



На правах рукописи

Старенченко Александр Владимирович

**Разработка методики конструирования теплонагруженных БРЛС
малоразмерных ЛА**

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Автореферат

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре «Конструирование, технология и производство радиоэлектронных средств» Московского авиационного института (национального исследовательского института)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Ушкар Михаил Николаевич

Официальные оппоненты: Пиганов Михаил Николаевич
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Самарский национально
исследовательский университет имени
академика С.П. Королева», профессор
Филатов Александр Александрович
кандидат технических наук
АО «Концерн радиостроения «Вега»,
заместитель директора научно-
образовательного центра

Ведущая организация: АО «Научно-исследовательский институт
точных приборов»

Защита диссертации состоится «31» октября 2018 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ и на сайте
https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=95622

Автореферат разослан «__» _____ 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.125.03



Сычев Михаил Иванович

Актуальность работы.

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. На данный момент объем мирового рынка авиационной продукции составляет порядка 14 миллиардов долларов. При этом доля рынка БПЛА составляет 50%, из которой порядка 66% приходится на БПЛА военного назначения.

В соответствии с универсальной классификацией БПЛА (UVS International), предложенной международной ассоциацией по беспилотным системам Association for Unmanned Vehicle Systems International (AUVSI), 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. Масса бортовых РЛС (БРЛС) средних БПЛА составляет около 25% массы летательного аппарата, т.е. 35-100 кг. Эти БРЛС должны обеспечить требуемые тактико-технические характеристики (ТТХ), сравнимые с вертолетными РЛС.

В работе выполнен анализ основных параметров 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: Х-диапазона БРЛС МФ2-2, Ка-диапазона «Корсар-МРЛЦН», Ку-диапазона «Ратник», AP/APY-8, Thales I Master, EL/M-2055D. Результаты анализа показали, что основными тенденциями развития конструкций современных БРЛС малоразмерных ЛА (МЛА) являются снижение габаритных размеров и потребляемой мощности. При этом динамика снижения габаритных размеров превышает динамику снижения потребляемой мощности, что обуславливает рост удельной плотности теплового потока примерно в 4 раза.

Указанные тенденции обусловлены применением цифровых технологий формирования и обработки сигнала на базе современной элементной базы с высокой степенью интеграции (в том числе твердотельных усилителей мощности СВЧ).

Рост удельной мощности рассеяния и, как следствие, повышение температуры составных частей (СЧ) приводит к снижению надежности БРЛС, поэтому исследование путей повышения надёжности БРЛС МЛА является актуальной научной задачей.

Цель диссертационной работы.

Повышение надежности БРЛС путем оптимизации температурного поля их конструкций.

Задачи исследования.

1. Анализ температурной зависимости параметров БРЛС.
2. Анализ конструктивных особенностей БРЛС с целью формирования требований и ограничений на системы охлаждения (СО) БРЛС.
3. Анализ особенностей теплообмена конструкций БРЛС малоразмерных летательных аппаратов (МЛА), позволяющих 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, позволяющей 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, обеспечивающей максимальное значение надежности БРЛС.

Методы исследований.

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

Научная новизна диссертационной работы.

Научной новизной обладают следующие результаты, полученные в диссертации:

- методика теплового моделирования сложных конструктивных сборок БРЛС, отличающаяся от известных возможностью интегральной оценки значений температурного поля конструкций БРЛС;

- тепловая макро модель 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.

Практическая значимость.

1. Тепловая макро модель 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.

Реализация и внедрения результатов работы.

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

- ОКР «Конформизм РЛК-Ф».

Результаты работы были использованы в НЦ СРМ МАИ:

- ОКР «Разработка и организации высокотехнологичного производства малогабаритной многорежимной бортовой радиолокационной системы Ku – диапазона волн для оснащения перспективных беспилотных и вертолетных систем»;
- ОКР «Разработка многофункциональной радиолокационной целевой нагрузки для беспилотного летательного аппарата малой дальности самолетного типа», что подтверждено соответствующим актом использования результатов работы.

Достоверность результатов.

Достоверность 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 средствами 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. Эффективность систем ПВО малоразмерных ЛА определяется распределением воздушных потоков в каналах охлаждения СЧ БРЛС и коэффициентом теплоотдачи поверхностей СЧ БРЛС.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- Международная конференция «Авиация и космонавтика 2014», Москва, МАИ, 2014 г.;
- Московская молодежная научно-практическая конференция 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.

Публикации.

Результаты диссертационной работы отражены в 10 научных трудах, в том числе шесть тезисов докладов на научно-технических конференциях, три статьи в журналах рекомендованных ВАК, одна заявка на полезную модель.

Структура и объем диссертации.

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 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, а также положения, выносимые на защиту. Излагается краткое содержание работы.

В первой главе проанализировано влияние температуры на основные параметры БРЛС. Показано, что: интенсивность отказов электронных модулей БРЛС повышается примерно на 30 % при повышении температуры окружающей среды на каждые 10 °С; температурная зависимость основных функциональных параметров БРЛС проявляется в повышении мощности шума и, следовательно, в ухудшении отношения С/Ш.

В диссертационной работе был проведен анализ особенностей конструкции современных БРЛС МЛА. Рассмотрены основные виды БРЛС, устанавливаемые на МЛА: БРЛС с электромеханическим сканированием, БРЛС с фазированной антенной решеткой (ФАР), БРЛС с активной фазированной антенной решеткой (АФАР). Показано, что БРЛС с электромеханическим сканированием и БРЛС с ФАР являются основными видами БРЛС для МЛА. В диссертационной работе показано, что для таких БРЛС в качестве системы охлаждения выбирают принудительное воздушное охлаждение (ПВО), которое позволяет обеспечить нормальный тепловой режим. Особенности систем ПВО БРЛС МЛА являются ограниченный и фиксированный расход охлаждающего воздуха, обусловленный параметрами конструкции воздухозаборника и ограничением на потребляемую мощность. Также показано, что СЧ БРЛС МЛА имеют существенный разброс (до 2 раз) значений температур перегревов и, как следствие, разную наработку на отказ.

В диссертационной работе показано, что тепловой режим БРЛС при импульсном режиме работы можно считать квазистационарным. Автором проведен анализ процессов теплообмена в конструкциях БРЛС, который показал, что 85-90 % от подведенной энергии к БРЛС преобразуется в тепловую энергию. Также было показано, что 88 % тепловой энергии передается в окружающую среду (ОС) за счет принудительной конвекции.

Анализ конструкций систем ПВО БРЛС МЛА 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. Показано, что эффективность систем ПВО БРЛС МЛА определяется эффективностью теплообмена в продуваемых плоских и оребренных каналах.

В диссертационной работе проанализирована эффективность использования ПВО БРЛС и показана ее относительно невысокая эффективность (до 32 %), что указывает на наличие существенных резервов систем ПВО. Показано, что повышение эффективности систем охлаждения может быть достигнуто путем оптимизации параметров радиатора с целью достижения максимального значения коэффициента теплоотдачи и выбором параметров продуваемых каналов, обеспечивающих оптимальное распределение охлаждающего воздуха.

Во второй главе решены следующие задачи: разработан алгоритм адаптации конструкции БРЛС к анализу теплового режима; разработана методика формирования макромодели БРЛС, которая позволяет выбирать рациональное соотношение между временем и точностью анализа теплового режима конструкции БРЛС; разработана тепловая макромодель штыревого радиатора, позволяющая обеспечить максимальную теплоотдачу; разработана методика распределения воздушных потоков, позволяющая обеспечить нормальный тепловой режим путем перераспределения охлаждающего воздуха в конструкции БРЛС.

Разработанный алгоритм адаптации конструкции БРЛС к задаче анализа теплового режима представлен следующей последовательностью (рисунок 1):

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 фасок и скруглений 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.

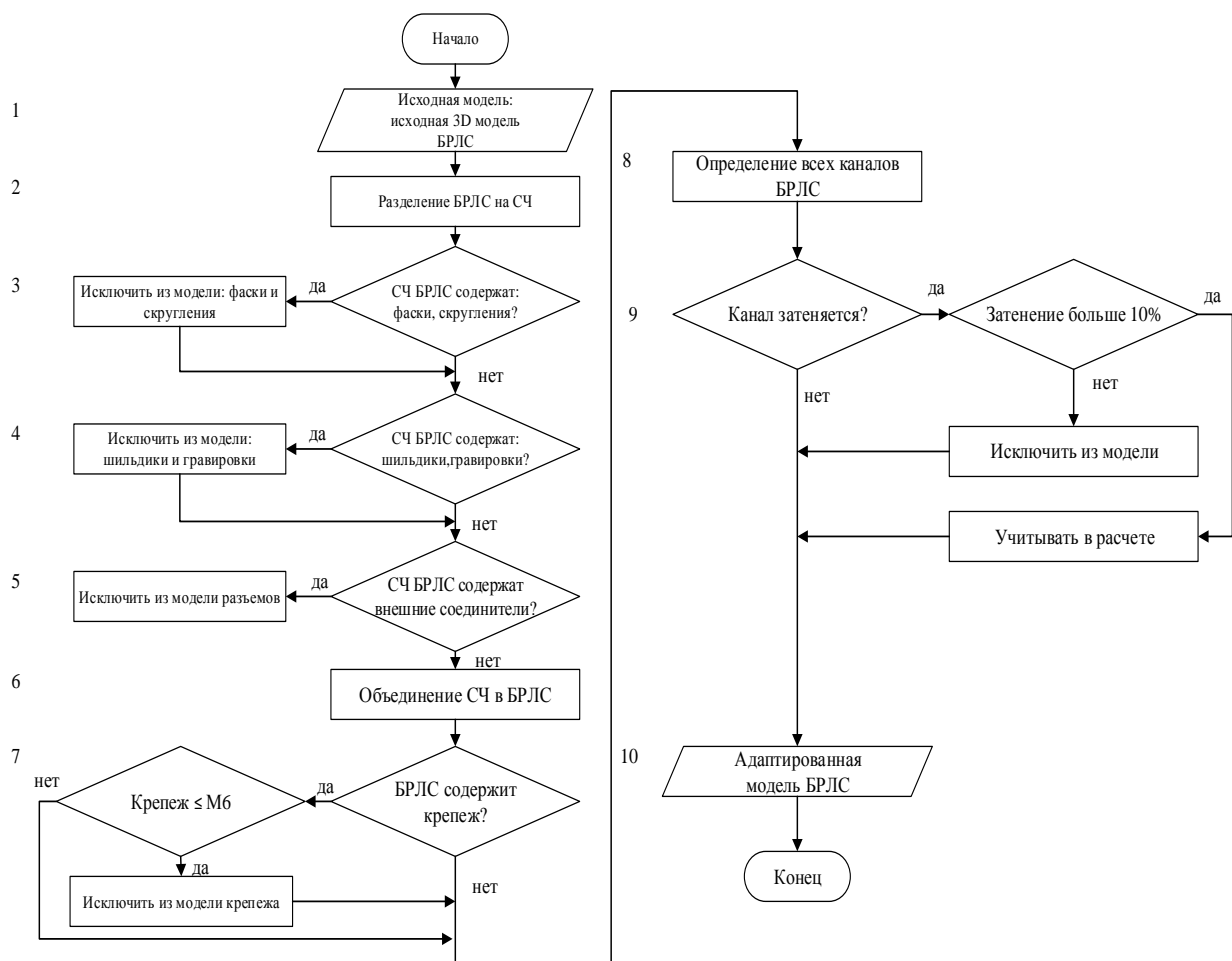


Рисунок 1 – Алгоритм адаптации конструкции БРЛС к задаче анализа теплового режима

Таким образом, предложенный алгоритм адаптации БРЛС к анализу теплового режима, позволил сократить время анализа примерно в 4,5 раза при погрешности результата анализа около 3,5 %.

В диссертационной работе предложена следующая методика теплового моделирования сложных конструктивных сборок БРЛС, которая представляет собой следующую последовательность (рисунок 2):

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

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 изотермические поверхности (ИП) $\{P_{ij}\}$. Из матрицы температур выбирается максимальное значение ($t_{\max j}, j=1$). При этом в одну ИП попадают все значения, которые меньше максимального на 6 % (значение выбирается в соответствии с требуемой точностью формирования макромоделей). 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.

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 – по данным, полученным на этапе 9, формируется матрица проводимостей БРЛС для всех СЧ БРЛС.

Этап 12 – вывод тепловой макромоделей БРЛС.

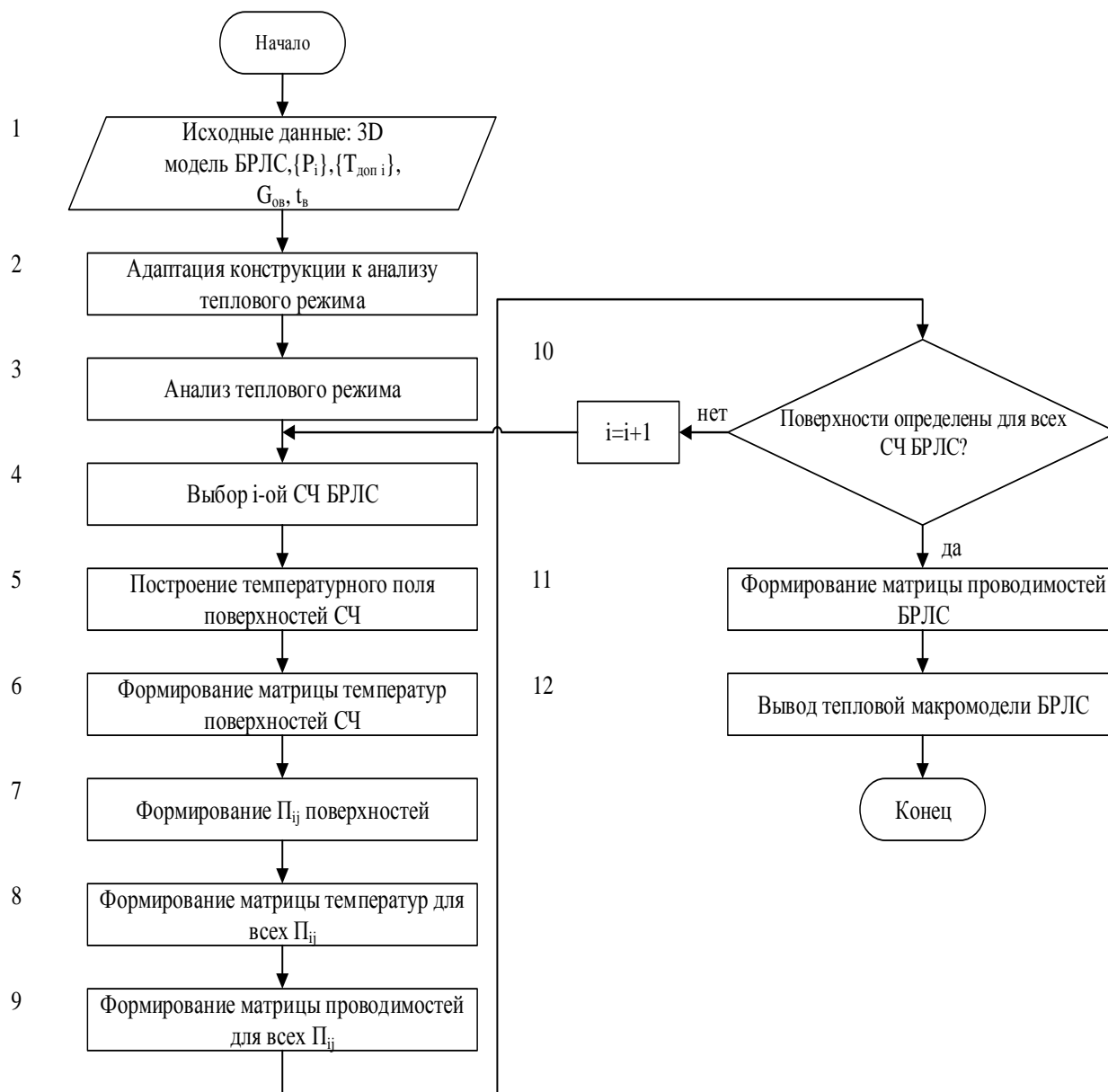


Рисунок 2 – Методика формирования макромоделли БРЛС

Оценка точности разработанной методики формирования тепловых макромоделей конструкции БРЛС выполнена в диссертационной работе на примере БРЛС «Ратник».

Для решения задачи разработки методики макромоделирования штыревого радиатора была разработана методика, представленная следующей последовательностью (рисунок 3):

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

Этап 2 – проведение корреляционного анализа с использованием сформированного на этапе 1 множества параметров 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 – определение 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.

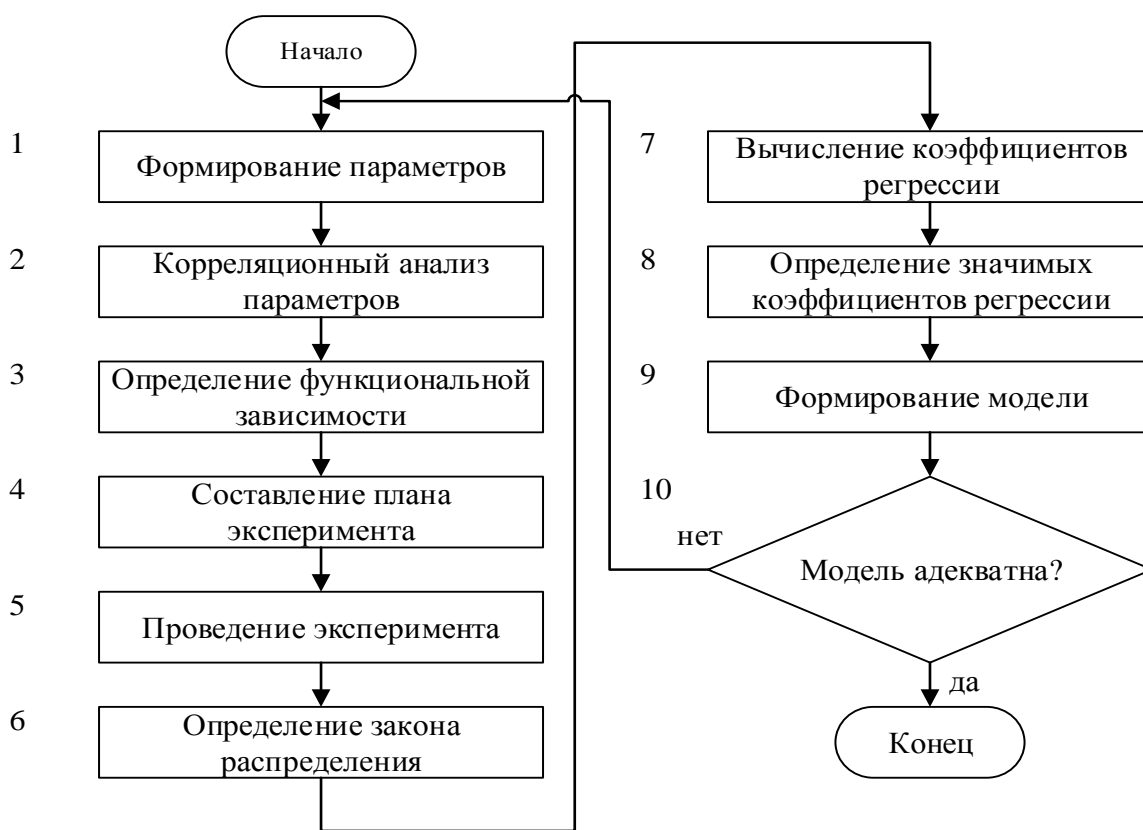


Рисунок 3 – Алгоритм методики макро моделирования радиатора

В результате использования алгоритма методики автором получена тепловая макро модель штыревого радиатора.

Разработана методика распределения воздушных потоков, которая представляет собой следующую последовательность (рисунок 4):

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.

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 ($t_{ik \text{ max}}$).

Все характеристики каналов (давление и температура) определяются при помощи метода прозрачных мембран, 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.

Этап 6 – формирование тепловой макромодели БРЛС.

Этап 7 – проверка удовлетворения условия $t_{ik \text{ max}} \geq t_{i \text{ доп}}$. 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 $t_{ik \text{ max}} \geq t_{i \text{ доп}}$.

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

Этап 10 – корректировка параметров каналов, которая 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.).

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.

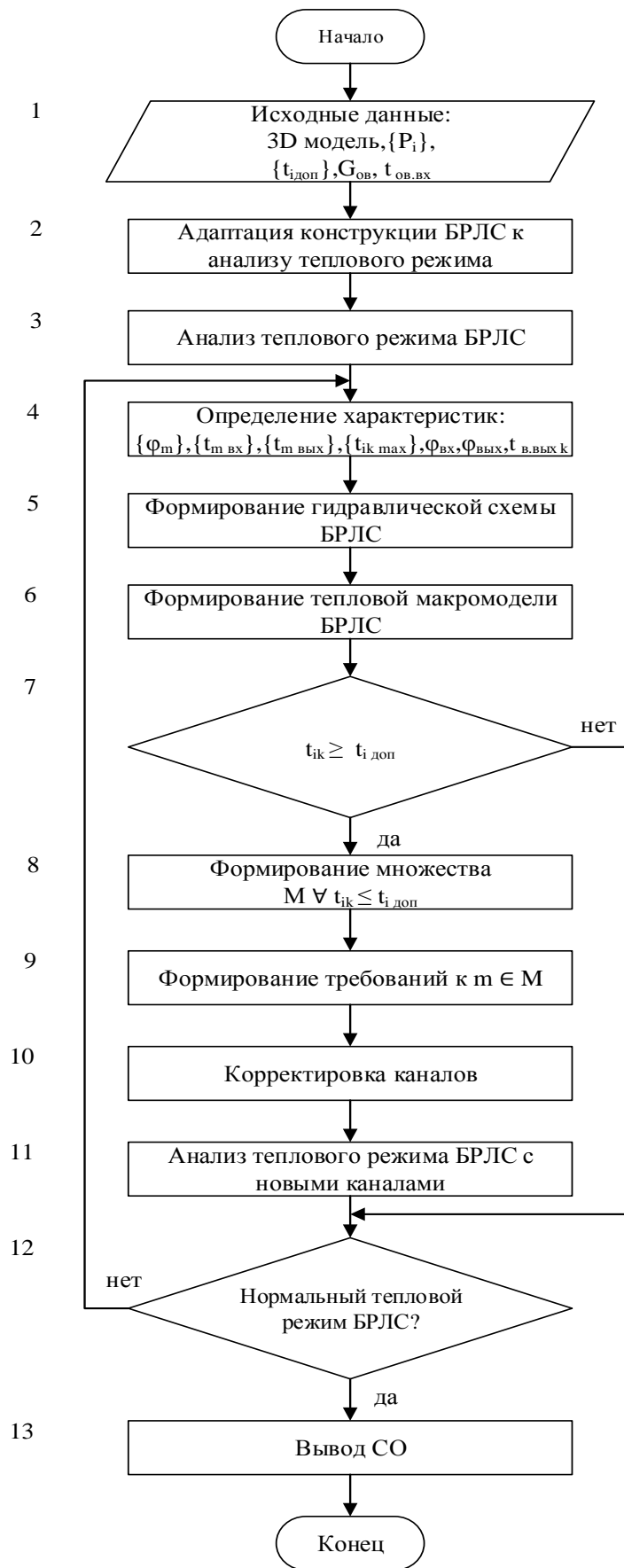


Рисунок 4 – Методика распределения воздушных потоков БРЛС

В третьей главе решены следующие задачи: выбран критерий и поставлена задача оптимизации, выбран метод оптимизации, разработана методика конструирования теплонагруженных БРЛС МЛА.

Оптимальным температурным полем считается такое распределение температур элементов конструкции, при котором обеспечивается максимальное значение вероятности безотказной работы (ВБР) БРЛС за время полета МЛА. 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, при этом эксплуатационная интенсивность отказов БРЛС равна:

$$\Lambda_3 = \sum_{i=1}^N \lambda_{3i}, \quad (1)$$

где: λ_{3i} – эксплуатационная интенсивность отказов i -ой СЧ БРЛС, 1/час; N – число СЧ.

В свою очередь λ_{3i} определяется выражением:

$$\lambda_{3i} = \lambda_{0i} \cdot \prod_{j=1}^N K_j, \quad (2)$$

где: λ_{0i} – базовое значение интенсивности отказов i -ой СЧ БРЛС, 1/час; 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:

$$\lambda_{3i} = \Lambda_{3i} \cdot K_{Ti}, \quad (3)$$

где: Λ_{3i} – 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 (1) в (3), получим значение эксплуатационной интенсивности отказов БРЛС:

$$\Lambda_3 = \sum_{i=1}^N \Lambda_{3i} \cdot K_{Ti}, \quad (4)$$

Поскольку минимальное значение Λ_3 обеспечивает максимум ВБР БРЛС, то в качестве критерия оптимизации СО выбираем Λ_3 .

С учетом изложенного задача может быть представлена в следующем виде:

$$\Lambda_{30} \rightarrow \min \Lambda_{3j}, j = 1 \dots m, \quad (5)$$

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 -го варианта конструкции БРЛС и ее допустимое значение.

В главе проведен обзор математических методов оптимизации и выбран один из них – симплекс-метод.

В работе решена задача разработки методики конструирования теплонагруженных БРЛС с принудительным воздушным охлаждением, обеспечивающим максимальное значение надежности БРЛС. Методика представляет собой следующую последовательность (рисунок 5):

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 $\{\lambda_{oi}\}$;
- 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 .

Этап 4 – анализ теплового режима V_i . Формирование тепловой макромодели V_i в виде системы изотермических поверхностей Π_{ij} .

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} . 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 макромоделей радиатора.

Этап 10 – синтезирование оптимальной макромоделей 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.

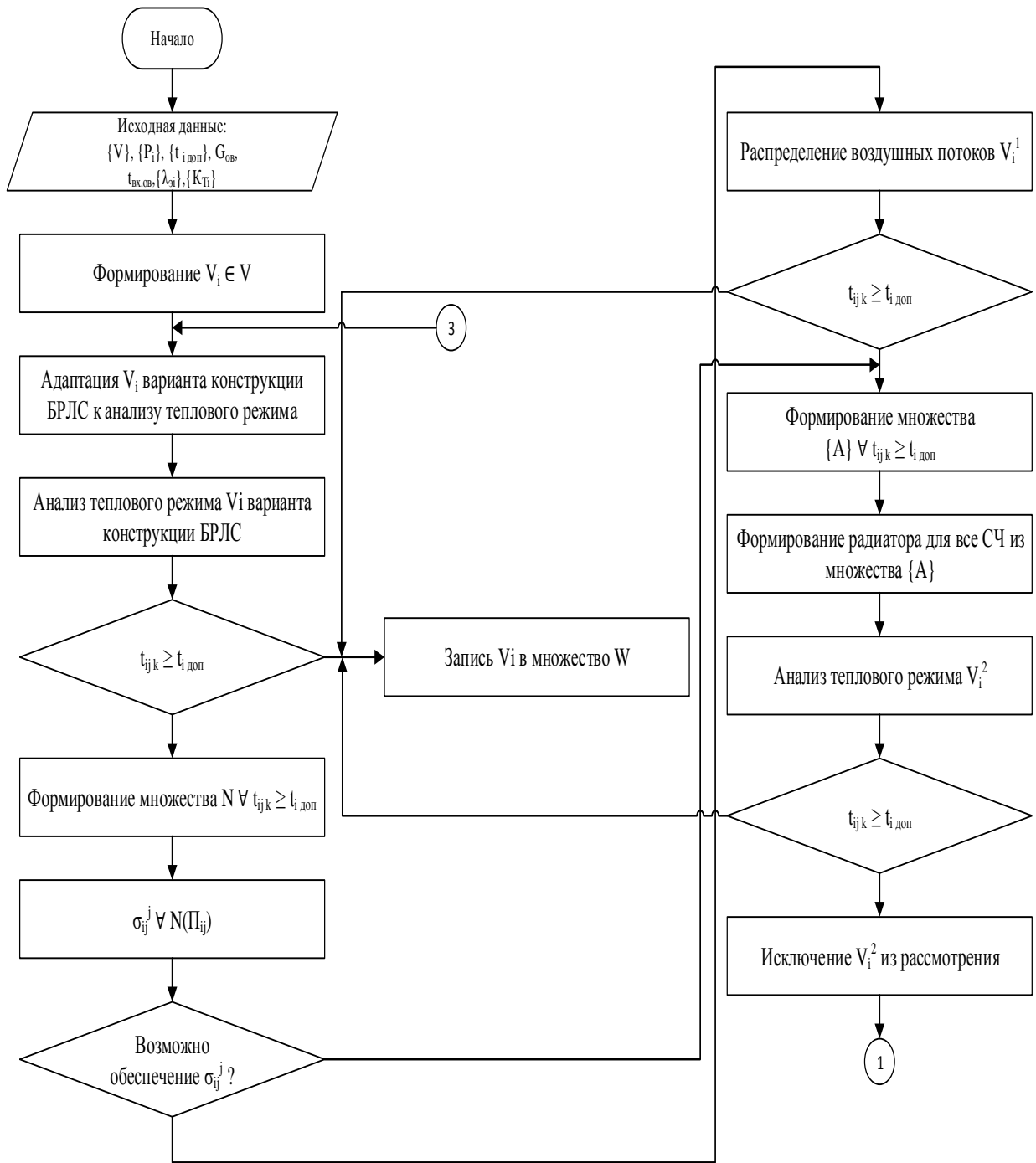
Этап 16 – перераспределение воздушных потоков в пользу СЧ, существенно влияющих на $\Lambda_{эq}^1$. Проверка условия этапа 5: если условие выполняется, осуществляется переход к следующему этапу, иначе к этапу 13.

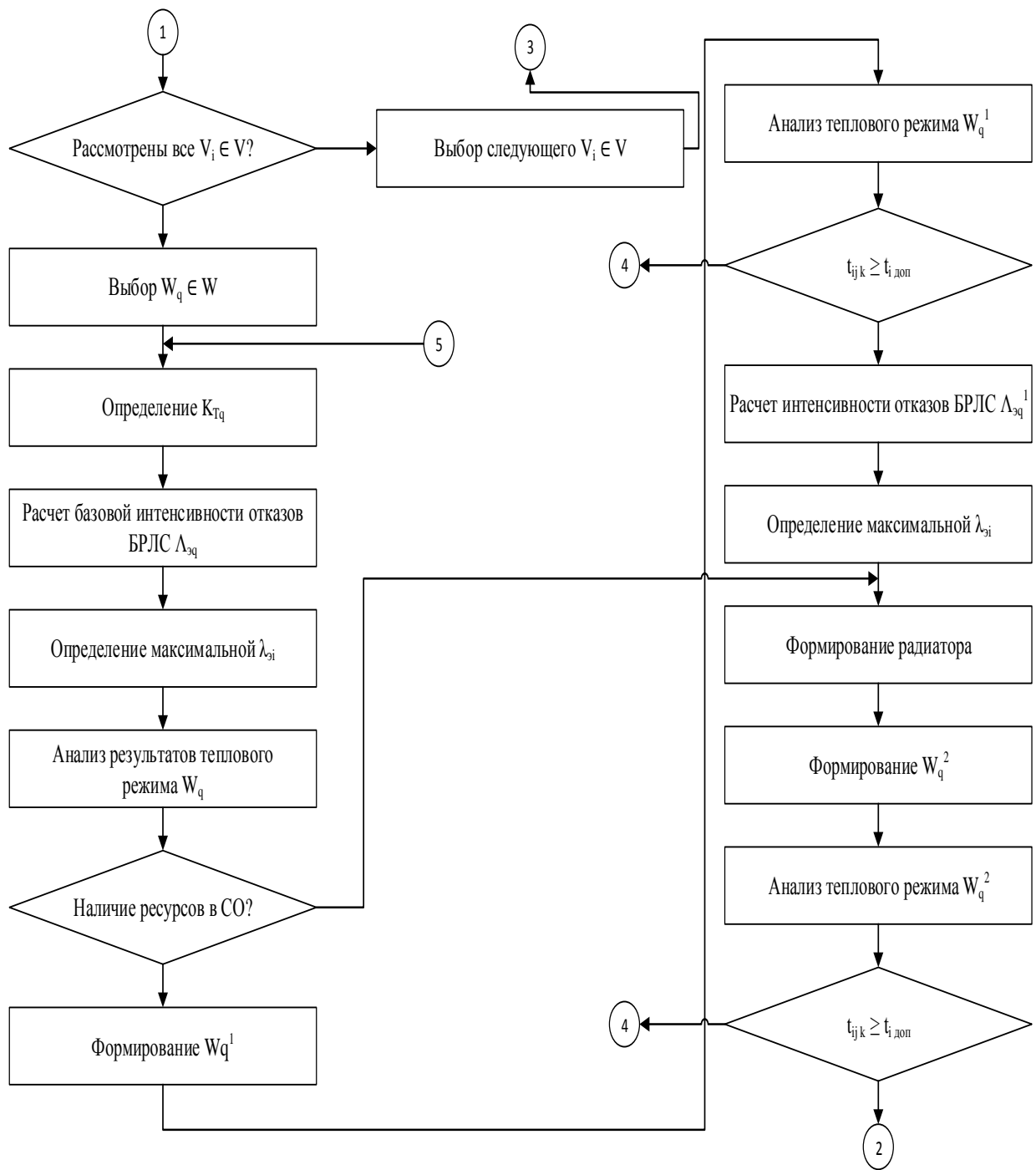
Этап 17 – в соответствии с этапами 9, 10 синтезируется оптимальный радиатор для СЧ, существенно влияющих на $\Lambda_{эq}^1$.

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.





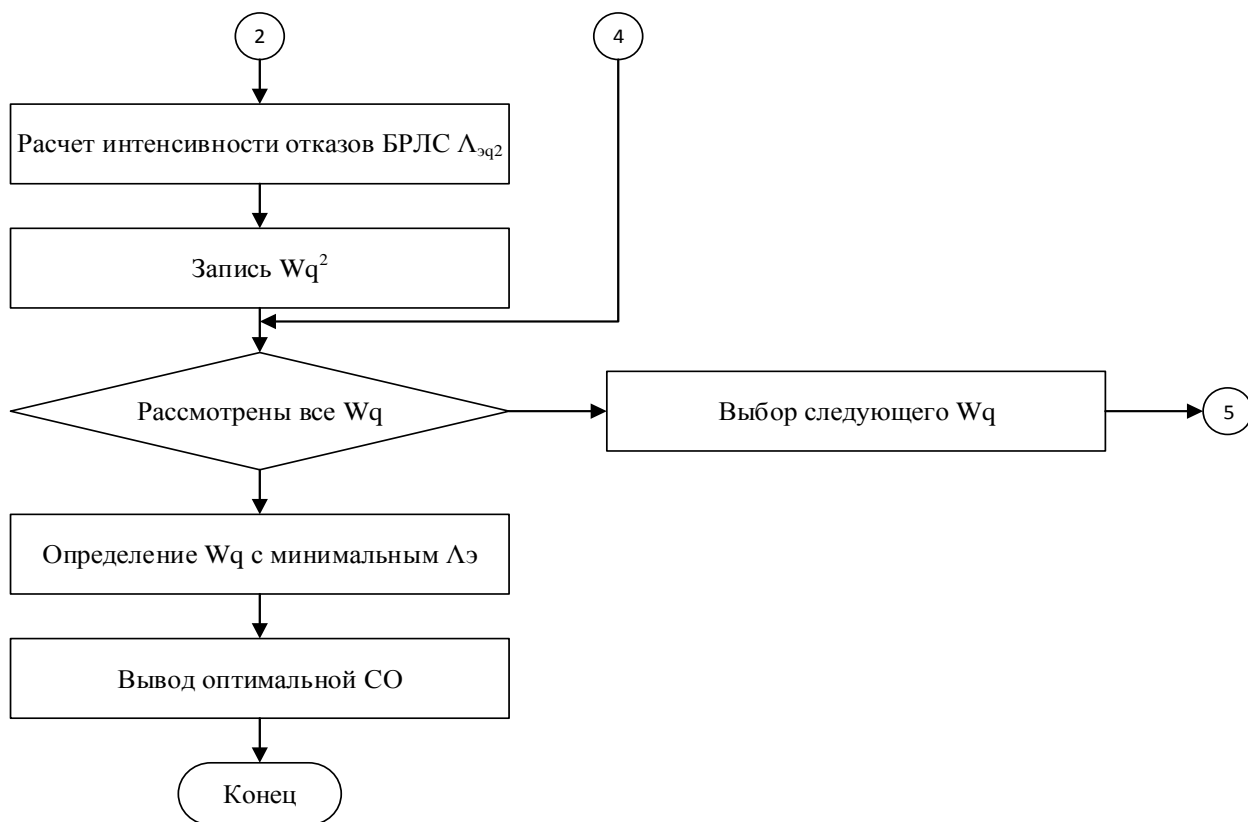


Рисунок 5 – Методика конструирования теплонагруженных БРЛС

Таким образом, в главе решена задача разработки методики конструирования теплонагруженных БРЛС с принудительным воздушным охлаждением, обеспечивающая максимальное значение надежности БРЛС.

В четвертой главе проведена проверка адекватности разработанных методик на примере БРЛС Ку-диапазона и модуля источника питания (МИП) АФАР.

Показано, что применение, методов и алгоритмов, разработанных в диссертации, позволило повысить надежность БРЛС Ку-диапазона на 53%, БРЛС «Арбалет АФАР» на 32%.

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

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Установлено, что основные параметры БРЛС являются температурозависимыми. На примере УМ СВЧ БРЛС показано, что при повышении температуры на 10 °С 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 макромоделей 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 макро модель 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 Ку-диапазона на 53 %; БРЛС «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.

Публикации по теме диссертации

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Старенченко А.В., Ушкар М.Н. «Тепловая макромодель штыревого радиатора для системы охлаждения бортовых РЭС малоразмерных ЛА» // «Научные технологии», №8, 2015г., стр.26-30.
2. Старенченко А.В., Ушкар М.Н. «Проектирование системы охлаждения бортовых РЭС малоразмерных ЛА» // «Научные технологии», №10, 2016г., стр.3-6.
3. Старенченко А.В. «Оптимизация распределения воздушных потоков в бортовых РЭС малоразмерных ЛА» // «Электромагнитные волны и электронные системы», №7, 2017г., стр. 63-66.

Тезисы и доклады на конференциях:

4. Старенченко А.В., Ушкар М.Н. Оптимизация структуры систем охлаждения бортовых РЭС малоразмерных ЛА средствами САПР / Сборник тезисов докладов 13-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2014». 17-21 ноября 2014 г. М.: МАИ, 2014, с.441.
5. Старенченко А.В., Ушкар М.Н. Регрессионная макромодель штыревого радиатора / Сборник тезисов докладов московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике -2015» 21-23 апреля 2015 г. М.: МАИ, 2015, с.164.
6. Старенченко А.В. Повышение эффективности системы охлаждения бортовых РЭС малоразмерных ЛА / Сборник тезисов докладов 14-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2015». 16-20 ноября 2015 г., М.: МАИ, 2015, с.280-282.
7. Старенченко А.В., Ушкар М.Н. Проектирование оптимальных систем охлаждения бортовых РЭС / Сборник тезисов докладов XLII международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения – 2016» 12-15 апреля 2016 г., Т.1, М.:МАИ, 2016, с.550.
8. Старенченко А.В. Методика проектирования радиаторов с распределенными источниками тепла / Сборник тезисов докладов 16-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2017» 20-24 ноября 2017 г., М.:МАИ, 2017, с.244-245.
9. Старенченко А.В., Ушкар М.Н. Методика проектирования системы воздушного охлаждения БРЭС/ Сборник тезисов докладов XLIII международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения – 2017» 5-19 апреля 2016 г., М.:МАИ, 2017, с.608.

Тираж 100 экз.

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(национально исследовательский университет)»

125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4
Тел. +7 499 158-43-33, 158-58-70, 158-00-02