

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 533.9.07

**СВЧ-КОМПЛЕКС ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРИ АТМОСФЕРНОМ
ДАВЛЕНИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ**

© 2023 г. С. А. Горбатов^{а,*}, Д. И. Петрухина^а, А. В. Тихонов^а,
В. Н. Тихонов^а, И. А. Иванов^а

^а *Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии
Россия, 249032, Обнинск Калужской обл., Киевское шоссе, 109-й км*

**e-mail: gorbatovsa004@gmail.com*

Поступила в редакцию 26.01.2023 г.

После доработки 07.02.2023 г.

Принята к публикации 06.03.2023 г.

Представлен универсальный аппаратный комплекс для генерации традиционной низкотемпературной плазмы и двух типов нетермальной плазмы атмосферного давления. Основой комплекса является малобюджетный магнетронный СВЧ-генератор, применяемый в СВЧ-печах бытового и промышленного назначения. В модельных опытах с культурами микроорганизмов подтверждены биоцидные свойства генерируемой аргоновой нетермальной плазмы. Установлены стерилизующие свойства плазмы при обработке поверхности семенного материала.

DOI: 10.31857/S0032816223050282, **EDN:** NBQZKP

В настоящее время в перспективных, бурно развивающихся областях науки, промышленности, медицины и сельского хозяйства остро ощущается потребность в простых, надежных и недорогих источниках низкотемпературной плазмы. Они нужны как для научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по новым материалам и технологиям, так и для интенсификации и модернизации уже отработанных “классических” технологических процессов.

Традиционные генераторы плазмы, такие как электродуговые, высокочастотные и микроволновые плазмотроны, производят плазму с рабочими температурами от нескольких тысяч до десятков тысяч градусов Цельсия. Такая плазма относится к низкотемпературной плазме, в отличие от высокотемпературной “горячей” плазмы, используемой в термоядерных работах, где температура измеряется миллионами градусов Цельсия. Данное разделение обусловлено важностью использования высокотемпературной плазмы в решении глобальной проблемы управляемого термоядерного синтеза [1]. За последние два десятилетия научно-техническим сообществом были предприняты значительные усилия по разработке, поддержанию и использованию так называемой атмосферной нетепловой плазмы (АНТП), в которой температура ионов и нейтральных компонентов остается близкой к комнатной [2]. Это позволяет использовать такую нетепловую плазму для низкотемпературной плазмохимии и

для обработки термочувствительных материалов, в том числе полимеров и биологических тканей [3].

Уникальные свойства АНТП – сильная термодинамическая неравновесность, низкая температура газа, наличие химически активных радикалов и высокая селективность – обеспечивают огромный потенциал для использования источников “холодной” плазмы в широком спектре приложений.

Целью данной работы является представление универсального аппаратного комплекса, предназначенного для генерации как традиционной низкотемпературной плазмы, так и двух типов АНТП для лабораторного и промышленного применения. Основой комплекса является малобюджетный магнетронный СВЧ-генератор с частотой 2.45 ГГц с высоковольтным блоком питания, построенный на магнетронах, трансформаторах и конденсаторах, применяемых в СВЧ-печах бытового и промышленного назначения [4]. Выходная мощность СВЧ-генератора может изменяться дискретно от 0.5 до 3 кВт. На рис. 1 представлены принципиальная схема и общий вид узлов и блоков одного из множества возможных вариантов комплектации аппаратного комплекса [5].

В представленную комплектацию аппаратного комплекса входят высоковольтный источник питания 1, СВЧ-генератор 2, комплект сменных элементов волноводного тракта 3, водяная нагрузка 4, кабельная сборка 50 Ом (5) и аппликатор АНТП (6).

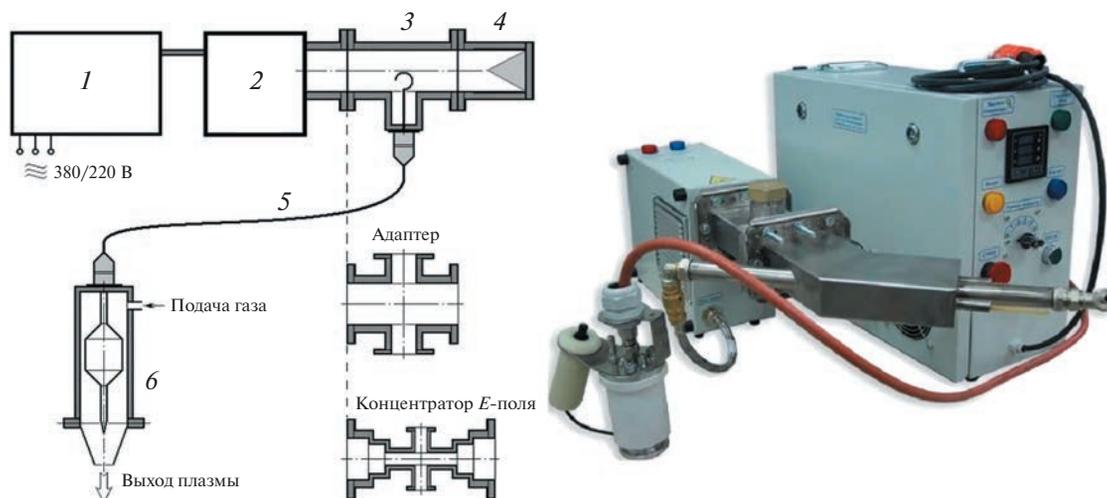


Рис. 1. Слева – принципиальная схема компонентов и блоков, справа – общий вид аппаратного комплекса. 1 – высоковольтный источник питания; 2 – СВЧ-генератор; 3 – комплект сменных элементов волноводного тракта; 4 – водяная нагрузка; 5 – кабельная сборка 50 Ом; 6 – аппликатор АНТП.



Рис. 2. Простой СВЧ-плазмотрон на стандартной резьбовой латунной арматуре.

Основные элементы волноводной системы сечением $90 \times 45 \text{ мм}^2$ выполнены из немагнитной нержавеющей стали с размерами фланцев по стандарту WR-340. Волноводный тракт обычно нагружается на конечную широкополосную водяную нагрузку, а между выходом СВЧ-генератора и нагрузкой могут быть размещены элементы волноводного тракта из следующего набора: СВЧ-плазмотрон классической компоновки на основном типе H_{01} -колебания в волноводе, построенном на основе стандартной резьбовой нержавеющей стали и латунных фитингов для металлических труб [5] (рис. 2). Водяное охлаждение экранирующей трубы или всего участка волновода создает возможности для реализации длительных технологических процессов.

Разветвитель индуктивного типа представляет собой петлю связи, расположенную на узкой стенке волновода. Конструкция ответвителя позволяет изменять величину связи за счет поворота плоскости шлейфа, нагруженного на коаксиальный разъем N-типа. Возможна комбинация в одном узле ответвителя и микроволнового плазмотрона (рис. 3а).

Концентратор электронного поля может быть выполнен в виде ступенчатой конструкции или с плавным изменением сечения волновода для увеличения напряженности электрического поля в зоне расположения СВЧ-плазмотрона (рис. 3б). Сужение волновода может быть симметричным или односторонним.

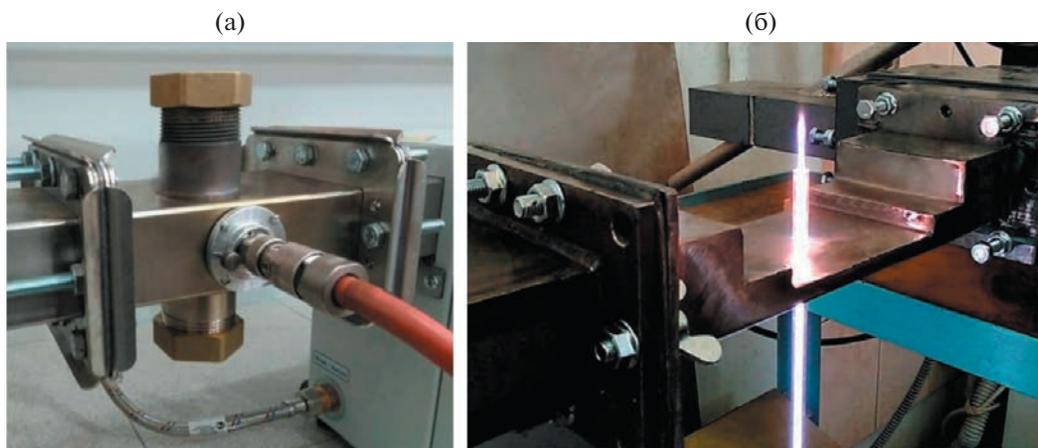


Рис. 3. Делитель индуктивного типа (а) и концентратор электрического поля (б).

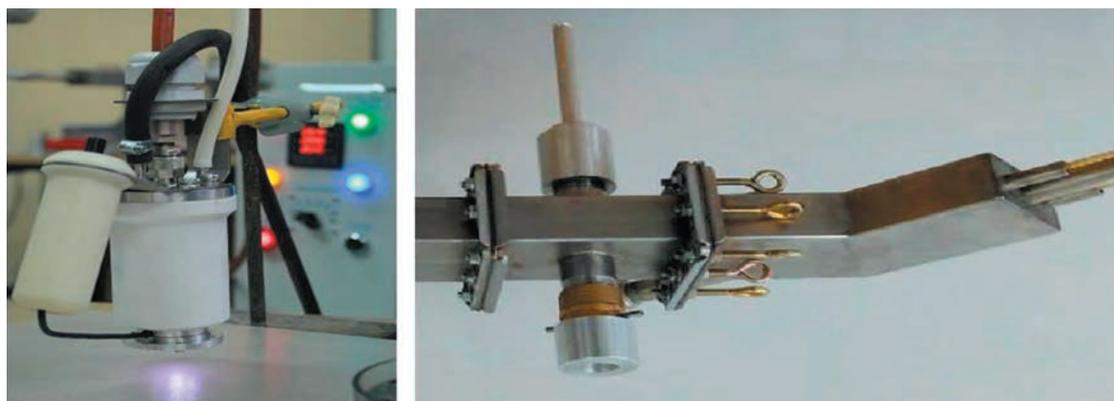


Рис. 4. Два типа аппликаторов АНТП.

Конструкция одного из видов аппликатора АНТП показана на рис. 4 (слева). Корпус плазменного реактора и радиатор воздушного охлаждения изготовлены из алюминиевого сплава. Защитный корпус аппликатора изготовлен из тефлона. Разъем кабеля N-типа расположен на крышке аппликатора. Патрубок подачи рабочего газа (аргона) и два штуцера для шлангов системы принудительного воздушного охлаждения реактора также расположены на крышке аппликатора. На рис. 4 (справа) показан другой тип источника АНТП. В основе его конструкции лежит жесткий волноводно-коаксиальный переход, что заметно снижает подвижность источника, но значительно упрощает и удешевляет конструкцию. Здесь же показана подключенная к нему справа согласованная волноводная нагрузка.

Помимо описанных выше, в конструкции могут быть использованы следующие элементы волноводного тракта: СВЧ-плазмотрон на основе трехдецибелного моста, источник АНТП с использованием барьерного СВЧ-разряда в трех

конфигурациях, а также ряд других. Для расширения технических и технологических возможностей аппаратный комплекс может быть дополнительно укомплектован СВЧ-циркулятором, бесконтактным волноводным закорачивающим плунжером и полосковыми направленными ответвителями для измерения падающей и отраженной волн.

В проведенных экспериментах были подтверждены биоцидные свойства нетермальной аргонной плазмы, генерируемой разработанным источником. В модельных опытах с культурами микроорганизмов, выращиваемых на питательной среде в лабораторных условиях, были зафиксированы зоны подавления роста в местах воздействия нетермальной плазмы. Ингибирующая активность была подтверждена на микроорганизмах разных групп, таких как лактобациллы и фитотфтора. Данные микроорганизмы были выделены нами с продуктов питания и сельскохозяйственного сырья.

Были установлены стерилизующие свойства плазмы при обработке поверхности семенного

Таблица 1. Поверхностное и внутреннее загрязнение зерен ячменя на различных средах

Вид загрязнения	Микробиологическая среда				
	МПА	Среда Сабуро	КСА	Среда Чапека	Агар с бенгальским розовым
Поверхностное загрязнение, КОЕ	2500 ± 34	500 ± 12	0	50 ± 3	100 ± 15
Внутреннее загрязнение, КОЕ	27350 ± 117	5750 ± 51	0	50 ± 5	4900 ± 50

материала. Опыт проводился на созданной установке по генерации нетермальной атмосферной плазмы с использованием газового концентратора [6]. В качестве рабочего газа использовался аргон. Расход газа составлял 5 л/мин, температура газа на выходе была 25°C.

Объектом исследования служил ячмень (*Hordeum vulgare* L.) ярового сорта Владимир 2018 г. Параметры (ГОСТ 12038-847) исследуемых семян: энергия прорастания – 96%; лабораторная всхожесть – 100%. Фитосанитарное состояние (ГОСТ 12044-93): распространенность болезней *Helminthosporium*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Aspergillus* составила 75 ± 12%; 1 ± 1%; 0%; 6 ± 6%; степень поражения составила 25 ± 5%, 0%, 0%, 2 ± 2% соответственно. Бактериальную обсемененность посадочного материала исследовали согласно ГОСТ 12044-93 “Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения зараженности болезнями”. Следует обратить внимание на то, что внутреннее загрязнение практически на порядок выше, чем поверхностное как для мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов, так и для плесневых грибов и дрожжей (табл. 1).

После обработки плазмой семян востребованных сельскохозяйственных культур на их поверхности наблюдали кратное снижение количества бактерий, дрожжей и плесневых грибов. Кроме того, представляется интересным исследовать

возможное изменение морфометрических и биохимических показателей растений ячменя в ответ на однократное воздействие нетермальной плазмы. Поскольку эффекты воздействия низкотемпературной плазмой атмосферного давления на сельскохозяйственные растения недостаточно исследованы, данные результаты по изучению у растений ячменя ответных реакций на действие низкотемпературной плазмы в различные этапы органогенеза представляются интересными с целью повышения урожайя и качества продукции в хозяйствах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том 2 / Под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука/Интерпериодика, 2000.
2. Nehra V., Kumar A., Dwivedi H.K. // Int. Journal of Engineering. 2008. V. 2. № 1. P. 53.
3. Misra N.N., Schlüter O., Cullen P.J. Cold plasma in food and agriculture: fundamentals and applications. London: Academic Press, 2016.
4. Тихонов В., Иванов И., Крюков А., Тихонов А. // Прикладная физика. 2015. № 5. С. 102.
5. Ivanov I., Tikhonov V., Tikhonov A. // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1393. P. 012042. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1393/1/012042>
6. Тихонов В.Н., Тихонов А.В., Иванов И.А., Горбатов С.А. Патент РФ № 208093 // Опубл. 01.12.2021. Бюл. № 34.