

УДК 621.372

В.К. Иванов<sup>1</sup>, Ю.В. Иванова<sup>2</sup>, А.О. Силин<sup>1</sup>, А.М. Стадник<sup>1</sup>, А.С. Фатеев<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков<sup>2</sup> Институт общей и неотложной хирургии АМН Украины, Харьков

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ КВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НА ВНУТРЕННИЕ ОРГАНЫ

Проблема разработки аппаратуры миллиметрового диапазона является актуальной как для научных экспериментов, так и для практических приложений в промышленности, медицине и технике. Использование в медицинской практике электромагнитного излучения данного диапазона может приводить к усилению процессов на клеточном уровне и, как следствие, подавлению проявлений послеоперационной патологии. В работе сформулированы требования и разработан действующий макет устройства для внутриполостного облучения, численно промоделирована работа облучателя, эффективность которого обеспечивается непосредственным контактом с облучаемым органом.

**Ключевые слова:** облучатель, диэлектрическая антенна, КВЧ-терапия.

### Введение

В последние десятилетия широко обсуждаются возможности электромагнитного излучения (ЭМИ) миллиметрового диапазона (с частотами 30-300 ГГц и интенсивностью менее 10 мВт/см<sup>2</sup>) в лечении различных заболеваний [1, 2].

В клинических исследованиях воздействия миллиметровых волн на организм на клеточном и органном уровнях были определены диапазоны частот для использования в медицинской практике: 4,9 мм (около 61 ГГц), 5,6 мм (около 54 ГГц) и 7,1 мм (около 42 ГГц), и время экспозиции, не превышающее 30 минут, которые не вызывают повреждающего воздействия на органы и ткани [3, 4].

Несмотря на широкое использование ЭМИ крайне высокой частоты (КВЧ) при различных заболеваниях в течение последних десятилетий, его применение сводится лишь к облучению активных биологических точек и зон. Однако при непосредственном облучении открытых органов животных была выявлена интенсификация процессов на клеточном уровне, приводящая к более быстрой ликвидации проявлений патологии [5]. Для решения возникающего при этом комплекса проблем необходимы как новые методики использования КВЧ ЭМИ, так и соответствующая аппаратура, в том числе интракорпоральные волноводы, позволяющие проведение КВЧ-терапии с сохранением целостности анатомических полостей.

**Целью** настоящей работы является разработка устройства для внутриполостного воздействия КВЧ ЭМИ.

### Основной материал

**Требования к устройству.** При разработке такого рода устройства должны решаться следующие задачи:

- возможность периодического введения излучателя через дренаж непосредственно к больному (прооперированному) органу в течение всего курса лечения;

- эффективность ввода энергии источника ЭМИ КВЧ в облучаемый орган, что обеспечивается согласованием выхода генератора КВЧ, с волноведущей структурой и облучателем в защитной оболочке из биоинертного материала, введенным поглощающую биоткань пациента;

- устройство должно быть выполнено в виде единого модуля с минимально возможными массогабаритными характеристиками, обеспечивающими, с одной стороны, удобство его применения для вышеуказанных целей, а с другой стороны, минимизирующими потери энергии ЭМИ КВЧ в волноведущем тракте.

**Общее описание устройства.** Предлагается устройство, состоящее из генератора КВЧ, волноводного перехода с прямоугольного поперечного сечения на круглое, отрезка круглого волновода и облучателя в защитной оболочке.

Генератор КВЧ должен обеспечивать необходимую мощность, подводимую к излучателю (не менее 40 мВт в непрерывном режиме) при малых габаритах и массе всего устройства, что может быть достигнуто только при использовании твердотельных источников. Генераторы на лавинно-пролетных диодах (ГЛПД) являются наиболее мощными и высокоэффективными источниками в миллиметровом диапазоне длин волн, обеспечивающими максимальный КПД и устойчивость непрерывных режимов генерации по сравнению с генераторами на диодах Ганна. Отсутствие жестких требований к спектральным характеристикам источника КВЧ дополнительно подчеркивает преимущество ГЛПД.

**Генератор на лавинно-пролетних диодах.** Анализ работ [6, 7], посвященных разработке и исследованию ГЛПД, показал, что в диапазоне частот от 30 ГГц до 100 ГГц предпочтительно использовать волноводные резонансные системы. Для согласования (трансформации) низкоомного сопротивления диода с высокоомным сопротивлением волновода стандартного сечения в качестве согласователя используются радиальные линии (диск, конус), размещенные в объеме резонатора. Такие радиально-волноводные резонаторы обеспечивают высокий коэффициент трансформации, что позволяет получить механическую перестройку частоты в пределах нескольких ГГц и необходимый уровень выходной мощности.

Разработан ГЛПД радиально-волноводной конструкции с использованием диода типа 2A743A-4 и 2A758A-4. Исследованы частотные и энергетические характеристики генератора в диапазоне 50-60 ГГц и определено влияние на них элементов конструкции резонатора

Конструкция разработанного ГЛПД представлена на рис. 1.

Резонансная система генератора представляет собой отрезок прямоугольного волновода 1 сечением  $3,6 \times 1,8$  мм, закороченный с одной стороны скользящим поршнем 2. По центру широкой стенки волновода расположены индуктивный металлический штырь 3 диаметром  $d$  с фильтром нижних частот и диод 4. Диод установлен на медном цилиндрическом столбике диаметром 3 мм и крепится в корпусе волновода при помощи цанги 5, с возможностью регулировки положения диода по высоте волновода, обеспечиваемой толкателем 6.

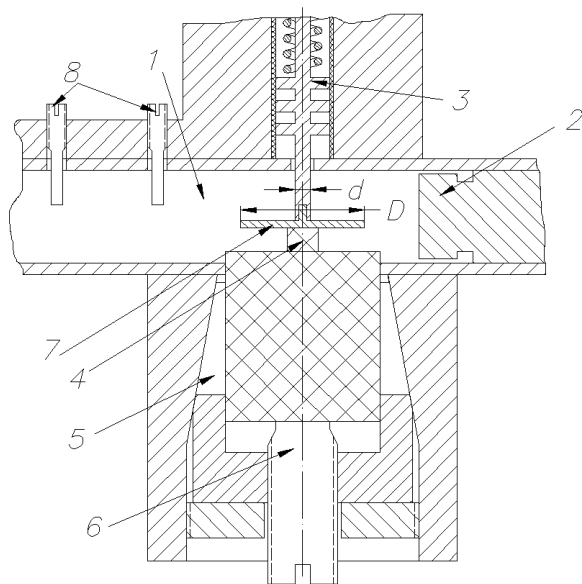


Рис. 1. Эскиз конструкции генераторной камеры: 1 – волновод, 2 – поршень, 3 – индуктивный штырь, 4 – диод, 5 – цанга, 6 – толкатель диода, 7 – диск, 8 – согласующие штыри

Между металлическим штырем 3 и диодом 4 располагается съемный тонкий диск 7 диаметром  $D$ . Питание по постоянному току подается через металлический штырь 3. Положение диска и его размеры влияют на частоту и мощность генерируемых колебаний. Для оптимального согласования генератора с нагрузкой в резонансной системе используется 8, отрезок волновода, в который через отверстия в широкой стенке вводятся два согласующих штыря, разнесенные между собой на нечетное количество четвертей длин волн.

Применение внутриволноводного открытого резонатора и дополнительных согласующих штырей позволило получить необходимый коэффициент трансформации активной компоненты нагрузки к диоду, который составляет значительную величину 50-100 [3]. Достижению максимальной выходной мощности генератора способствовало также применение фильтра нижних частот по цепи питания диода. Надежность контакта и постоянство давления между диском и диодом в диапазоне температур достигнуто за счет подпружинивания штыря 3.

В результате введения в конструкцию всех вышеуказанных элементов, подбора диаметра диска  $D$  и его положения в волноводе, достигнута выходная мощность 50 мВт при отстройке 3,4 ГГц от номинальной частоты 58,1 ГГц, на которой максимальная мощность составляла 100 мВт. В заданной области частот ( $\sim 54,7$  ГГц) реализованы энергетические параметры ГЛПД, близкие к максимальным, при высокой степени устойчивости стационарного режима относительно внешних возмущающих воздействий.

Устойчивость режимов СВЧ генерации обеспечивалась при токах ЛПД, равных 0,8-0,95 максимального рабочего значения, и последовательно включенном балластном резисторе 100 ом. Источник питания ГЛПД содержит последовательно включенные стабилизатор напряжения и стабилизатор рабочего тока ГЛПД. Крутизна электронной перестройки генератора составляет 50-60 МГц/мА. Уровень фазовых шумов при отстройке от несущей на 10 кГц составляет -60 дБ/Гц. Относительная кратковременная нестабильность частоты  $\sim 10^{-4}$ .

**Облучатель.** Представляет собой стержневую диэлектрическую антенну бегущей волны, которая запитывается круглым металлическим волноводом 1 (см. рис. 2) длиной около 200 мм с диаметром внутреннего сечения 3,6 мм и толщиной стенки 0,2 мм, подсоединенным к фланцу генератора через плавный волноводный переход с прямоугольного сечения  $3,6 \times 1,8$  мм на круглое, обеспечивающий возбуждение в волноводе только волны основного типа  $H_{11}$ . В открытый конец волновода плотно вставлен стержень 2 из фторопласта, имеющий конусообразные сужения с обеих сторон. Вся конструкция помещена в защитную оболочку (дренаж) 3 из ПВХ внутренним диаметром 4 мм и толщиной стенки 0,7 мм.

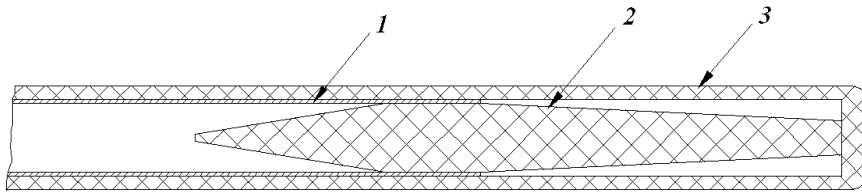


Рис. 2. Облучатель: 1 – волновод, 2 – диэлектрический стержень, 3 – дренаж

В диэлектрической антенне возбуждается волна типа  $HE_{11}$ , сходная по своей структуре с волной  $H_{11}$  в круглом волноводе, но отличающаяся от нее тем, что электромагнитное поле существует и во внешнем пространстве в виде поверхностной волны [8, 9]. В воздухе такая антенна излучает основную часть энергии вдоль своей оси.

В работе [10] устройство для внутриволостного воздействия КВЧ ЭМИ содержит антенну в виде цилиндрического диэлектрического стержня, на который насажены через определенные промежутки кольца из диэлектрика с большей диэлектрической проницаемостью. Такая антенна имеет главный максимум излучения в перпендикулярном к оси направлении и слабое излучение вдоль оси.

Однако ее конструкция не предусматривает непосредственный контакт излучающих поверхностей с облучаемыми участками тканей (участки стержня, где находятся кольца, практически не излучают, а все излучение происходит с участков стержня в промежутках между кольцами). К тому же, дополнительные кольца существенно увеличивают диаметр антенны, а упомянутое в обосновании прототипа понятие главного максимума излучения применимо только для характеристики поля антенны в дальней зоне, и вопрос равномерного облучения участков ткани вблизи поверхности антенны остается открытым.

Как следствие, такая антенна может быть использована только для введения в относительно большие воздушные полости в организме, что ограничивает область ее применения и снижает эффективность воздействия. Кроме того, для согласования антенны с источником ЭМИ должны быть приняты дополнительные меры, о которых ничего не сказано в [10].

Поэтому в разработанном в статье устройстве форма и размеры диэлектрического стержня подобраны так, чтобы коническое сужение стержня внутри волновода обеспечивало минимальное отражение энергии в сторону генератора при возбуждении антенны на рабочей частоте, а внешнее сужение – плавное приближение фазовой скорости волны к скорости света в свободном пространстве, минимизируя отражения от конца стержня.

Тонкая защитная оболочка лишь незначительно искажает поле антенны, размеры которой оконча-

тельно оптимизируются с помощью компьютерного моделирования. При введении такого облучателя в мышечную ткань пациента, которая является средой с большей диэлектрической проницаемостью и значительным поглощением (приблизительно диэлектрические параметры на рабочей частоте были приняты следующими:  $\epsilon' = 25$ ;  $\text{tg}\delta = 1$ ), происходит резкое увеличение части энергии, высвечивающейся через боковую поверхность стержня в такую среду и поглощающуюся в ней.

Как следствие, происходит значительное спадание плотности потока мощности к концу стержня, а значит, и долей энергии, излучаемой в осевом направлении и отраженной обратно к генератору.

Для пояснения на рис. 3, 4 приведены рассчитанные распределения плотностей потока мощности в антенне, находящейся соответственно в воздухе и в среде с указанными выше диэлектрическими параметрами. Распределения приведены в децибелах по отношению к  $1 \text{ V} \cdot \text{A} / \text{m}^2$  при подводимой к антенне мощности  $1 \text{ W}$ .

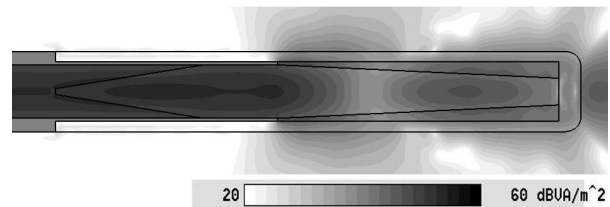
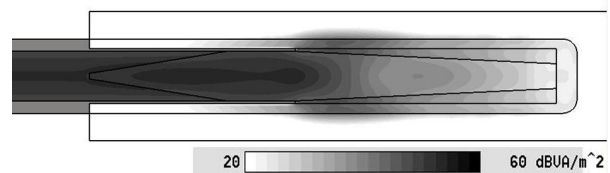


Рис. 3. Распределение плотности потока мощности (облучатель в воздухе, результаты моделирования)

Рис. 4. Распределение плотности потока мощности (облучатель в среде с  $\epsilon' = 25$ ;  $\text{tg}\delta = 1$ , результаты моделирования)

В обоих случаях на рабочей частоте имеет место эффективное согласование облучателя с генератором. Как показано на рис. 5, коэффициент стоячей волны напряжения (КСВН) не превышает

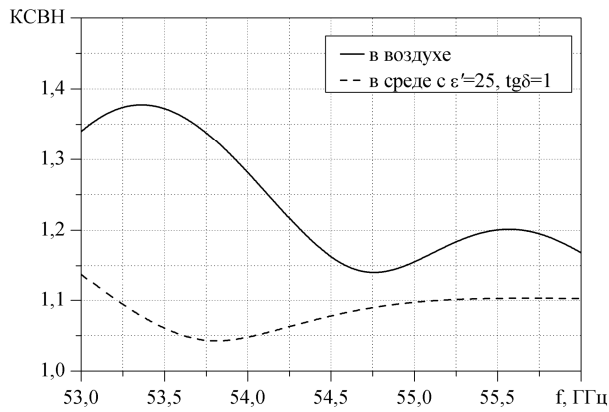


Рис. 5. Частотна залежність согласования облучателя в двух случаях (результаты моделирования)

значения 1,3, что позволяет обойтись без дополнительных развязывающих элементов и, тем самым, уменьшить габариты и массу устройства

С помощью компьютерного моделирования было также получено распределение поглощаемой

мощности в элементах облучателя и в окружающей его мышечной ткани.

На рис. 6 оно приведено в логарифмическом масштабе с нормировкой на уровень подводимой к облучателю мощности 1 W.

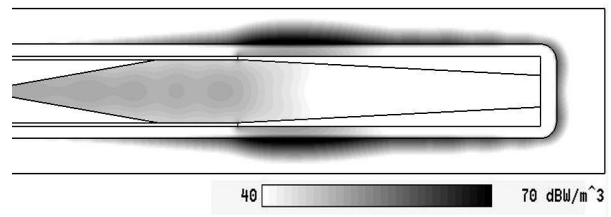


Рис. 6. Распределение удельной поглощаемой мощности при введении облучателя в мышечную ткань (результаты моделирования)

Внешний вид макета разработанного устройства приведен на фото (рис. 7). Дополнительно в конструкцию устройства входят направленный ответвитель и детекторная секция для контроля мощности, подводимой к облучателю.

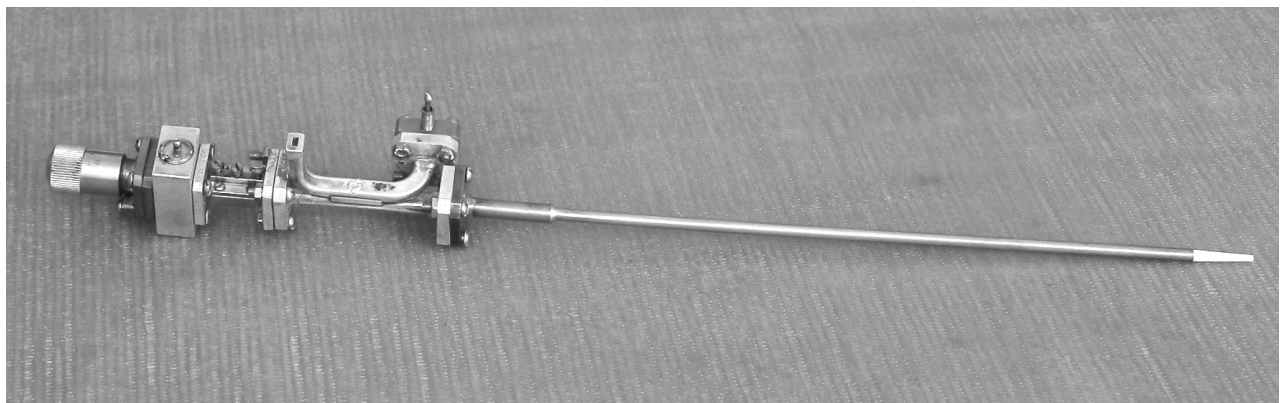


Рис. 7. Внешний вид разработанного устройства (облучатель без защитной оболочки)

**Режимы облучения.** Для послеоперационной КВЧ-терапии в Институте общей и неотложной хирургии АМН Украины были разработаны 3 режима облучения, в зависимости от доминирующей микрофлоры. При преимущественном выявлении грамположительной микрофлоры проводили ежедневные сеансы ЭМИ с частотой 61,2 ГГц (длина волны 4,9 мм) в течение 30 мин со 2-х послеоперационных суток в течение 10 – 14 дней в зависимости от динамики изменений патологического очага. При наличии нескольких зон поражения выполняли 2 сеанса в течение суток (1 утром и 1 вечером) по 30 мин каждый. При обнаружении преимущественно грамотрицательной и грибковой микрофлоры выполняли ежедневные сеансы КВЧ облучения с частотой 54,7 ГГц (длина волны 5,6 мм) с аналогичными временными параметрами.

Выявление при бактериологическом исследовании смешанной микрофлоры диктовало необхо-

димост ь использования комбинированного режима облучения с 2-мя частотными характеристиками – 54,7 ГГц и 61,2 ГГц, по 30 минут каждый. При наличии одного патологического очага проводили 2 сеанса (1 утром и 1 вечером), наличие же нескольких очагов диктовало необходимость выполнения 2-х сеансов по 30 минут утром и 2-х сеансов вечером.

При этом в пределах одного сеанса подразумевалось облучение разных очагов ЭМИ с разными частотными характеристиками. Это обусловлено тем, что облучение различных очагов ЭМИ с одинаковыми частотными характеристиками более 30 мин может привести к нежелательным стрессовым реакциям макроорганизма.

Использование ЭМИ миллиметрового диапазона с оптимальными частотными характеристиками позволяет в определенной мере решить проблему антибактериальной резистентности, что, несомненно, может улучшить результаты лечения.

## Выводы

В работе обоснована и разработана конструкция устройства для облучения ЭМИ КВЧ оперативно открытых внутренних органов, эффективность которого достигается непосредственным контактом облучателя с облучаемым органом.

Оптимизированная с помощью численного моделирования конструкция облучателя обеспечивает его хорошее согласование с генератором КВЧ как при наличии непосредственного контакта с биотканью, так и при его отсутствии, что позволяет обойтись без дополнительных развязывающих устройств и, тем самым, повысить компактность устройства и уменьшить его стоимость.

## Список литературы

1. Трезуб Т.В. Патогенетичне обґрунтування застосування електромагнітних хвиль міліметрового діапазону в комплексному лікуванні хворих на виразкову хворобу дванадцятипалої кишки на госпітальному етапі: Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. мед. наук: спец. 14.01.33 "Медицина реабілітація, фізіотерапія та курортологія" / Т.В. Трезуб. – О., 2007. – 21 с.
2. Брискин Б.С. Использование миллиметровой волновой терапии в лечении острого панкреатита / Б.С. Брискин, В.Н. Бужатко // Вестник хирургии им. И.И. Грекова. – 2003. – Т. 162, №4. – С. 22-25.
3. Зависимость биологических эффектов электромагнитного излучения миллиметрового диапазона от его параметров / Н.П. Карева, А.В. Ефремов, М.И. Лосева [и др.] // Патологическая физиология и экспериментальная терапия. – 2007. – №3. – С. 24-26.
4. Оранский О.Е. КВЧ-терапия: проблемы и перспективы / О.Е. Оранский, В.Ю. Гуляев // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физкультуры. – 2003. – №1. – С. 46-48.

5. Яшин М.А. Пути повышения эффективности высокочастотной терапии: эксперименты по облучению оперативно открытых органов животных / М.А. Яшин, Т.Н. Субботина // Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы: Всероссийская науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов: Тезисы докладов. – Р., 1998. – С. 57-58.

6. Касаткин Л.В. Эквивалентная схема высокочастотной цепи ГЛПД с внутриволноводным открытым резонатором / Л.В. Касаткин, П.П. Лошицкий // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. – 1974. – № 6.

7. Архипов А.В. Исследование частотных и энергетических характеристик ГЛПД радиально-волноводной конструкции / А.В. Архипов, С.П. Белецкая // Республиканский межведомственный НТ сборник «Радиотехника». – 1981. – Вып. 58. – С. 70-72.

8. Лобкова Л.М. Проектирование антенн и устройств СВЧ: Учеб. пособие для вузов / Л.М. Лобкова. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2002. – 178 с.

9. Айзенберг Г.З. Антенны УКВ. В 2-х ч. / Г.З. Айзенберг, В.Г. Ямпольский, О.Н. Терещин; под ред. Г.З. Айзенберга. ч.2. – М.: Связь, 1977. – 288 с.

10. Пат. 2262362 Российская Федерация, МПК А61N5/02. Устройство для внутрисполостного воздействия КВЧ ЭМИ / Якунин В.В., Медведев Г.В., Попов В.Б.; Заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Производственное объединение "Старт". – № 2003123752/14; заявл. 28.07.03; опубл. 20.10.05, Бюл. № 23. – 3 с.: ил. 1.

Поступила в редколлегию 22.06.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Д. Карлов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ПРИСТРІЙ ДЛЯ ДІЇ КВЧ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ НА ВНУТРІШНІ ОРГАНИ

В.К. Иванов, Ю.В. Иванова, О.О. Сілін, О.М. Стадник, О.С. Фатєєв

Проблема розробки апаратури міліметрового діапазону видається актуальною як для наукових експериментів, так і для практичних застосувань у промисловості, медицині та техніці. Використання у медичній практиці електромагнітного випромінювання даного діапазону може призводити до посилення процесів на клітковому рівні і, як наслідок, пригніченню проявів післяопераційної патології. У роботі сформульовані вимоги та розроблений діючий макет пристрою для внутрішнього порожнинного опромінювання, чисельно промодельована робота опромінювана, ефективність якого забезпечується безпосереднім контактом з органом, що опромінюється.

**Ключові слова:** опромінювач, діелектрична антена, КВЧ-терапія.

## EQUIPMENT FOR EHF ELECTROMAGNETIC IRRADIATION OF INTERNAL ORGANS

V.K. Ivanov, Yu.V. Ivanova, O.O. Silin, O.M. Stadnyk, O.S. Fateev

The problem of development of EHF equipment is relevant for both scientific experiments and applications in industry, medicine and engineering. The use of millimeter range electromagnetic radiation in medical treatment can result in enhancement of processes at cell level, and, as a consequence, in suppression of manifestations of post-operational pathology. In the paper, requirements are formulated and working equipment model for endocavitary irradiation is developed. The functionality of applicator is simulated, efficiency of which is ensured by direct contact with the irradiated organ.

**Keywords:** applicator, dielectric antenna, EHF therapy.