

**Андреанова Е.П.<sup>1</sup>, Жарихин С.В.<sup>1</sup>, Коннов А.В.<sup>2</sup>,  
Паницков В.И.<sup>1</sup>, Полянская Т.И.<sup>1</sup>, Стройков Е.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>АО «НПП «Исток» им. Шокина»

<sup>2</sup>ФГУП «НПП» Торий»

## **Модернизация основных узлов мощной широкополосной ЛБВ непрерывного действия с целью повышения ее надежности**

*Представлены результаты модернизации основных узлов мощной широкополосной ЛБВ непрерывного действия с целью повышения надежности ее работы в наземной мобильной станции. Представлены расчеты по оптимизации параметров основных узлов ЛБВ.*

**Ключевые слова:** ЛБВ, коэффициент усиления, амплитудный корректор, ввод энергии, секционированная замедляющая система, электронно оптическая система, коллектор.

В современных системах радиоэлектронного вооружения к усилителям промежуточных, а особенно выходных каскадов предъявляются жесткие требования. К ним относятся сочетание широкой полосы усиливаемых частот, высокого коэффициента усиления, большой выходной мощности (несколько киловатт), низкого уровня собственных шумов и относительно небольшие габаритные размеры и масса. В некоторых системах, в частности в системах РЭП, требуется способность усиливать сложные широкополосные сигналы меняющегося уровня. Основным типом усилителя, удовлетворяющим указанным требованиям, является лампа бегущей волны (ЛБВ). ЛБВ с комплексом таких параметров были разработаны в рамках ОКР (таблица 1).

| Наименование параметров     | УВ-382               | УВ-383      | УВ-384               |
|-----------------------------|----------------------|-------------|----------------------|
| Диапазон рабочих частот ГГц | 5,7-7,075            | 7,9-8,4     | 12,5-14,8            |
| Рабочая полоса МГц          | 1350<br>(литеры А,Б) | 500         | 2300<br>(литеры А,Б) |
| Выходная мощность кВт       | 4,3                  | 4           | 3,6                  |
| Коэффициент усиления дБ     | 30                   | 30          | 33                   |
| Ускоряющее напряжение кВ    | 17-20                | 17-20       | 17-20                |
| Ток катода мА,              | ≤1700                | ≤1500       | ≤1700                |
| Ток замедляющей системы мА  | ≤200                 | ≤200        | ≤200                 |
| Вид замедляющей системы     | ВШ                   | ВШ          | ЦСР                  |
| Габариты                    | 600x200x185          | 550x200x185 | 480x177x165          |
| Масса кг                    | 12                   | 12          | 8                    |

Таблица 1. Основные электрические параметры ЛБВ.

Отличительной особенностью разработанных ЛБВ является не только сочетание предельной по ширине полосы рабочих частот (до 13%) с высоким уровнем выходной непрерывной мощности, но и применение для фокусировки электронного пучка магнитной периодической фокусирующей системы (МПФС). В мировой практике проектирования ЛБВ с таким уровнем непрерывной мощности обычно применяется фокусирующая система

«соленоид», значительно увеличивающая общие массу и габариты прибора. Создание конструкции на МПФС позволило получить достаточно компактный мощный широкополосный усилитель, пригодный для монтажа под полотном антенны в мобильных станциях.

При стыковке с аппаратурой применения заказчику не удалось создать безопасный алгоритм управления работой ЛБВ при реализации некоторых новых режимов работы аппаратуры. Для ЛБВ были предъявлены новые требования, такие как необходимость работы в статическом режиме, в режиме малого сигнала и в режиме постоянного входного сигнала в рабочем диапазоне частот.

В результате согласования нового алгоритма и режимов работы ЛБВ в аппаратуре было принято решение о модернизации коллектора прибора, замедляющей системы и выводов энергии. Кроме того, для реализации условия постоянного входного сигнала было решено применить амплитудный корректор, пассивное СВЧ устройство, имеющее заданную частотную характеристику подавления поступающей на него постоянной мощности.

Вообще решить вопрос о постоянном входном сигнале на ЛБВ с предельными по полосе параметрами (13 % при  $R_{вых} \geq 4$  кВт непрерывной мощности) только за счет ЛБВ очень сложно и трудоемко. Некоторая оптимизация ЗС с целью улучшения качества АЧХ может быть проведена с помощью современных расчетных программ. В этом плане и была осуществлена модернизация ЗС ЛБВ. Необходимость модернизации выводов энергии не столь очевидна, однако для повышения запасов по надежности данного узла была проведена замена алюмооксидной вакуумной керамики на керамику из пиролитического нитрида бора. Это позволяет вывести за пределы рабочей полосы все паразитные виды колебаний и повысить устойчивость узла к пробоям в волноводном тракте. Согласно вновь установленным условиям эксплуатации ЛБВ в аппаратуре применения прибор должен работать в статическом режиме (при неполном токе катода) и при малом входном сигнале, что соответствует квазистатическому режиму. При этом коллектор ЛБВ испытывает большие локальные тепловые нагрузки, которые могут привести к проплавлению торца коллектора. Для повышения эффективности теплосъема при сохранении расхода охлаждающей жидкости и повышения надежности узла была произведена модернизация конструкции коллектора.

При разработке ЛБВ были учтены большие тепловые нагрузки на ЗС. Элементы ее конструкции были выбраны более массивными по сравнению с ЗС аналога: так, например, были увеличены толщина пролетной трубки и увеличено поперечное сечение штыря, через который тепловая энергия отводится к охлаждаемой поверхности. Компенсация уменьшения сопротивления связи достигалась уменьшением диаметра пролетного канала, что должно было повлечь более тщательную отработку фокусировки электронного пучка в канале ЗС. Геометрия спроектированной ЗС и отдельные ее детали изображены на рис.1, рис.2.

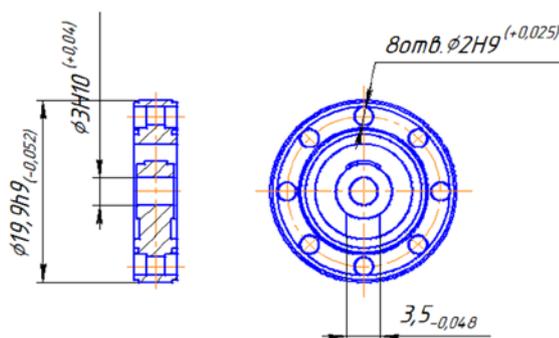


Рис.1. Диафрагма ЗС ЛБВ

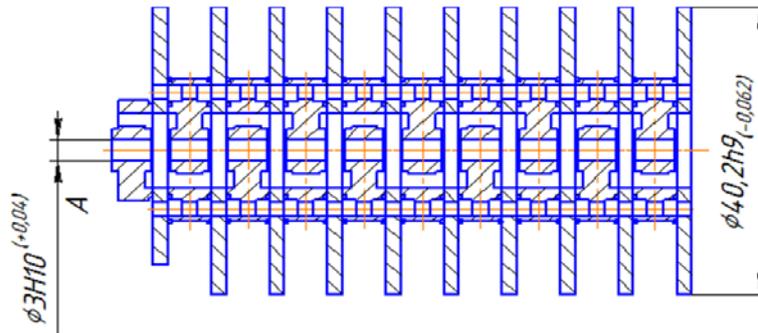


Рис. 2. Секция ЗС ЛБВ

В данной ЛБВ применена трехсекционная структура замедляющей системы. Дисперсионные характеристики каждой секции и соотношение длин секций подобраны (в основном эмпирически) из условия получения заданной полосы усиления. Был реализован «классический» вариант построения ЗС, который был отработан на менее широких полосах усиления (<math><10\%</math>): ЗС разбивается на 3 изолированных друг от друга по СВЧ полю секции-входную, среднюю и выходную; на смежных концах секций устанавливается внутриламповый поглотитель из металлокерамики с железным наполнением. Для разгрузки основного кольцевого поглотителя и расширения полосы его согласования с секцией ЗС применяется распределенный поглотитель в виде железосодержащей пасты-намазки (альсиферовой намазки). Предположительно эффект расширения полосы при таком построении получается за счет получения добавочной группировки электронов на запредельных частотных видах смещенной средней секции, имеющих конфигурацию  $\pi$ -вида или близкую к ней. Расположение рабочего диапазона частот вблизи  $\pi$ -вида, области наибольшего сопротивления связи, позволяет повысить электронный, а вместе с тем и общий КПД ЛБВ и тем самым улучшить энергомассогабаритные характеристики прибора. В разработанной ЛБВ низкочастотная граница полосы прозрачности входной секции более высокочастотна, чем «отсечка» ЗС выходной секции и практически совпадает с низкочастотной точкой рабочей полосы. Это позволило несколько расширить полосу усиления в сторону высоких частот. Помимо взаимного расположения отсечек секций в ходе разработки производилась отработка наклона их дисперсионных характеристик, определение оптимальной длины ЗС и оптимального соотношения длин секций между собой, а также отработка согласования секций с внутриламповым поглотителем. Отработка производилась в основном экспериментальным путем и на момент завершения ОКР параметры, заданные в ТЗ были достигнуты. На рис.3 приведен пример экспериментальной АЧХ разработанной ЛБВ.

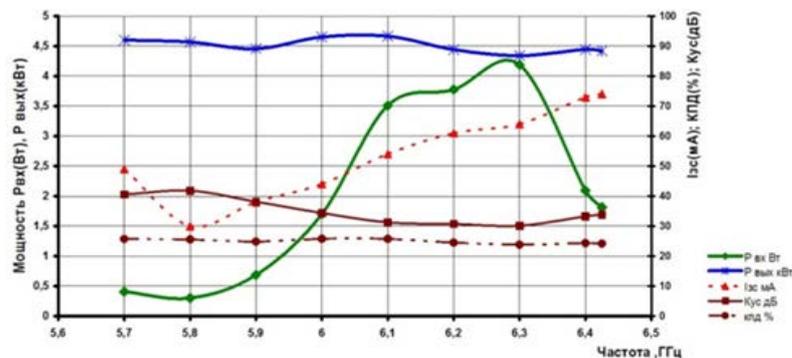


Рис.3. АЧХ разработанной ЛБВ.

Перепад по коэффициенту усиления на разных образцах ЛБВ может достигать (8-12) дБ. Разброс параметра является технологическим и может быть обусловлен условиями настройки электронного пучка по токопрохождению, условиями по согласованию секций ЗС, точностью реализации отсечек секций после их пайки, а также разбросом рабочего режима по напряжению ЗС. Одной из задач модернизации ЛБВ является улучшение качества ее АЧХ. В последнее время существенно повысились возможности машинной оптимизации характеристик с помощью новых расчетных программ. Расчет взаимодействия в модернизируемой ЛБВ проводился по отечественной программе расчета динамических характеристик секционированных ЛБВ, имеющих в структуре ЗС запредельные секции [1]. Данная программа в течение нескольких лет разрабатывалась и тестировалась на базе разработок предприятия «Исток» и обеспечивает достаточное хорошее совпадение расчета с экспериментом. Модернизация ЗС заключалась в подборе дисперсии средней секции таким образом, чтобы уменьшить перепад по коэффициенту усиления по сравнению с перепадом, который получался в прежней конструкции. Результаты расчета и эксперимента представлены ниже. На рис.4 и рис.5, рис.6, рис.7 представлены расчетные и экспериментальные амплитудные и амплитудно-частотные характеристики ЛБВ с модернизированной ЗС.



Рис.4 Расчет амплитудных  $R_{вых}=f(R_{вх})$  и амплитудно-частотных характеристик ЛБВ с модернизированной ЗС при напряжении ЗС 18,7 кВ, токе катода 1,65 А.

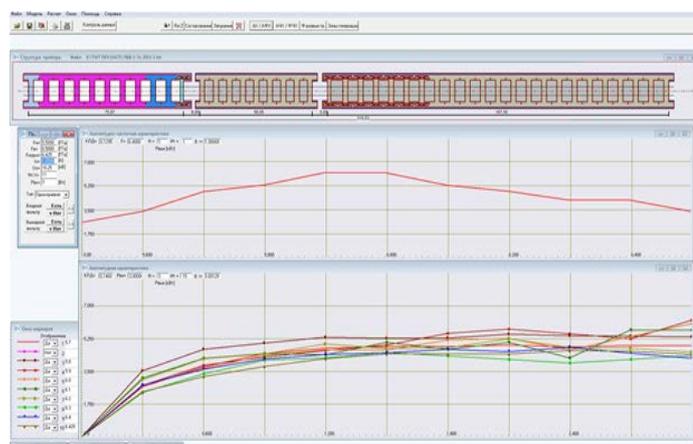


Рис.5 Расчет амплитудных и амплитудно-частотных характеристики ЛБВ с модернизированной ЗС при напряжении ЗС 18,25 кВ и токе катода 1,65 А.

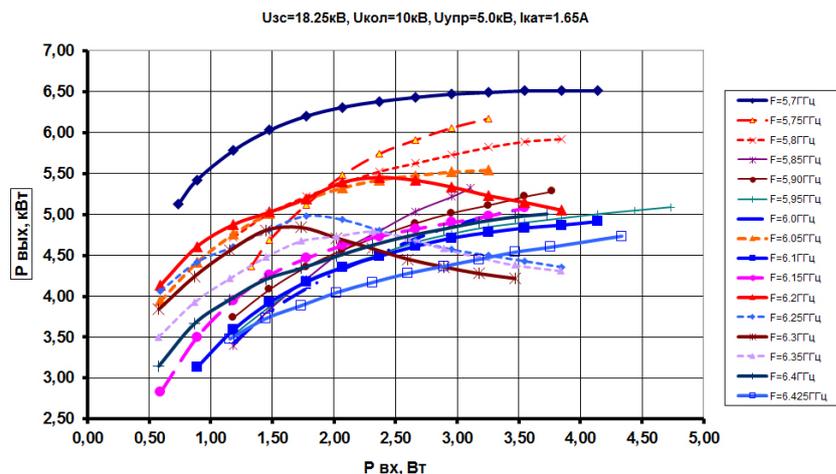


Рис.6 Экспериментальные амплитудные характеристики ЛБВ с модернизированной ЗС при напряжении ЗС 18,25 кВ и токе катода 1,56 А.

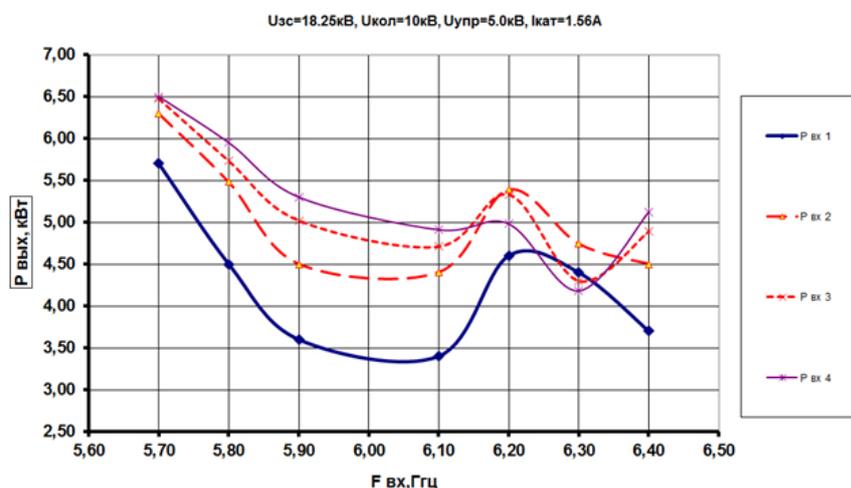
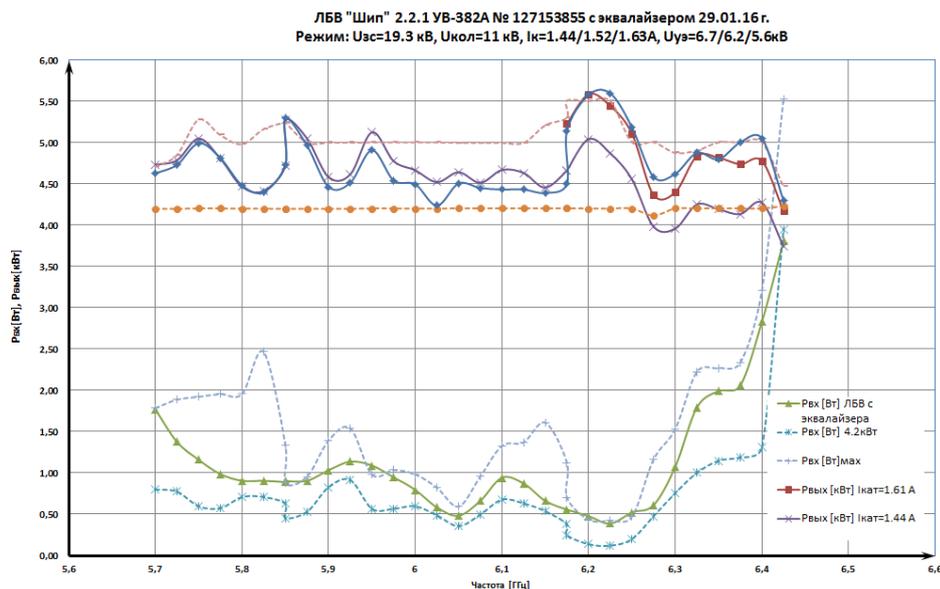


Рис.7 Экспериментальные амплитудно-частотные характеристики ЛБВ с модернизированной ЗС при напряжении ЗС 18,25 кВ и токе катода 1,56 А,

P<sub>вх1</sub>=1 Вт, P<sub>вх2</sub>=2 Вт, P<sub>вх3</sub>=3 Вт, P<sub>вх4</sub>=4 Вт.

Максимальный перепад по коэффициенту усиления на первом модернизированном по ЗС образце находится в пределах 8 дБ по уровню выходной мощности 4,3 кВт, причем он соответствует лишь крайним частотам рабочего диапазона (5,7 и 6,425) ГГц. Внутри рабочего диапазона этот перепад значительно меньше.

В штатной аппаратуре заказчика выходной сигнал не должен превышать уровень 4,5 – 5,5 кВт. Это условие, а также условие работы прибора при постоянном входном сигнале должно выполняться с помощью корректора, который присоединяется ко входу ЛБВ после проведения основной настройки и выбора режима работы прибора. Для каждой ЛБВ должен изготавливаться свой корректор; его частотная характеристика, в общем случае, может быть настроена на определенный уровень выходной мощности в некоторых пределах, при этом производится, если потребуется, некоторая коррекция настройки токопрохождения и оптимизация рабочих режимов ЛБВ. На рисунке 8 показана АЧХ одной из разработанных ламп с корректором.



Разработка конструкции выводов (вводов) энергии при разработке ЛБВ основывалась на следующих требованиях, предъявляемых к разрабатываемым узлам:

- вывод энергии должен пропустить порядка 4,5 кВт непрерывной мощности с необходимым технологическим запасом;

- вывод энергии должен обеспечить заданную рабочую полосу согласования по уровню  $K_{СВн} \leq 1,1$ , а в пределах полосы пропускания ЗС вне рабочей полосы согласование должно быть таким, чтобы не было самовозбуждения лампы.

Также важным требованием к конструкции вывода энергии является обеспечение отсутствия паразитных видов колебаний в рабочей полосе частот. Следует отметить, что не все виды паразитных колебаний являются однозначно опасными и приводящими к разрушению узла. Виды колебаний, электрически не связывающиеся с основным видом распространяющейся волны, могут быть неопасны при достаточно точной сборке узла вывода энергии. При практической недоступности на момент разработки ЛБВ керамики из пиролитического нитрида бора (борнититовой керамики) либо бериллиевой керамики, позволяющих получить абсолютно беспаразитные конструкции, пришлось применить вывода энергии на алюмооксидной керамике ВК 94-1, имеющие паразитные резонансы, не связанные с рабочей волной.

Предпочтение было отдано выводам энергии, работающим на волне E11. В конструкциях, работающих на этом типе волн, концентрация СВЧ мощности имеет максимум своей величины на периферии керамического диска, что способствует более быстрому отводу мощности потерь. При динамических испытаниях ЛБВ в процессе ОКР и при испытаниях в макетной аппаратуре заказчика 3 образца приборов (из 20 испытанных) вышли из строя по причине растрескивания керамического диска вывода энергии. Конечно, можно предположить, что в этом случае произошло связывание паразитных видов с рабочим видом в процессе нагрева узла в рабочем режиме и диск разрушился уже от локальных перегревов. Однако однозначно считать причиной отказов наличие паразитных резонансов нельзя, поскольку в каждом конкретном случае одновременно происходила аварийная ситуация, связанная с неполадками в агрегате охлаждения, либо происходил пробой во внешнем выходном тракте, спровоцированный неисправностью нагрузки. Чтобы полностью исключить возможность отказа ЛБВ из-за паразитных резонансов было решено провести модернизацию вывода энергии с использованием борнититовой керамики, позволяющей получить беспаразитную конструкцию в рабочей полосе частот. Использование керамики на основе окиси бериллия было исключено из рассмотрения из-за ее токсичности.

Изначально из штатных режимов работы ЛБВ статический режим работы был исключен. Кратковременное нахождение в статическом режиме и в режиме малого входного сигнала при полном катодном токе допускалось при настройке и испытаниях прибора. При всех испытаниях и технологических прогонах ЛБВ, соответствующих условиям технического задания (ТЗ) и технических условий (ТУ) признаков перегрева коллектора обнаружено не было. Однако, как уже было сказано выше, при стыковке ЛБВ с аппаратурой и корректировке режимов эксплуатации выявилась необходимость усилить конструкцию коллектора в плане повышения ее устойчивости к локальным тепловым нагрузкам в статическом и квазистатическом режимах. Необходимым условием при модернизации было сохранение массогабаритных характеристик узла, поскольку ЛБВ должна монтироваться в уже готовый аппаратный шкаф. Расход охлаждающей жидкости, 40 л/мин, также должен остаться прежним. Для определения тепловых нагрузок необходимо знать площадь оседания пучка и его мощность. Для всестороннего расчёта и моделирования задач тепловых нагрузок коллектора, как его оптических составляющих, так и тепловых, актуально использовать мульти физические программы 3-х мерного моделирования.

По данным теплового расчета в статическом режиме и максимально допустимом токе получили температуру порядка  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис.8). Данная температура больше температуры размягчения меди, что может привести к значительному выделению ионов с поверхности коллектора и дальнейшей подфокусировки пучка. Данная подфокусировка электронов вызывает резкий рост удельной мощности и проплавление коллектора. Также был проведен расчет с уменьшенным расходом охлаждающей жидкости, который также показал проплавление коллектора.

Для увеличения надежности работы и уменьшения удельной мощности проведена работа по модернизации коллектора. Сложной задачей было сохранение массогабаритных параметров коллектора, при максимальном снижении удельной мощности падающего пучка. На рис. 8 представлена конструкция нового коллектора с сегментами для расчета. В данной конструкции применена система подвода жидкости с 2 рубашками. При таком заводе «холодная» охлаждающая жидкость равномерно со всех сторон обтекает тело коллектора, нагретая охлаждающая жидкость по 2 рубашке выводится из системы. Как показано на рис.7 данная конструкция не создает застоев охлаждающей жидкости в наиболее температурно нагруженных частях коллектора, а конусовидная форма увеличивает площадь оседания пучка, что значительно уменьшает удельную мощность.

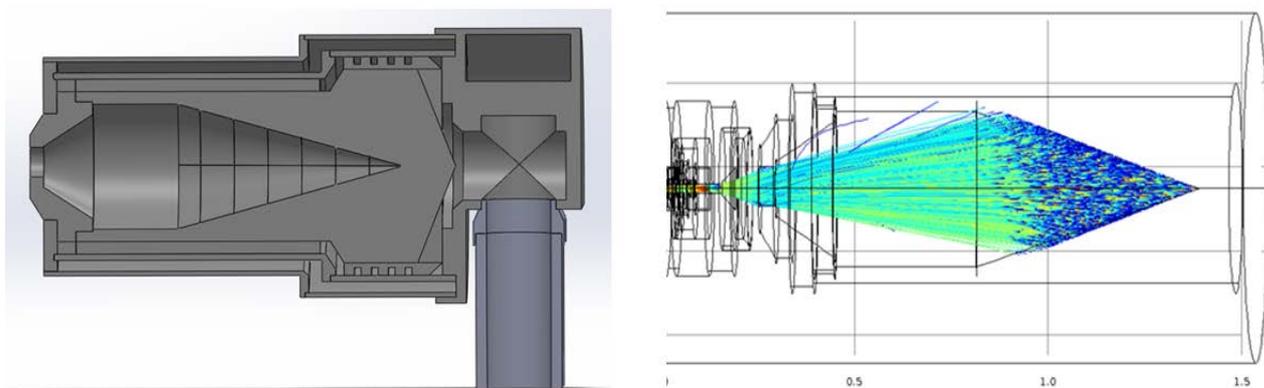


Рис.7 Конструкция модернизированного коллектора и распределение пучка в нем..

Для конструкции, представленной на рис. 7 проведена оптимизация формы коллектора, а именно подобраны размеры цилиндрической и конусной части тела для минимизации удельной мощности пучка при сохранении технологичности детали.

Расчетное распределение пучка в данном коллекторе представлены на рис.7 максимальная удельная мощность составляет и  $395\text{Вт/см}^2$ .

По данным теплового расчета модернизированного коллектора в статическом режиме (рис.8) получили максимальную температуру порядка  $400\text{ C}^\circ$ .

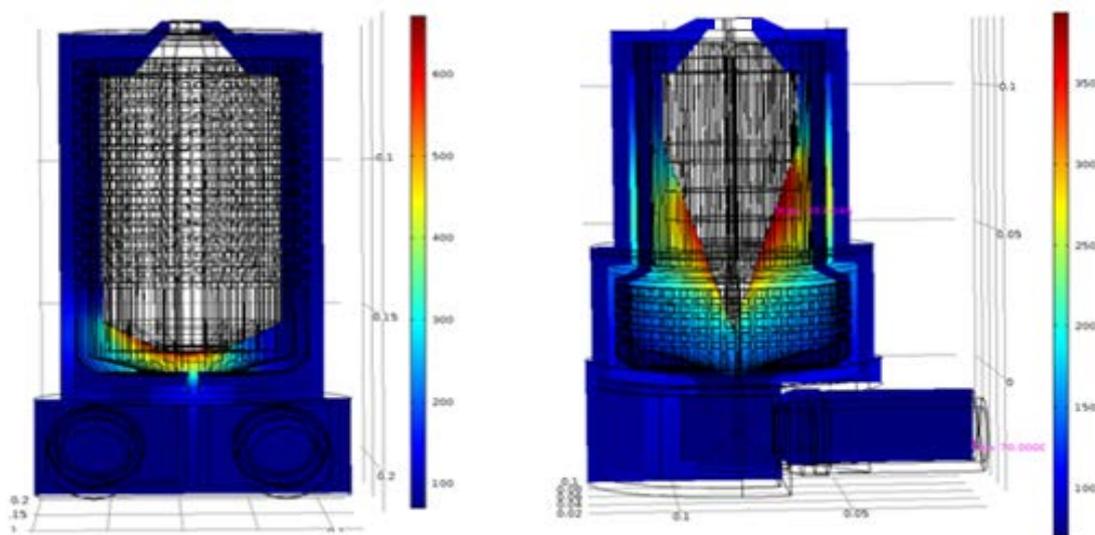


Рис.8 Распределение температуры в коллекторе, слева- коллектор до модернизации,справа- новый вариант исполнения коллектора.

В ходе проделанной работы по модернизации коллектора применены методы 3-х мерного моделирования распределения пучка в коллекторе. Уточнено распределение удельной мощности по внутренней поверхности тела коллектора. Произведен перерасчет температурного поля коллектора, а также гидродинамической задачи распределения охлаждающей жидкости. С помощью программы 3-х мерного моделирования произведена модернизация существующего коллектора. По данным расчета получили существенное снижение удельной мощности пучка, оседающего на коллектор, а также получили лучшие условия протекания охлаждающей жидкости в коллекторе.

С учетом всех доработок и модернизаций получили цепочку корректор – ЛБВ, отвечающую всем требуемым параметрам по полосе и мощности, а также проведенная работа позволила повысить надежность модернизируемых узлов, увеличить процент выхода годных приборов, а также завершить работу по разработке важнейшей радиоэлектронной системы для оборонного комплекса РФ.

#### Библиографический список

1. Konnov A.V., Malykhin A.V., V. Petenkova, Ruvinskiy G.V., Chernobay T.I., Sherbacov D.S., IVEC-IVESC 2006, transaction, Monterey,CA, pp 291-292.
2. Паницков В.И., Анализ теплового режима коллектора многолучевого клистрона с воздушным охлаждением/ В.И Паницков., И.С. Владыкина //Радиоэлектронника, электротехника и энергетика: Двадцать первая междунар. науч.-техн.конф. студентов и аспирантов: Тез.докл. В 4 т. Т.1/М.: Издательский дом МЭИ. 2015. - 244 с.
3. Андрианова Е.П., Науч.-техн. отчет № 14-9366 «Разработка СВЧ усилительных цепочек в трёх частотных диапазонах для наземных мобильных станций» / О.Н. Аристарховна, Е.А Ерпылева., С.В. Жарихин, Н.М. Коломийцева, Г.В. Рувинский, Б.В. Сазонов, Т.И. Чернобай, Е.М. Шипило.//2010.-108 с.