

*НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА ИМЕНИ А. В. ЛЫКОВА*

# *ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ И СООБЩЕНИЙ*

*XVI Минский международный форум по тепло- и массообмену  
XVI Minsk International Heat and Mass Transfer Forum  
16–19 мая 2022 г.*

*Научное электронное издание*

*Минск 2021*

УДК 536.24

Издание представляет собой сборник расширенных тезисов докладов и сообщений XVI Минского международного форума по тепло- и массообмену.

Сборник содержит тезисы докладов и сообщений по конвективно-радиационному теплообмену (секция № 1), тепломассопереносу при фазовых и химических превращениях (секция № 2), тепломассопереносу в энергетике и технологических процессах (секция № 3), тепловым и транспортным процессам в системах с нано- и микроструктурами (секция № 4), высокотемпературному тепломассопереносу, плазменным системам и технологиям (секция № 5), тепломассопереносу в процессах синтеза новых материалов (секция № 6), терморегулированию оптических и электронных систем (секция № 7), моделированию и управлению процессами тепломассопереноса (секция № 8).

Редакционная коллегия:

академик НАН Беларуси	О. Г. Пенязьков
чл.-корр. НАН Беларуси	В. М. Асташинский
чл.-корр. НАН Беларуси	П. С. Гринчук
чл.-корр. НАН Беларуси	Н. В. Павлюкевич
доктор техн. наук	П. В. Акулич
доктор техн. наук	Л. Л. Васильев
доктор физ.-мат. наук	О. С. Рабинович
доктор физ.-мат. наук	А. С. Сметанников
канд. физ.-мат. наук	А. Д. Чорный
канд. физ.-мат. наук	С. А. Филатов
канд. физ.-мат. наук	С. И. Шабуня
канд. физ.-мат. наук	А. И. Шнип

Рецензенты:

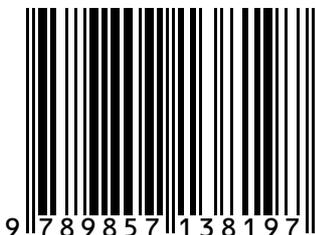
чл.-корр. НАН Беларуси	В. М. Асташинский
доктор техн. наук	А. В. Акулич

URL: [https://www.itmo.by/conferences/abstracts/?ELEMENT\\_ID=20225](https://www.itmo.by/conferences/abstracts/?ELEMENT_ID=20225)

URL: <https://www.itmo.by/conferences/abstracts/mif-16/mif16.pdf>

Дата доступа: 30.12.2021 г.

ISBN 978-985-7138-19-7



© Институт тепло- и массообмена  
имени А. В. Лыкова НАН Беларуси,  
2021

6. Татаринова Л. И. Структура твердых аморфных и жидких веществ. М.: Наука, 1983. – 152 с.
  7. Панфилович К. Б. Усманов А. Г. Обобщение опытных данных по излучению чистых полированных металлов // Межвуз. сб. науч. тр. Казан. хим. технол. ин-та. 1981. С. 63.
  8. Шварев К. М., Байтураев С. Х., Баум Б. А. Интегральная излучательная способность сплавов системы Ni-Al в твердом и жидком состоянии // ИФЖ. 1983. Т. 44, № 2. С. 322–323.
  9. Шварев К. М., Байтураев С. Х., Баум Б. А. Интегральная излучательная способность сплавов системы железо – алюминий при высоких температурах // ИФЖ. 1984. Т. 45, № 3. С. 823–828.
  10. Сагадеев В. В. Тепловое излучение жидких сплавов алюминия, меди и висмута // Проблемы энергетики. 2005. № 11-12. С. 10–17.
  11. Сагадеев В. В. Тепловое излучение бинарных жидких сплавов на основе кадмия // Проблемы энергетики. 2006. № 7-8. С. 29–35.
- 

УДК 537.523.9

## **О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА С ВОДНОРАСТВОРНЫМ КАТОДОМ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МОЩНОГО ПОТОКА ПАРОВОДЯНОЙ ПЛАЗМЫ**

**Г. Х. Тазмеев<sup>1</sup>, Б. А. Тимеркаев<sup>2</sup>, Х. К. Тазмеев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия*

<sup>2</sup>*Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А. Н. Туполева, г. Казань, Россия*

Газовые разряды с жидкими электролитными электродами обладают большими возможностями для практических приложений. Традиционно они используются в технологиях обеззараживания воды, синтезе различных функциональных материалов, плазменной активации жидких реагентов. Области их применения продолжают расширяться. В сильноточных режимах в плазменный столб поступает значительное количество вещества из жидкого катода. Разряд горит в парогазовой среде. Появляется возможность создания плазменного потока, приемлемого для энергоемких технологий. К примеру, в работе [1] показана приемлемость газового разряда с жидким электролитным катодом для переработки отходов полимерных материалов. Однако способы формирования мощных плазменных потоков в газовых разрядах с жидкими электролитными электродами еще далеки от совершенства. Возникают вопросы, связанные с выбором электролита, конструктивным исполнением генератора плазмы, вводом реагентов в плазму и т. д. Экспериментальные исследования, результаты которых представляются в данной работе, были направлены на решение этих вопросов.

*К выбору электролита.* При длительном горении разряда водный раствор, используемый в качестве жидкого электролитного катода, убывает. Требуется дополнительное количество водного раствора. В простейшем варианте вместо раствора можно добавить дистиллированную воду. Этот вариант был изучен на опытах. Суть опытов заключалась в следующем. В гидросистеме объем водного раствора поддерживался постоянным ( $V_s = \text{const}$ ). Дистиллированная вода добавлялась в непрерывном режиме. После добавления определенного количества воды, отбиралась проба и измерялась удельная электрическая проводимость водного раствора.

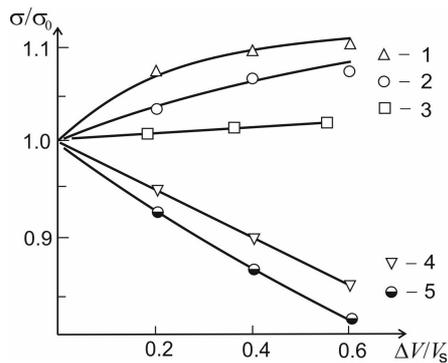


Рис. 1. Изменение электрической проводимости водных растворов: 1 – 0.1M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 2 – 0.1M KCl; 3 – 0.1M NaCl; 4 – 0.1M NaOH; 5 – 0.1M KOH

На рис. 1 представлены полученные результаты для различных водных растворов. Они приготовлены с одинаковыми концентрациями. По осям отложены относительные величины. По горизонтали – отношение количества дистиллированной воды к полному объему водного раствора. По вертикали – отношение удельной электрической проводимости к ее первоначальному значению. Это отношение для разных электролитов меняется по-разному: для некоторых убывает, а для других возрастает. В случае водного раствора хлорида натрия меняется незначительно. Исходя из этого в качестве электролита был выбран водный раствор хлорида натрия.

*К выбору концентрации водного раствора.* Вольтамперные характеристики разряда (ВАХ) получились возрастающими. Причем, крутизна менялась в зависимости от концентрации электролита. Чем меньше концентрация, тем круче получалась ВАХ. С практической точки зрения такая ВАХ является очень хорошим свойством разряда, так как повышается устойчивость горения и отпадает необходимость балластного резистора в цепи электрического питания. Соответственно, уменьшаются потери энергии. Опыты показали, что разряд горит устойчиво при тех концентрациях, при которых удельная электрическая проводимость менее 20 мСм/см.

В случае использования водных растворов с малыми концентрациями разряд переходил в режим горения с контрагированными каналами. При появлении таких каналов ток резко возрастал. Опять возникла необходимость балластного резистора. Экспериментально было установлено, что для работы без резистора концентрация водного раствора хлорида натрия должна быть в пределах от 0.05 до 0.2 моль/л.

*К ориентации потока плазмы в пространстве.* В классическом варианте жидкий катод располагается внизу, а твердотельный анод устанавливается над катодом. Разряд между катодом и анодом горит в вертикальном направлении. Плазменный поток идет от жидкого катода вверх. Такая конфигурация разряда затрудняет формирование плазменного потока в других направлениях. Требуется технические решения, которые позволяют формировать другую геометрию разряда. В данной работе задача решена применением пористой вставки на катоде. На рис. 2 представлены мгновенные фотографии плазменных потоков, идущих в разных направлениях от катода.

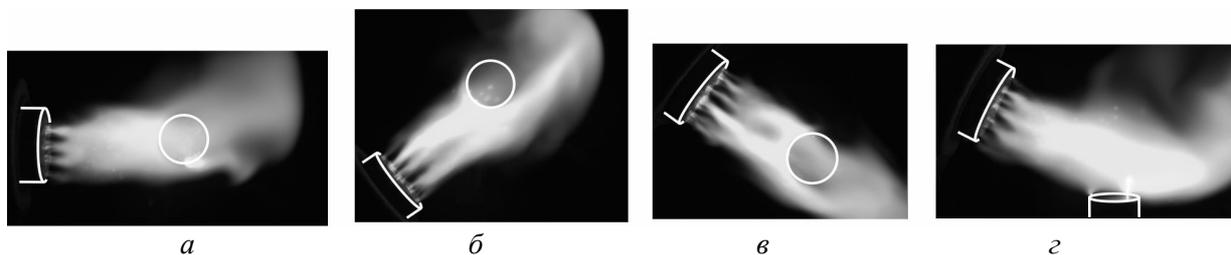


Рис. 2. Плазменные потоки, идущие от катода горизонтально (а), под углом вверх (б), под углом вниз (в) и вниз на торец анода (г). Белыми линиями обозначены контуры пористой вставки (диаметр 40 мм) и анода (медный стержень с диаметром 25 мм). Ток разряда 9 А. Межэлектродное расстояние 6 см.  $\sigma = 15$  мСм/см

Электрическое питание подавалось от выпрямителя с выходным напряжением 1700 В. Регулирование тока осуществлялось ступенчатым изменением балластного резистора. Поток электролита через пористую вставку в диапазоне токов 7-12 А составлял 5-8 мл/с.

Наиболее подходящим электролитом для длительного горения газового разряда является водный раствор хлорида натрия. Его концентрация должна быть в пределах 0.05 до 0.2 моль/л. Используя пористую вставку на катоде, можно получить плазменные потоки в разных направлениях в пространстве.

### Литература

1. Фридланд С. В., Тазмеев А. Х., Мифтахов М. Н. Получение синтез-газа плазмохимической переработкой полимерных отходов // Вестн. Казанского технол. ун-та. 2006. № 6. С. 10–15.

УДК 537.87+533.95

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ПЛАЗМЫ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ ГИПЕРЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ

А. В. Тетерев<sup>1,2</sup>, А. С. Сметанников<sup>2</sup>, Л. В. Рудак<sup>1</sup>, Н. И. Мисюченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, г. Минск

<sup>2</sup>Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск

**Введение.** Распространение электромагнитного излучения в среде приводит к его преобразованию вследствие взаимодействия со средой, что обусловлено такими явлениями, как рассеяние, поглощение и отражение падающего излучения. Для расчета прохождения электромагнитных волн через среду необходимо знать ее диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$ , которая зависит от частоты этой волны  $\omega$  и термодинамических параметров среды. При обтекании тела гиперзвуковым потоком воздуха вокруг него возникает плазменная область со сложным пространственным распределением термодинамических параметров, для определения которых необходимо решить систему уравнений газовой динамики с учетом реальных свойств среды. Затем необходимо найти ионизационный состав плазмы, т. е. распределения концентрации электронов, атомов и ионов в пространстве вокруг тела. Рассчитав среднюю частоту столкновений электронов с атомами и ионами, можно определить поля диэлектрической проницаемости. Далее, зная распределение диэлектрической проницаемости в плазме, можно рассмотреть прохождение электромагнитных волн и найти величины коэффициентов отражения, поглощения и рассеяния излучения [1].

**Модель образования плазменных областей и расчета их радиофизических свойств.** Математическая модель, описывающая течение газовых потоков вокруг тела, движущегося поступательно с ускорением  $\mathbf{a}$  в системе координат, связанной с телом, представляет собой систему газодинамических уравнений, которая в эйлеровой формулировке имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) &= 0, \\ \frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) &= -\nabla p + \rho \vec{g} - \rho \vec{a}, \\ \frac{\partial \left[ \rho \left( \epsilon + \frac{u^2}{2} \right) \right]}{\partial t} + \nabla \left[ \rho \vec{u} \left( \epsilon + \frac{u^2}{2} \right) + p \vec{u} \right] &= \nabla \lambda \nabla T. \end{aligned} \quad (1)$$