243	102,01
11	0,090	0,232	100,72
12	0,090	0,220	99,02
13	0,090	0,209	96,86
14	0,090	0,198	94,23
15	0,101	0,278	101,20
16	0,101	0,289	101,21
17	0,101	0,300	100,94
18	0,101	0,312	100,35
19	0,101	0,323	99,45
20	0,101	0,335	98,23
21	0,101	0,346	96,75
22	0,101	0,266	100,89
23	0,101	0,255	100,29
24	0,101	0,243	99,38
25	0,101	0,232	98,13
26	0,101	0,220	96,53
27	0,101	0,209	94,60
28	0,101	0,198	92,30
29	0,113	0,278	98,98
30	0,113	0,289	99,00
31	0,113	0,300	98,74
32	0,113	0,312	98,21
33	0,113	0,323	97,43
34	0,113	0,335	96,44
35	0,113	0,346	95,37
36	0,113	0,266	98,66
37	0,113	0,255	98,04
38	0,113	0,243	97,13

Продолжение таблицы А.1

№ точки	Координата X	Координата Y	Температура, °С
39	0,113	0,232	95,92
40	0,113	0,220	94,44
41	0,113	0,209	92,70
42	0,113	0,198	90,52
43	0,124	0,278	97,16
44	0,124	0,289	97,16
45	0,124	0,300	96,89
46	0,124	0,312	96,40
47	0,124	0,323	95,73
48	0,124	0,335	94,91
49	0,124	0,266	96,82
50	0,124	0,255	96,17
51	0,124	0,243	95,24
52	0,124	0,232	94,09
53	0,124	0,220	92,73
54	0,124	0,209	91,19
55	0,136	0,278	95,78
56	0,136	0,289	95,73
57	0,136	0,300	95,38
58	0,136	0,312	94,87
59	0,136	0,323	94,26
60	0,136	0,335	93,56
61	0,136	0,266	95,41
62	0,136	0,255	94,65
63	0,136	0,243	93,67
64	0,136	0,232	92,56
65	0,136	0,220	91,32
66	0,136	0,209	89,85
67	0,147	0,278	94,96
68	0,147	0,289	94,72
69	0,147	0,300	94,17
70	0,147	0,312	93,60
71	0,147	0,323	93,02
72	0,147	0,335	92,39
73	0,147	0,266	94,51
74	0,147	0,255	93,49
75	0,147	0,243	92,38
76	0,147	0,232	91,30
77	0,147	0,220	90,17
78	0,147	0,209	88,81
79	0,158	0,278	94,93

Продолжение таблицы А.1

№ точки	Координата X	Координата Y	Температура, °С
80	0,158	0,289	94,18
81	0,158	0,300	93,33
82	0,158	0,312	92,67
83	0,158	0,323	92,10
84	0,158	0,335	91,50
85	0,158	0,346	90,61
86	0,158	0,266	94,31
87	0,158	0,255	92,78
88	0,158	0,243	91,48
89	0,158	0,232	90,42
90	0,158	0,220	89,37
91	0,158	0,209	87,95
92	0,158	0,198	85,56
93	0,170	0,278	94,95
94	0,170	0,289	93,62
95	0,170	0,300	92,59
96	0,170	0,312	91,94
97	0,170	0,323	91,41
98	0,170	0,335	90,87
99	0,170	0,266	94,10
100	0,170	0,255	92,13
101	0,170	0,243	90,77
102	0,170	0,232	89,76
103	0,170	0,220	88,82
104	0,170	0,209	87,67
105	0,181	0,278	93,04
106	0,181	0,289	92,47
107	0,181	0,300	91,79
108	0,181	0,312	91,27
109	0,181	0,323	90,81
110	0,181	0,335	90,27
111	0,181	0,266	92,49
112	0,181	0,255	91,20
113	0,181	0,243	90,07
114	0,181	0,232	89,17
115	0,181	0,220	88,33
116	0,181	0,209	87,27
117	0,193	0,278	91,46
118	0,193	0,289	91,36
119	0,193	0,300	91,04
120	0,193	0,312	90,58

Продолжение таблицы А.1

№ точки	Координата X	Координата Y	Температура, °С
121	0,193	0,323	90,19
122	0,193	0,335	89,61
123	0,193	0,266	91,07
124	0,193	0,255	90,27
125	0,193	0,243	89,39
126	0,193	0,232	88,51
127	0,193	0,220	87,78
128	0,193	0,209	86,70
129	0,204	0,312	89,66
130	0,204	0,232	87,67
131	0,078	0,278	105,43
132	0,078	0,289	105,41
133	0,078	0,300	106,18
134	0,078	0,312	105,38
135	0,078	0,323	103,37
136	0,078	0,335	101,70
137	0,078	0,346	99,12
138	0,078	0,266	105,21
139	0,078	0,255	104,55
140	0,078	0,243	103,72
141	0,078	0,232	102,43
142	0,078	0,220	100,69
143	0,078	0,209	98,49
144	0,078	0,198	95,40
145	0,067	0,278	103,08
146	0,067	0,289	103,05
147	0,067	0,300	102,73
148	0,067	0,312	102,06
149	0,067	0,323	101,04
150	0,067	0,335	99,52
151	0,067	0,346	97,47
152	0,067	0,266	102,83
153	0,067	0,255	102,27
154	0,067	0,243	101,43
155	0,067	0,232	100,23
156	0,067	0,220	98,66
157	0,067	0,209	96,72
158	0,067	0,198	94,49
159	0,056	0,278	99,78
160	0,056	0,289	99,75
161	0,056	0,300	99,44

Продолжение таблицы А.1

№ точки	Координата X	Координата Y	Температура, °С
162	0,056	0,312	98,83
163	0,056	0,323	97,91
164	0,056	0,335	96,68
165	0,056	0,346	95,20
166	0,056	0,266	99,55
167	0,056	0,255	99,04
168	0,056	0,243	98,25
169	0,056	0,232	97,17
170	0,056	0,220	95,82
171	0,056	0,209	94,28
172	0,056	0,198	92,76
173	0,044	0,278	96,80
174	0,044	0,289	96,76
175	0,044	0,300	96,46
176	0,044	0,312	95,91
177	0,044	0,323	95,12
178	0,044	0,335	94,14
179	0,044	0,346	93,09
180	0,044	0,266	96,59
181	0,044	0,255	96,12
182	0,044	0,243	95,40
183	0,044	0,232	94,43
184	0,044	0,220	93,27
185	0,044	0,209	92,06
186	0,044	0,198	90,94
187	0,033	0,278	94,14
188	0,033	0,289	94,09
189	0,033	0,300	93,80
190	0,033	0,312	93,30
191	0,033	0,323	92,60
192	0,033	0,335	91,77
193	0,033	0,266	93,95
194	0,033	0,255	93,51
195	0,033	0,243	92,86
196	0,033	0,232	91,99
197	0,033	0,220	90,97
198	0,033	0,209	89,98
199	0,021	0,278	91,76
200	0,021	0,289	91,69
201	0,021	0,300	91,40
202	0,021	0,312	90,92

Продолжение таблицы А.1

№ точки	Координата X	Координата Y	Температура, °С
203	0,021	0,323	90,30
204	0,021	0,335	89,54
205	0,021	0,346	88,27
206	0,021	0,266	91,59
207	0,021	0,255	91,20
208	0,021	0,243	90,58
209	0,021	0,232	89,79
210	0,021	0,220	88,91
211	0,021	0,209	87,89
212	0,021	0,198	86,63
213	0,010	0,278	89,64
214	0,010	0,289	89,57
215	0,010	0,300	89,27
216	0,010	0,312	88,78
217	0,010	0,323	88,27
218	0,010	0,335	87,71
219	0,010	0,266	89,50
220	0,010	0,255	89,14
221	0,010	0,243	88,54
222	0,010	0,232	87,83
223	0,010	0,220	87,15
224	0,010	0,209	86,44
225	0,002	0,278	87,75
226	0,002	0,289	87,70
227	0,002	0,300	87,45
228	0,002	0,312	87,04
229	0,002	0,323	86,66
230	0,002	0,335	86,17
231	0,002	0,266	87,63
232	0,002	0,255	87,33
233	0,002	0,243	86,85
234	0,002	0,232	86,29
235	0,002	0,220	85,78
236	0,002	0,209	85,99
237	0,013	0,312	85,73
238	0,013	0,232	85,63
239	0,024	0,312	85,77
240	0,024	0,232	85,89
241	0,013	0,278	85,80
242	0,013	0,289	85,77
243	0,013	0,300	85,62

Продолжение таблицы А.1

№ точки	Координата X	Координата Y	Температура, °С
244	0,013	0,323	85,91
245	0,013	0,335	85,57
246	0,013	0,266	85,72
247	0,013	0,255	85,58
248	0,013	0,243	85,55
249	0,013	0,220	85,75
250	0,013	0,209	85,53

Приложение Б
Матрица плана В₆

Таблица Б.1

№	X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X1 *X2	X1 *X3	X1 *X4	X1 *X5	X1 *X6	X2 *X3	X2 *X4	X2 *X5	X2 *X6	X3 *X4	X3 *X5	X3 *X6	X4 *X5	X4 *X6	X5 *X6	α	
	ПФЭ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1
2		1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	89,53	
3		1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	86,37
4		1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	87,87
5		1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	86,56
6		1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	93,9
7		1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	92,57
8		1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	97,38
9		1	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	102,8
10		1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	115,9
11		1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	107,8
12		1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	114
13		1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	114
14		1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	124
15		1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	116,3
16		1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	120,9
17		1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	71,56
18		1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	72,57
19		1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	71,34
20		1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	67,97
21		1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	66,22
22		1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	68,08
23		1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	67,2

Продолжение таблицы Б1

№	X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X1 *X2	X1 *X3	X1 *X4	X1 *X5	X1 *X6	X2 *X3	X2 *X4	X2 *X5	X2 *X6	X3 *X4	X3 *X5	X3 *X6	X4 *X5	X4 *X6	X5 *X6	α	
ПФЭ ⁶	24	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	67,84	
	25	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	78,3	
	26	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	81,08
	27	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	80,64
	28	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	83,47
	29	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	81,15
	30	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	79,78
	31	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	79,54
	32	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	83,39
«Звездные « точки»	33	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	60,36
	34	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	78,78
	35	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	67,39
	36	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	87,14
	37	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	74,82
	38	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	89,34
	39	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	85,44
	40	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	88,43
	41	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	65,32
	42	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	109,1
	43	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	91,58
	44	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	114,8
	45	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	93,95
	46	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	113,7
	47	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	100,2
	48	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	114,8
	49	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	56,59
	50	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	64,74

