

Введение Интерес к исследованию вопросов интенсификации теплообмена в испарительных системах охлаждения обусловлен бурным развитием полупроводниковой микроэлектроники и, как следствие, значительным ростом тепловыделения с единицы поверхности. Проблемы охлаждения и термостабилизации элементов радиоэлектронного оборудования, прежде всего, связаны с необходимостью миниатюризации аппаратуры и достаточно жесткими требованиями пожарной и экологической безопасности. К особенностям работы испарительных систем охлаждения можно отнести наличие фазового перехода, как правило, кипения, обеспечивающего постоянный теплоотвод. Для интенсификации теплообмена в таких системах используют различные способы развития поверхности в том числе нанесения мини- и микрооребра различной формы, поверхностной упорядоченной и неупорядоченной шероховатости, частичную перфорацию и многое другое. Кроме того, значительный положительный эффект достигается за счет подвода хладагента по нормали к поверхности через одиночный канал или группу каналов. Импульсные струи являются так же одними из наиболее перспективных и эффективных способов интенсификации теплообмена за счет разрушения пристенного пограничного слоя. Некоторые аспекты интенсификации теплоотдачи при импульсной подаче теплоносителя на различные поверхности рассмотрены в [1-3]. Испарительное охлаждение при импульсной подаче хладагента нашло широкое практическое применение в современной технике, в том числе в системах термостабилизации и охлаждения центральных процессоров и графических чипов электронно-вычислительной аппаратуры, микросхем и модулей питания телекоммуникационного оборудования и приборов связи, а так же биполярных транзисторов (IGBTs) в преобразователях электрического тока. Одним из перспективных направлений применения импульсных струй в промышленности является термическая обработка металлических листов в прокатном производстве. В настоящее время широкое распространение в современной медицине получили такие методы лечения патологических процессов как криотерапия. Сверхнизкие температуры (ниже $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$) позволяют решать достаточно большой спектр задач, в практической медицине начиная от нейрохирургии, офтальмологии и заканчивая областью косметологии. Основной отличительной особенностью оборудования, применяемого в криохирургии, является криораспылитель, обеспечивающий подачу хладагента (жидкого азота) по нормали к поверхности. Кроме того, о значительном интересе к вопросам, связанным с интенсификацией теплоотдачи при взаимодействии хладагентов с различными по форме и размерам поверхностями применительно к системам охлаждения радиоэлектронного оборудования свидетельствует большое количество публикаций в современных научных изданиях, как в России, так и за рубежом. Такие исследования различаются, прежде всего, по условиям взаимодействия теплоносителя с рабочей поверхностью на однофазные, в

которых не происходит изменения агрегатного состояния хладагента [4,5] и двухфазные, сопровождающиеся кипением теплоносителя. Современное состояние вопроса В настоящее время в современной технике достаточно распространены тепловые потоки плотностью до 50 Вт/см². В соответствии с прогнозом, представленном Амоном в [6] в ближайшем будущем тепловыделение с поверхности некоторых образцов радиоэлектронного оборудования может достичь 100 Вт/см², что, в свою очередь, потребует внедрения новых более эффективных решений в области интенсификации теплоотдачи в системах охлаждения и термостабилизации теплонагруженных элементов радиоэлектронного и электросилового оборудования. В тематической литературе достаточно подробно рассмотрены вопросы однофазного струйного охлаждения в части экспериментальных исследований, численного и физического моделирования. Остановимся более подробно на некоторых исследованиях. Известна работа Фабри и Дира [7], в которой авторы рассматривают вопросы струйного охлаждения теплонагруженных поверхностей импактными потоками и отдельными каплями теплоносителя. Причем в зависимости от условий проведения экспериментов хладагент может быть представлен в виде мелкодисперсной фазы, либо при достаточной интенсивности подачи – в виде отдельных жидких конгломератов, сливающихся в единую струю. В статье представлена классификация импактных струй на свободные и затопленные. При свободном импактном течении жидкость, подаваемая через диспергирующие каналы, проходит через газовую среду и взаимодействует с нагретой поверхностью. Затопленная струя подается на рабочую поверхность через слой теплоносителя. Так же рассмотрены особенности теплообмена при подаче хладагента через одиночный канал. Показано влияние на теплоотдачу режимных и геометрических параметров. Ли и Гаримелла [8] предложили общие расчетные зависимости для свободных и затопленных жидких и воздушных импактных струй через отверстия с диаметром 1,59~12,7 мм. Для случая мультиструйного течения показано влияние расстояния между каналами. Пан и Вебб [9] рассмотрели влияние на теплоотдачу шага между струями ($S/d=2\sim 8$). В качестве хладагента использовалась вода. Авторы определили, что локальные коэффициенты теплопередачи зависят, прежде всего, от расстояния между подающим каналом и рабочей поверхностью и практически не сказывается влияние расстояния между струями. Робинсон и Шницлер [10] экспериментально исследовали теплообмен при взаимодействии свободных и затопленных импактных струй воды с нагреваемой поверхностью площадью 780 мм². Теплоноситель подавался через матрицу, состоящую из 21, 54 и 121 отверстия расположенных с интервалом 3~7 калибров и диаметром 1 мм. Авторами установлено, что в интервале относительных расстояний от канала до поверхности $h/d=2\sim 10$ свободная импактная струя ведет себя как затопленная. Для затопленных струй

наблюдалась существенная зависимость параметров теплообмена от h/d и шага между подающими отверстиями. В работе отмечается, что для свободных импактных струй существенная зависимость теплоотдачи от безразмерного расстояния до рабочей поверхности прослеживается до $h/d=10$, при дальнейшем увеличении h/d это влияние вырождается. Масштабная экспериментальная работа по исследованию влияния многоструйного охлаждения на теплоотдачу представлена Темахам и Фарахатом [11]. Авторами подробно рассмотрены вопросы совместного взаимодействия импактных струй с рабочей поверхностью. Так установлено, что взаимное влияние потоков теплоносителя приводит к уменьшению средней скорости пленки, а так же к увеличению ее толщины, особенно это проявляется в межструйной области. Такая ситуация приводит к уменьшению среднего значения числа Нуссельта. Тем не менее, среднее значение теплоотдачи на рабочем участке при использовании мультиструйного охлаждения выше, чем с применением одиночной струи. Из всего отмеченного ранее следует, что для интенсификации теплоотдачи необходимо увеличение числа струй. При этом для минимизации негативных эффектов, возникающих при дополнительном взаимодействии струй между собой, необходимо либо увеличить шаг между подающими каналами (форсунками) либо расход рабочего тела. Авторами установлено, что в случае применения струйного охлаждения для отвода тепловых потоков высокой плотности с плоских протяженных рабочих поверхностей целесообразно использование линейного расположения каналов. С точки зрения отвода тепловых потоков высокой плотности от теплонагруженных элементов радиоэлектронного оборудования наиболее предпочтительным является реализация поверхностного кипения при импактной подаче хладагента. Это объясняется тем, что в условиях однофазной конвекции, при неизменной площади контакта теплоносителя с рабочим участком, увеличение отводимого теплового потока связано с ростом температурного градиента между поверхностью и хладагентом, что, в общем, является нежелательным, так как может привести к прогару и физическому повреждению участка. С другой стороны наличие фазового перехода приводит к умеренному росту перепада температур с одновременным значительным увеличением отводимых тепловых потоков. В литературе, как правило, рассматриваются три основные области кипения: пузырьковое, переходное и пленочное. В связи с широкой практической применимостью и максимальными значениями теплоотдачи наиболее исследованной является область пузырькового кипения. Тем не менее, по причине достаточной сложности описания этого процесса большинство работ в этой области посвящено количественной оценке явления, а так же получению расчетных зависимостей для различных начальных условий. Большинство известных исследований посвящено рассмотрению влияния на теплоотдачу при импактном кипении теплоносителей основных параметров и определению их функциональных зависимостей с целью проведения

последующих инженерных расчетов. К основным влияющим факторам можно отнести геометрические параметры поверхности теплообмена и подающего канала, расстояние между каналом и рабочей поверхностью, угол подачи теплоносителя, начальные параметры рабочего тела и многое другое.

Достаточно подробно закономерности отвода высоких тепловых потоков при струйном охлаждении поверхности в режиме кипения недогретой струи фреона R-113 рассмотрены П.Л Кирилловым в [3]. Авторами показана возможность отвода тепловых потоков до 5 МВт/м² на гладкой поверхности и 7,5 МВт/м² на поверхности с микрооребрением. Установлено, что критическая плотность теплового потока увеличивается с ростом давления, недогрева и расхода теплоносителя, а так же при уменьшении расстояния между рабочей поверхностью и выходным сечением струи. Использование сопловой вставки обеспечивает дополнительное прижатие струи к теплообменной поверхности и, соответственно, более высокую скорость струи, позволяющую отводить значительные тепловые потоки. Кроме того, установлено, что при равном расходе теплоносителя на единицу теплообменной поверхности увеличение диаметра канала, а, следовательно, и струи или использование многоструйной сопловой вставки приводит к снижению критической плотности теплового потока. Аналогичные результаты получены в работе [12]. Чен с соавторами провели сравнительный анализ эффективности отвода тепловых потоков с оребренной и гладкой поверхности при импактной подаче FC-72 в качестве теплоносителя. Устройства для распыла представляло собой пластину с пятью отверстиями диаметром 0,23 мм и 0,56 мм. Установлено, что подвод теплоносителя через отверстия с диаметром 0,23 мм дает возможность реализовать за счет более качественного взаимодействия с поверхностью теплообмена максимальные значения теплоотдачи и, как следствие, большие значения тепловых потоков. Поверхностное оребрение позволило увеличить в зависимости от режима примерно на 40% по сравнению с гладкой пластиной отводимую плотность теплового потока. Так же известна работа Монде и Като [13] в которых рассматриваются вопросы охлаждения нагретых поверхностей одиночными струями фреона R-113 и воды. Авторы определили, что при низких начальных давлениях и малых недогревах в режиме кипящей струи возможно отвести от поверхности тепловые потоки до 18 МВт/м² используя воду в качестве рабочего тела и до 1 МВт/м² на фреоне соответственно. В [14] А.И. Абросимов и А.А. Парамонов исследовали теплообмен на дне цилиндрической камеры в режиме затопленной струи воды. Подача теплоносителя осуществлялась по нормали к нагреваемой поверхности с диаметром 30 мм. При низком давлении (0,1 МПа) и малом расходе воды (0,015 кг/с) в области недогрева 80-85 °С критическая плотность теплового потока достигала 6 МВт/м². Ведсуорт и Мудавар в [15] и Майер с соавторами в [16] получили кривые кипения FC-72 для импактных струй различной конфигурации и представили

расчетные зависимости для критической плотности теплового потока. В работах отмечается, что диаметр подающего канала и начальное давление оказывает влияние на размер капель и, соответственно, на характеристики испарительного струйного охлаждения. Естес и Мудавар [17] исследуя каналы различного диаметра, определили зависимость критической плотности теплового потока от среднего размера капель, расхода теплоносителя и других параметров для FC-72, FC-87 и воды. Авторами установлено, что с увеличением перепада давления в канале происходит уменьшение диаметра капель. Влияние растворенного газа на параметры процесса кипения рассмотрены в работах [18] и [19]. Лин и Поннэппен в [18] осуществляли подачу FC-87, FC-72, метанола и воды через восемь отверстий и установили, что наличие растворенного газа приводит к увеличению критической плотности теплового потока, а так же, в общем, положительно сказывается на эффективности охлаждения теплонагруженных элементов радиооборудования. Хорачек с соавторами в [19] исследовали влияние растворимого газа в FC-72. Теплоноситель подавался на рабочую поверхность через одиночный канал диаметром 0,2 мм. Результаты, полученные в [19], подтвердили выводы, представленные ранее Лин и Поннэппеном в [18], а именно доминирующее влияние добавок растворимого газа на снижение перегрева стенки при фиксированном тепловом потоке. Так же в работах Хорачека с соавторами [20] рассмотрено использование матрицы с девятью шестью индивидуально управляемыми микронагревателями, позволяющими измерять и варьировать отводимым тепловым потоком на общей площади 0,49 см² (7,0 мм x 7,0 мм). Диаметр подводящих каналов составлял 0,2 мм, а расстояние от каналов до нагреваемой поверхности варьировалось в диапазоне от 7 до 17 мм. Визуализация экспериментов позволила авторам достаточно точно определить поверхность, контактирующую с теплоносителем. Кроме того, было выявлено, что теплоотдача при кипении достаточно сильно зависит от площади поверхности смачиваемой струей. При этом с увеличением площади контакта происходит значительный рост среднего по поверхности коэффициента теплоотдачи, что, в свою очередь, положительно сказывается на количественных характеристиках отводимых тепловых потоков. Для увеличения отводимых тепловых потоков как в режимах однофазной конвекции, так и кипящих струй достаточно часто применяется такой способ развития поверхности контакта как нанесение мини- и микроорегрения. В связи с этим большой интерес представляет ряд работ, посвященный данной тематике. Известна работа Хсих и Иао [21], в которой авторами исследовано струйное охлаждение водой гладких и оребренных кремниевых поверхностей при малых расходах теплоносителя. Установлено наличие четырех режимов теплоотдачи: затопленный, режим с тонкой пленкой, режим с частичным высыханием и режим с высыханием. Максимальные значения теплоотдачи получены на поверхности с квадратными ребрами в режимах с тонкой пленкой и частичным высыханием.

Достаточно подробно в современной литературе изучено влияние угла распыла теплоносителя на качественные и количественные характеристики процесса теплоотдачи в одно- и двухфазных потоках. В работе Вайсария и Мудавара [22] подробно рассмотрено влияние угла распыла теплоносителя на рабочие параметры процесса теплоотдачи в режиме испарительного охлаждения теплонагруженных поверхностей. Авторами представлена новая теоретическая модель, позволяющая определить форму струи, поверхность контакта рабочего тела с участком, при учете угла наклона потока, а так же объемного расхода теплоносителя. В экспериментах тепловые характеристики процесса фиксировались как в однофазной, так и в двухфазной области, что позволило отследить зависимость основных параметров при различных начальных условиях исследования. Установлено, что форма области контакта теплоносителя с рабочей поверхностью может меняться в зависимости от угла подачи. Так авторами показано, что увеличение угла распыла приводит к тому, что область импактного контакта приобретает эллипсоидную форму, и, кроме того, способствует уменьшению критической плотности теплового потока. Силк с соавторами в [23] экспериментально исследовали влияние угла наклона импактной струи, а также развитие поверхности теплообмена с помощью прямого кубического и пирамидального оребрения на характеристики струйного охлаждения. Подача теплоносителя PF5060 осуществлялась через матрицу с отверстиями 2мм на 2 мм. Высота оребрения составляла 1 мм. В результате авторами установлено, что максимальное значение теплоотдачи и теплового потока по сравнению с плоской поверхностью соответствует прямой конфигурации ребер. Экспериментальные исследования

На основе проведенного подробного анализа литературы можно выделить несколько ключевых вопросов, рассмотрение которых является наиболее актуальным. Прежде всего, необходимо отметить проблему термостабилизации охлаждаемого элемента, т.е. получения равномерного температурного поля на рабочей поверхности. Очевидным решением поставленной задачи может стать организация покрытия хладагентом максимальной площади рабочей поверхности, в том числе за счет реализации многоточечного подвода теплоносителя с одновременной оптимизацией формы поверхности теплообмена. При этом рассмотрение данной проблемы необходимо осуществлять в комплексе с вопросами возможного управления и регулирования отводимых тепловых потоков. Кроме того, важным моментом, оказывающим существенное влияние на теплоотдачу, и, как следствие, на отводимую от рабочей поверхности плотность теплового потока является расстояние от канала до исследуемого участка. Для исследования влияния термических параметров процесса кипения импактных струй фреона R-134a и геометрических характеристик рабочих поверхностей на плотности теплового потока и теплоотдачу был использован экспериментальный стенд, выполненный по схеме замкнутого расходного контура, подробное описание

которого представлено в [24]. Эксперименты проводились в условиях стационарного нагрева на пяти рабочих поверхностях, выполненных из меди марки М1. Участок №1 представлял собой поверхность с мини шероховатостью, выполненной в виде столбиков высотой 1,5 мм и 1,2х1,2 мм в сечении. Кроме того, на торцевой поверхности столбиков был сформирован рельеф в виде «ласточкиного хвоста». Рабочий участок №2 отличался от участка №1 только плоской торцевой поверхностью мини оребрения. Поверхности №3 и №4 представляли собой медные плоскости с упорядоченной и неупорядоченной микро шероховатостью глубиной 300 мкм. Причем на участке №4 шероховатость наносилась в произвольной форме, а на поверхности №3 была нанесена сетка с шагом 500 мкм. Рабочий участок №5 представлял собой гладкую поверхность. Подробное описание методики проведения исследований, а так же геометрические характеристики и внешний вид рабочих участков представлены в [25]. Диапазон плотностей тепловых потоков менялся от 0 до 270000 Вт/м². Основные результаты экспериментальных исследований представлены на рис.1 и 2. Из зависимости теплоотдачи от подводимой плотности теплового потока (рис.1) следует, что максимальное значение α соответствует поверхности №1 с упорядоченной мини шероховатостью. Следующим по эффективности можно отметить рабочий участок №2. Существенное отличие в значениях теплоотдачи между мини и микро шероховатыми поверхностями можно объяснить разницей в площади теплообменной поверхности. Так участки №1 и №2 за счет активного участия в теплообмене боковых и торцевых сторон поверхностной шероховатости обеспечивают более высокие теплоотдачи. Кроме того, кризисные явления, связанные с переходом от пузырькового к переходному и далее к пленочному режимам кипения, за счет дополнительной интенсификации сдвигаются в область значительно больших плотностей теплового потока. Несколько меньшие значения коэффициента теплоотдачи получены при кипении импактных струй фреона на поверхностях №3 и №4. Причем, упорядоченная микро шероховатость обеспечивает в пузырьковой и переходной областях кипения большие значения теплоотдачи при более высоких подводимых плотностях теплового потока, чем поверхность с неупорядоченной микро шероховатостью. Рис. 1 - Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока на рабочих участках №1-№5 Зависимости плотности теплового потока от температурного напора (кривые кипения) представленные на рис.2 свидетельствуют о существенном влиянии формы теплообменной поверхности на качественные и количественные характеристики процесса. Так минимальная плотность теплового потока соответствует гладкой поверхности. В диапазоне температурных напоров от 2 0С до 5 0С максимальное значение q соответствует рабочей поверхности №1. Рис. 2 - Зависимость плотности теплового потока от температурного градиента В соответствии с классификацией представленной в [26] на графической зависимости (рис.2) можно выделить три основных режима

кипения струи фреона, а именно, пузырьковый, переходный и пленочный. Причем за счет высокой интенсивности процесса кипения, обусловленной способом подачи теплоносителя область пузырькового кипения имеет достаточно малый диапазон по температурному перепаду, что в свою очередь благоприятно сказывается на механических и прочностных характеристиках рабочего участка в целом. Области тепловых нагрузок, в которых применим тот или иной рабочий участок удобно определять по такому общепринятому в теплотехнике параметру как термическое сопротивление. Причем чем меньше значение R , тем более эффективна рабочая поверхность с точки зрения охлаждающей способности. На рис.3 представлена зависимость термического сопротивления от отводимой тепловой нагрузки. Из графика следует, что каждая из рассматриваемых теплообменных поверхностей имеет свой рабочий диапазон тепловых нагрузок, в котором обеспечивается минимальное значение термического сопротивления. Так рабочий участок с гладкой поверхностью имеет достаточно узкий рабочий интервал с 95 Вт до 130 Вт, что объясняется отсутствием поверхностных интенсификаторов и как следствие минимальной площадью контакта. Развитие поверхности теплообмена, связанное с нанесением не упорядоченной и упорядоченной микрошероховатости, приводит к значительному росту рабочего диапазона Q для области 2 от 130 Вт до 180 Вт, а для области 3 от 180 Вт до 290 Вт (рис.3). Поверхности со структурированной минишероховатостью обеспечивают расширение интервала тепловых нагрузок с 290 Вт до 405 Вт для области 4, и с 405 Вт до 490 Вт для области 5 соответственно (рис.3). Полученные в экспериментах данные по термическому сопротивлению исследуемых рабочих поверхностей достаточно хорошо согласуются как качественно, так и количественно с результатами, представленными в [7]. Вопросы охлаждения теплонагруженных элементов радиоэлектронного и электросилового оборудования, несомненно, необходимо рассматривать совместно с проблемой термостабилизации поверхности полупроводникового элемента. При этом необходимо учитывать тот факт, что по причине малого размера и высокой плотности элементов в каждом слое компонента его поверхность можно рассматривать как изотермическую. В связи с этим можно отметить, что существенное значение при исследовании теплоотдачи на различных поверхностях полупроводникового радиооборудования имеет такой параметр как температурное поле рабочей поверхности. Рис. 3 - Зависимость термического сопротивления от тепловой нагрузки для исследуемых поверхностей. Как следует из рис.4 максимальную рабочую температуру при 73 Вт тепловой нагрузки показала гладкая поверхность №5. Кроме того, эта поверхность имеет максимальный экстремум в критической точке, что позволяет сделать вывод о невозможности ее применения для охлаждения изотермической поверхности радиоэлемента. Из всех рассмотренных рабочих участков наиболее подходящими с точки зрения

охлаждения и термостабилизации являются поверхности №3 и №4. (поверхности с упорядоченной и неупорядоченной микршероховатостью). Рис. 4 - Распределение температуры по поверхности рабочего участка Рис. 5 - Зависимость отводимой плотности теплового потока от расстояния от подводящего канала до рабочей поверхности. Еще одним фактором, имеющим существенное влияние на теплоотдачу, и как следствие на количество отведенного тепла с единицы поверхности является расстояние от подводящего канала до рабочей поверхности (рис.5). В современной литературе, как в научном, так и в прикладном аспекте этому вопросу уделяется достаточно много внимания [2-3,6]. Из рис.5 следует, что зависимость отводимой плотности теплового потока от расстояния между каналом и рабочей поверхностью проявляется наиболее значительно до $h=8$ мм. В дальнейшем это влияние вырождается. Максимальное значение q получено при $h=2$ мм. Это объясняется тем, что за счет достаточно близкого размещения подводящего канала к поверхности теплообмена большая часть хладагента попадает на рабочий участок, находясь в жидкой фазе. С увеличением h происходит обратное: часть фреона испаряется на подходе к поверхности за счет взаимодействия с отходящими от рабочего участка более нагретыми парами фреона, и лишь часть жидкого рабочего тела достигает поверхности. Аналогичные данные были получены авторами в [3,6] для случая кипения воды на медных гладких и миниоребранных поверхностях. Выводы На основе анализа современной отечественной и зарубежной литературы можно сделать вывод о существенном влиянии на теплоотдачу при взаимодействии импактных струй теплоносителя с различными поверхностями таких параметров как начальное давление газа или парасодержание хладагентов, угол подачи струи, форма и размер поверхностных интенсификаторов теплообмена, количество каналов, расстояние между ними, а так же дистанция от поверхности до канала. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что максимальная средняя теплоотдача при минимальном термическом сопротивлении в диапазоне тепловой нагрузки от 290 Вт до 490 Вт соответствует рабочим поверхностям №1 и №2. При этом максимальный термостабилизационный эффект достигается на микрошероховатых поверхностях №3 и №4.