

---



---

**КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ  
В ПЛАЗМЕ**


---



---

УДК 537.525.99

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАЗМЫ В СТОЛБЕ СВЧ-РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ, ПОДДЕРЖИВАЕМОГО СТОЯЧЕЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНОЙ

© 2023 г. В. И. Жуков<sup>а,\*</sup>, Д. М. Карфидов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия*

<sup>\*</sup>*e-mail: zhukov.vsevolod@physics.msu.ru*

Поступила в редакцию 12.05.2023 г.

После доработки 31.05.2023 г.

Принята к публикации 31.05.2023 г.

Исследована структура поддерживаемого стоячей поверхностной волной (ПЭВ) СВЧ-разряда низкого давления в кварцевой трубке, заполненной аргоном. Для формирования стоячей волны использовалась система из двух плоских металлических зеркал, образующих открытый резонатор ПЭВ. Исследованы профиль плотности плазмы и структура электрического поля ПЭВ в диапазоне давлений от 0.25 до 10 Торр. Возбуждение стоячей волны позволило независимо исследовать продольную  $E_z$  и поперечную  $E_r$  компоненты вектора напряженности электрического поля ПЭВ. Экспериментально подтверждено, что фазы колебаний компонент поля стоячей ПЭВ сдвинуты на  $\pi$ . Возбуждение стоячей волны на плазменном столбе приводит к формированию локальных минимумов и максимумов плотности плазмы, период которых равен половине длины поверхностной волны. При этом пространственный период модуляции плотности близок к распределению  $E_z$  компоненты стоячей поверхностной волны. Установлено, что время формирования модулированной структуры плотности плазмы близко к характерному времени диффузии, а степень модуляции растет с ростом давления. Экспериментально продемонстрирована возможность создания плазменного столба с модуляцией плотности плазмы  $n_{\text{emax}}/n_{\text{emin}} \approx 5$  и длиной около 10 длин волн.

*Ключевые слова:* поверхностная электромагнитная волна, низкотемпературная плазма, СВЧ-разряд низкого давления, стоячая поверхностная волна, резонанс, дисперсия поверхностной волны

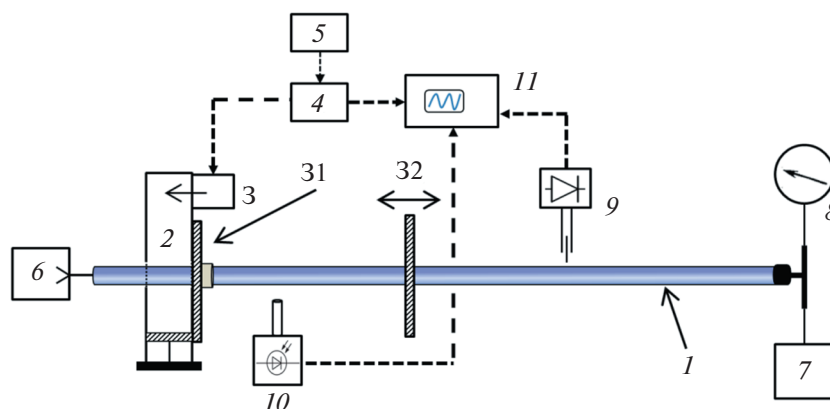
**DOI:** 10.31857/S0367292123600462, **EDN:** HZHVBO

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Разряды на поверхностных электромагнитных волнах (ПЭВ) в диэлектрических трубках широко используются благодаря их способности создавать длинные стационарные плазменные столбы в широком диапазоне рабочих частот (от 1 МГц до 10 ГГц) и давлений (от 10 мТорр до атмосферного давления) [1]. СВЧ-энергия с высокой эффективностью трансформируется в поверхностную волну, которая самосогласованным образом поддерживает плазменный столб. Поле поверхностной волны, распространяющейся по границе раздела плазма–диэлектрик, экспоненциально затухает по обе стороны от границы [2]. ПЭВ относятся к “медленным” волнам, фазовая скорость которых меньше скорости света в окружающей плазменном столбе диэлектрике. Такая плазма нашла множество применений, включая CVD-осаждение алмазных пленок [3], дезинфекцию и стерилизацию материалов [4], создание плазменных антенн [5, 6]. Для работы в широком диапазоне частот и мощностей было создано

множество аппликаторов ПЭВ [7]: коаксиальный резонатор (сурфатрон), робокс, волноводный сурфатрон, волноводный аппликатор. Хотя конкретная конструкция аппликатора ПЭВ не влияет на параметры плазмы, она играет существенную роль в устройстве источника плазмы: определяет эффективность передачи мощности от генератора к плазме, и в некоторых случаях, задает модулирующуюся поверхностной волны [8].

В настоящей работе используется волноводный аппликатор, являющийся наиболее оптимальным аппликатором для работы на частоте 2.45 ГГц. В данной работе выполнялось соотношение  $f \times r < 2$  ГГц  $\times$  см, где  $f$  – частота поля, а  $r$  – радиус трубки, что позволяло возбуждать только аксиально-симметричную  $m = 0$  моду [9]. В случае холодной слабостолкновительной плазмы ( $v_{\text{en}}/\omega \ll 1$ , где  $v_{\text{en}}$  – частота столкновения электронов с нейтральными атомами, а  $\omega$  – круговая частота СВЧ-волны) стационарный разряд представляет собой плазменный столб, концентрация электронов  $n_e$  в котором преимущественно



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки. 1 – кварцевая трубка; 2 – волноводный аппликатор; 3 – магнетрон; 4 – модулятор; 5 – генератор задержанных импульсов; 6 – форвакуумный насос; 7 – натекатель; 8 – вакуумметр; 9 – СВЧ-зонд; 10 – коллимированный фотодетектор; 11 – осциллограф; 31 – неподвижное зеркало; 32 – подвижное зеркало.

но линейно [10] спадает от аппликатора вплоть до критической концентрации [11]  $n_{\min} = (1 + \epsilon_d)n_c$  ( $\epsilon_d$  – диэлектрическая проницаемость трубки;  $n_c$  – критическая концентрация плазмы), ниже которой невозможно распространение поверхностной волны. Формирование стоячей поверхностной волны позволяет независимо исследовать продольную  $E_z$  и поперечную  $E_r$  компоненты вектора напряженности электрического поля ПЭВ как снаружи кварцевой трубки, так и внутри плазмы, а также определить их вклад в поддержание разряда. В случае  $m = 0$  моды для плазменного столба, поддерживаемого стоячей поверхностной волной, характерно наличие продольной модуляции плотности плазмы, зависящей от параметров разряда.

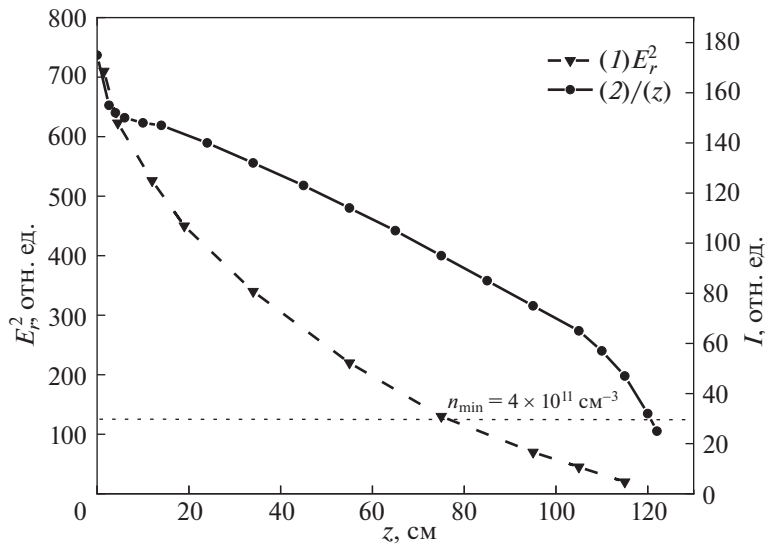
В ряде работ исследовались разряды, поддерживаемые стоячей поверхностной волной  $m = 0$  моды [12–14], где была зарегистрирована продольная модуляция плотности плазмы. В настоящей работе проведено исследование модулированной структуры и процесса ее образования. Подробно измерена структура поля ПЭВ вне разряда. Измерения плотности плазмы проводились только бесконтактными методами, так как введение в плазму диагностических устройств, например зондов, вносит значительные возмущения в структуру поля и плазмы разряда. Численная модель, созданная в программе CST Microwave Studio [15], позволяет получить картину распределения поля ПЭВ как снаружи плазмы, так и внутри ее. Эксперименты проводились при давлениях 0.25 Торр и 6.5 Торр ( $v_{en} \ll \omega$ ). Рост давления приводит к падению энергии на образование пары электрон-ион, и в связи с этим происходит значительный рост плотности плазмы и “вытеснение” из нее поля ПЭВ [16]. Увеличение давления приводит к изменению характера радиально-

го и продольного профилей плотности плазмы разряда при его поддержании поверхностной волной.

## 2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Разряд осуществлялся в кварцевой трубке 1 длиной 2 м, с внутренним диаметром 10 мм, внешним – 14 мм. ПЭВ возбуждалась волноводным аппликатором [17] – 2, подключенным к магнетрону 3, мощностью 800 Вт, генерирующему СВЧ-импульсы на частоте 2.45 ГГц. Напряжение на магнетрон поступало от модулятора 4. Режим работы магнетрона регулировался генератором задержанных импульсов 5. Магнетрон работал в режиме генерации одиночных прямоугольных СВЧ-импульсов длительностью 50 мс. Для откачки воздуха из трубки использовался форвакуумный насос 6. Подача газа регулировалась газовым натекателем 7, давление измерялось цифровым вакуумметром 8. Эксперименты проводились в аргоне в диапазоне давлений от 0.25 до 10 Торр.

Система генерации стоячей волны состоит из двух плоскопараллельных зеркал [15], установленных на разрядную трубку: экран, совмещенного с волноводным аппликатором (31) и подвижного зеркала (32), свободно перемещаемого вдоль трубки. Зеркало 32 состоит из двух элементов – внешнего и внутреннего зеркал (рис. 1), которые могут перемещаться независимо друг от друга. Внешние зеркала представляют собой плоские медные диски диаметром 15 см, с центральным отверстием, диаметр которого равен внешнему диаметру трубки. Внутреннее зеркало 32 с диаметром, равным внутреннему диаметру трубки, выполнено из медной сетки. При подаче СВЧ-энергии от аппликатора распространяется



**Рис. 2.** Распределения квадрата радиальной  $E_r^2(z)$  компоненты напряженности электрического поля ПЭВ –  $I$  и интегральной светимости плазмы –  $2 I(z) \sim n_c(z)$ , измеренные вдоль свободного плазменного столба при  $p = 0.25$  Торр. Пунктирная линия соответствует минимальной концентрации электронов  $n_{\min}$  для распространения ПЭВ. Погрешность измерений составляет не более 30%.

столб плазмы, поддерживаемый поверхностной волной. Начальный этап представляет собой процесс распространения разряда по направлению к зеркалу 32, при достижении которого между зеркалами формируется плазменный столб, поддерживаемый стоячей ПЭВ. При удалении зеркала 32 происходит свободное распространение разряда. Для возбуждения стоячей волны с большим значением коэффициента стоячей волны напряженности поля (КСВН) расстояние между зеркалами устанавливалось кратным целому числу полуволн ПЭВ.

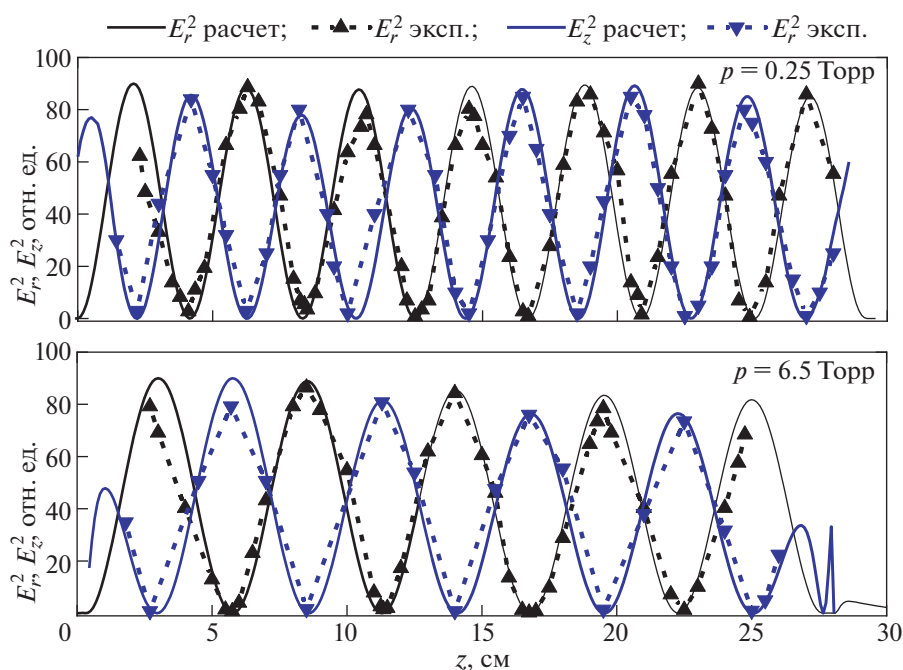
Измерения компонент напряженности электрического поля проводились с помощью СВЧ-зондов, сконструированных для приема радиальной  $E_r$  и продольной  $E_z$  компонент поля. Сигнал с зондов регистрировался супергетеродинным приемником с квадратичным детектированием.

Относительные значения средней плотности плазмы по радиальному сечению в столбе измерялись по интенсивности светового излучения плазмы, при этом считается, что при постоянной температуре электронов  $T_e$  интенсивность света пропорциональна плотности плазмы [17, 18]. Для измерения интегральной светимости плазмы в поперечном сечении использовался коллимированный фотодетектор (спектральный диапазон длин волн 700–1100 нм, временное разрешение 7 нс), обеспечивающий пространственное разрешение 0.5 см.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Разряды низкого давления, поддерживаемые распространяющейся поверхностной электромагнитной волной, характеризуются линейным профилем плотности в основной части плазменного столба [10]. На рис. 2 представлен типичный профиль плотности по координате  $z$  по длине разрядной трубки, измеренный при давлении 0.25 Торр. Профиль линейно спадает вплоть до критической плотности  $n_{\min} = (1 + \epsilon_d)n_c = 4 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . Резкий скачок плотности вблизи аппликатора связан с выносом плазмы из аппликатора и формированием ПЭВ [19]. Электрическое поле ПЭВ затухает по мере удаления от источника, теряя энергию на поддержание разряда.

В настоящей работе стоячая поверхностная волна возбуждалась в открытом резонаторе с длинами  $5/2 \lambda_s$  при 6.5 Торр и  $7/2 \lambda_s$  при 0.25 Торр. Экспериментальные распределения компонент электрического поля  $E_r$  и  $E_z$  приведены на рис 3а, б. Длина ПЭВ  $\lambda_s$  заметно укорачивается относительно длины СВЧ-волны в свободном пространстве  $\lambda_0 = 12.25 \text{ см}$ :  $\lambda_s = 11.1 \text{ см}$  (6.5 Торр) и  $\lambda_s = 8.3 \text{ см}$  (0.25 Торр). Наряду с экспериментальными данными построены распределения  $E_r$  и  $E_z$ , полученные в результате численного моделирования в программе CST Microwave Studio, предназначенной для моделирования электромагнитных полей, и основанной на методе конечных элементов, где была создана численная модель аппликатора ПЭВ, аналогичная используемому в эксперименте. В численной модели не рассмат-



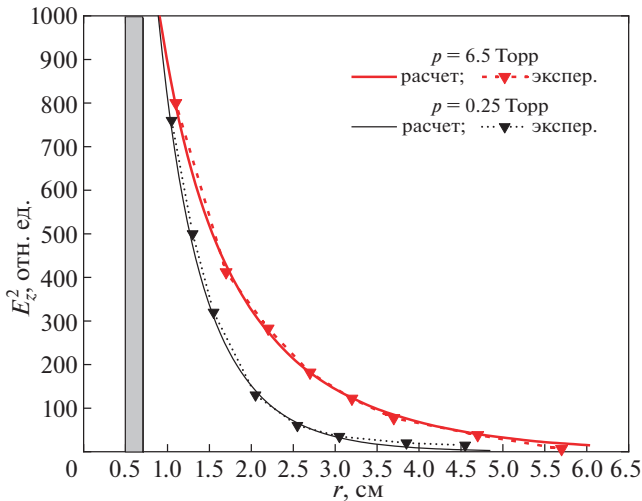
**Рис. 3.** Распределения радиальной  $E_r^2$  и продольной  $E_z^2$  компонент напряженности электрического поля вдоль плазменного столба, ограниченного зеркалами, при давлении 0.25 и 6.5 Торр. Сплошные кривые – результат моделирования. Пунктирные – экспериментальные данные.

ривались процессы образования плазмы. Использовалась модель холодной плазмы Друде с заранее заданными параметрами  $n_e$  и  $v_{en}$ , которые не изменялись в процессе симуляции. В программе была воссоздана модель возбуждения стоячей ПЭВ аналогичная экспериментальной, полностью воспроизводящая параметры эксперимента: размеры аппликатора, рабочая частота, радиус трубки, расстояние между зеркалами. Плотность плазмы задавалась исходя из данных, полученных в эксперименте. Результаты эксперимента и численного моделирования находятся в хорошем согласии. Численное моделирование показало, что усредненное отношение амплитуд вне плазмы  $E_r/E_z = 2$  при 0.2 Торр и  $E_r/E_z = 5$  при 6.5 Торр. Возбуждение стоячей волны позволяет зарегистрировать сдвиг фаз компонент электрического поля ПЭВ  $E_r$  и  $E_z$  друг относительно друга, который составляет  $180^\circ$ . Величина КСВН достигает около 30 при 6.5 Торр и 25 при 0.25 Торр. При резонансе происходит накопление энергии между зеркалами, уровень которой превышает уровень энергии в свободном разряде в 5–8 раз, что приводит к относительному уменьшению уровня шумового объемного сигнала. Рассчитанные по дисперсионному соотношению для ПЭВ  $m = 0$  моды [9], на основании измеренных значений  $\lambda_s$ , средние значения плотности плазмы  $n_e$  при 0.25 Торр и 6.5 Торр равны  $2.4 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$  и  $4 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  со-

ответственно. Измеренные поперечные распределения  $E_z$  (рис. 4) хорошо согласуются с распределениями, полученными из численной модели.

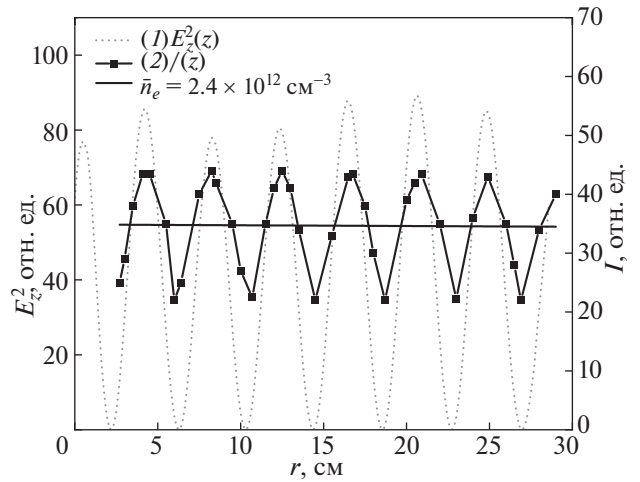
Распределения средней по сечению плотности, измеренной по интенсивности свечения плазмы, представлены на рис. 5 и 6. Можно видеть, что формирование стоячей поверхностной волны приводит к значительной модуляции плотности плазмы, возрастающей с ростом давления. Максимумы и минимумы плотности плазмы совпадают с максимумами и минимумами продольной компоненты электрического поля  $E_z$  и сдвинуты на  $180^\circ$  относительно  $E_r$ . Данный результат измерений свидетельствует об определяющей роли компоненты  $E_z$  в поддержании разряда. Распределения электрического поля в сечениях, соответствующих максимумам  $E_r$  и  $E_z$ , полученные в результате численного моделирования (рис. 7), свидетельствуют о доминирующем вкладе  $E_z$  в поддержании разряда. Экспериментально была продемонстрирована возможность создания длинного ( $L = 84 \text{ см}$ ,  $\lambda_s \approx 10.5 \text{ см}$ ) стационарного плазменного столба с высокой степенью модуляции  $n_{\text{emax}}/n_{\text{emin}} \approx 5$  (рис. 8), полученного при давлении 9 Торр.

Процесс формирования модулированной структуры исследовался тремя независимыми методами: зондированием проходящими волнами, по интегральному световому излучению плазмы и



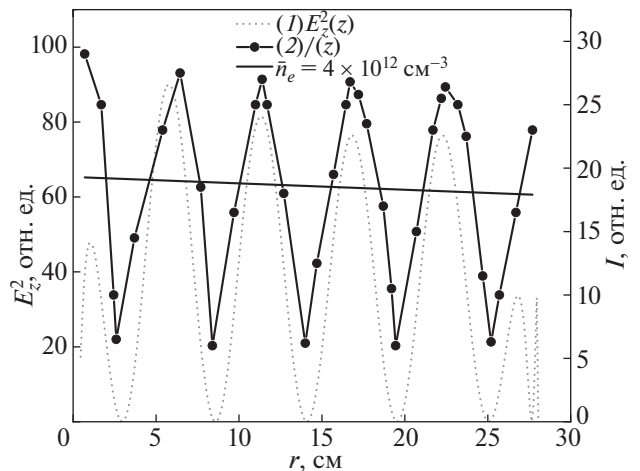
**Рис. 4.** Радиальные распределения продольной компоненты напряженности электрического поля ПЭВ  $E_z^2(r)$  снаружи разрядной трубки при 0.25 и 6.5 Торр. Сплошные кривые – результат моделирования. Точки соответствуют экспериментальным результатам.

измерению характеристик электрического поля ПЭВ. Для реализации метода проходящих волн был использован прямоугольный волновод  $35 \times 15$  мм с диаметрально расположенными отверстиями в широкой стенке радиусом 1.5 см. Разрядная трубка проходила через центр этих отверстий. Волновод мог свободно перемещаться вдоль трубки. Через волновод передавалось диагностическое СВЧ-излучение ( $f_d = 5.5\text{--}7.5$  ГГц), регистрируемое супергетеродинным приемником. Измерялся коэффициент прохождения диагностического сигнала. Для нормировки использовалась металлическая трубка. Прохождение диагностического СВЧ-излучения через разрядную плазму было смоделировано в программе CST Microwave Studio (рис. 9а). Моделирование автоматически учитывало особенности используемой диагностической системы (каустика, рефракция и отражение), а также позволяло задавать плазму как с докритической, так и сверхкритической концентрацией. Концентрация электронов вычислялась путем совмещения экспериментальных данных прохождения диагностического сигнала с численным моделированием. Измерения проводились только при  $p = 0.25$  Торр, так как при  $p = 6.5$  Торр концентрации электронов  $n_e > 10^{13}$  см $^{-3}$ , и точность метода сильно снижается. Результаты измерений в точках  $z_{\min}$  и  $z_{\max}$ , соответствующих произвольным соседним минимуму и максимуму плотности плазмы, представлены на рис. 8а, б. Отсчет времени ведется от момента, соответствующему началу регистрации фронта разряда. В течение первых 2 мкс происходит свобод-



**Рис. 5.** Пунктирная кривая – распределение продольной компоненты напряженности электрического поля стоячей ПЭВ  $E_z^2(z)$  из рис. 3 (а). Точки соответствуют измеренному между зеркалами распределению интегральной светимости плазмы  $I(z) \sim n_e(z)$ . Сплошная линия – среднее значение плотности плазмы  $\bar{n}_e = 2.4 \times 10^{12}$  см $^{-3}$ . Давление  $p = 0.25$  Торр. Погрешность измерений составляет не более 30%.

ное распространение разряда, поддерживаемого бегущей поверхностной волной. При достижении разрядом второго зеркала образуется стоячая волна, что приводит к модуляции плотности плазмы. Изменение структуры поля и плотности плазмы разряда является самосогласованным процессом, выходящим на стационар за время  $\tau \approx 10$  мкс, коррелирующему с характерным временем амбиполярной диффузии [20]  $\tau_d = 4.55 \times 10^2 pr^2 T_m^{-1} (T_m +$



**Рис. 6.** То же, что и на рис. 5, но при  $p = 6.5$  Торр. Погрешность измерений составляет не более 30%.

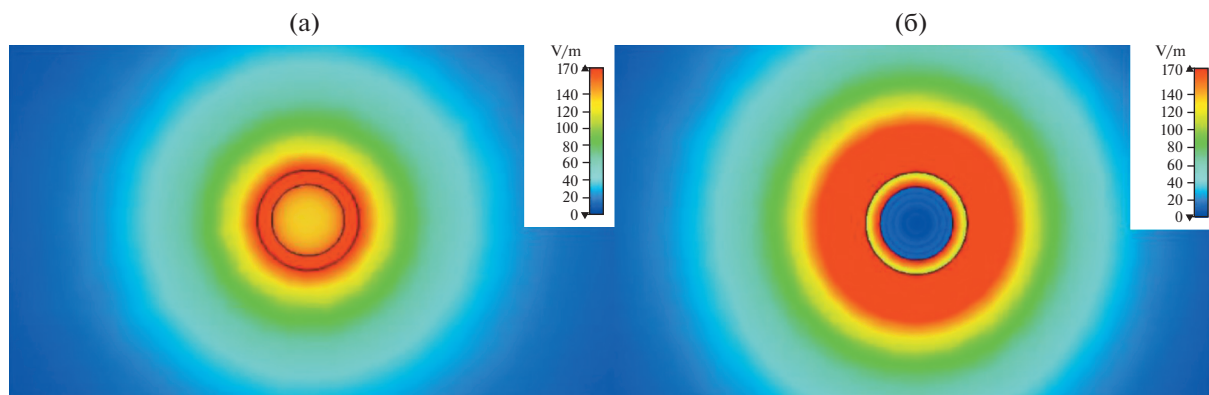


Рис. 7. Распределения интенсивности электромагнитного поля стоячей ПЭВ в поперечных сечениях разряда при  $p = 0.25$  Торр (результат моделирования в CST Microwave Studio), соответствующих; а) – максимуму  $E_z$ ; б) – максимуму  $E_r$ .

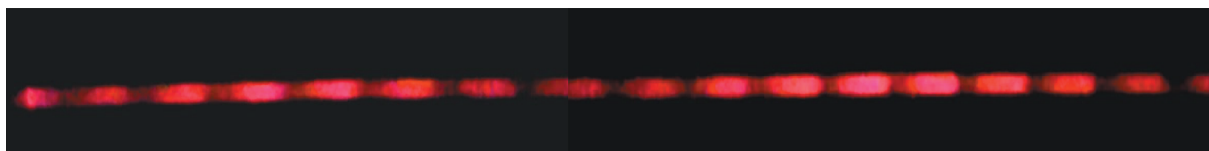
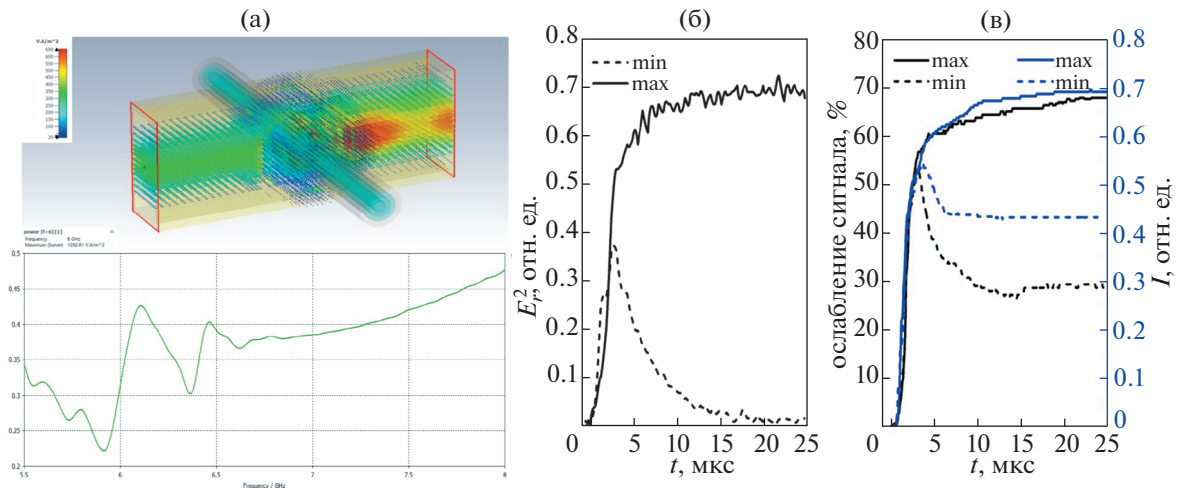


Рис. 8. Фото разряда, поддерживаемого стоячей ПЭВ ( $p = 9$  Торр). Расстояние между зеркалами  $L = 84$  см.

$+ T_e)^{-1} \approx 3.7$  мкс, где  $T_m$  – температура нейтрального газа, а  $T_e$  – температура электронов. Измеренная по интегральной светимости (рис. 9в) степень модуляции равна  $n_{\text{emax}}/n_{\text{emin}} = 1.5$ . В данном эксперименте было использовано только внешнее подвижное зеркало. Проходящий диагностический сигнал (6 ГГц) ослаблялся на 68% в максимуме и на 30% в минимуме, что после сопоставления с результатами численного моделирования (зависимость коэффициента прохождения от частоты в максимуме представлена на рис. 9а) соответствует  $n_{\text{emax}} = 2.4 \times 10^{12}$  см $^{-3}$  и  $n_{\text{emin}} = 1.5 \times 10^{12}$  см $^{-3}$ . Для повышения точности аналогичные измерения были проведены и для других частот в диапазоне от 5.5 ГГц до 7.5 ГГц. Полученные методом проходящих волн концентрации электронов хорошо согласуются с измерениями относительной плотности по световому излучению плазмы и с величиной средней плотности  $\bar{n}_e = 2.2 \times 10^{12}$  см $^{-3}$ , определенной по дисперсии ПЭВ на основании измеренной длины волны.

Измерение радиального профиля плотности плазмы проводилось не возмущающим плазму методом поперечных снимков плазменного столба с последующей обработкой с помощью преобразования Абеля [21]. При обработке снимков в радиальное распределение учитывались погрешности обусловленные прохождением оптически-

го излучения через кварцевую трубку. Для калибровки метода была использована бактерицидная лампа длиной 90 см, с внутренним диаметром 24 мм, внешним – 25 мм. В лампе реализовывался тлеющий разряд с помощью стандартного пускорегулирующего аппарата (ПРА). Радиальный профиль плотности плазмы в тлеющем разряде хорошо известен и описывается бесселевой функцией  $n_e(r) \sim J_0(2.4r/a)$ , где  $a$  – радиус трубки [21]. На рис. 10а приведены экспериментально измеренный и эталонный профили плотности в бактерицидной лампе, демонстрирующие близкий характер. Распределения в условиях нашего эксперимента представлены на рис. 10б. Данные распределения были измерены в середине линейной части свободного разряда (рис. 2), где плотность плазмы близка к средней по столбу  $\bar{n}_e = 1.4 \times 10^{12}$  см $^{-3}$ . Характер радиального распределения концентрации электронов зависит от давления. При 0.25 Торр профиль плотности имеет столбовидный вид с незначительным провалом к центру трубки. При увеличении давления до 6.5 Торр наблюдается значительный провал концентрации на оси трубки. Измеренные при данных давлениях значения средних концентраций электронов, определяющие глубину проникновения поля ПЭВ в плазму, отличаются более чем на порядок (при 6.5 Торр  $\bar{n}_e = 1.6 \times 10^{13}$  см $^{-3}$ ).

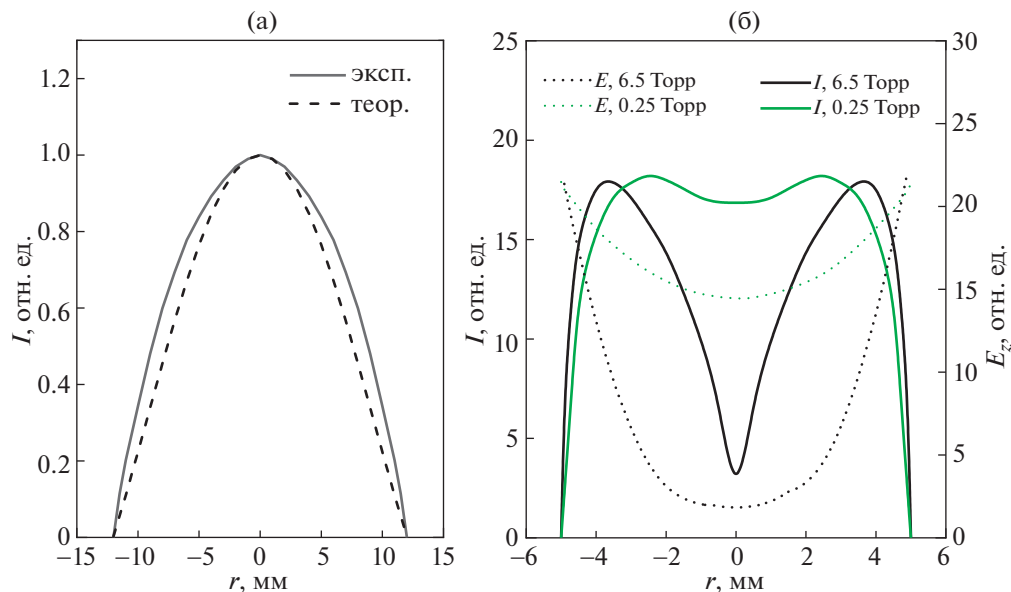


**Рис. 9.** Процесс формирования модулированной структуры ( $p = 0.25$  Торр). а) Скриншот численной модели в CST Microwave Studio по симуляции прохождения диагностического СВЧ-сигнала через разряд. Нижний рисунок демонстрирует результаты расчета коэффициента прохождения диагностического СВЧ-сигнала в диапазоне от 5.5 ГГц до 8 ГГц. б) Временная зависимость  $E_r^2(t)$ , измеренная в положениях, соответствующих узлам (пунктирная кривая) и пучностям (сплошная линия) компоненты  $E_r$  стоячей ПЭВ. в) Временные зависимости прохождения диагностического СВЧ-излучения (6 ГГц) и интенсивности свечения плазмы, измеренные в положениях, соответствующих минимуму (пунктирные кривые) и максимуму (сплошные кривые) плотности плазмы.

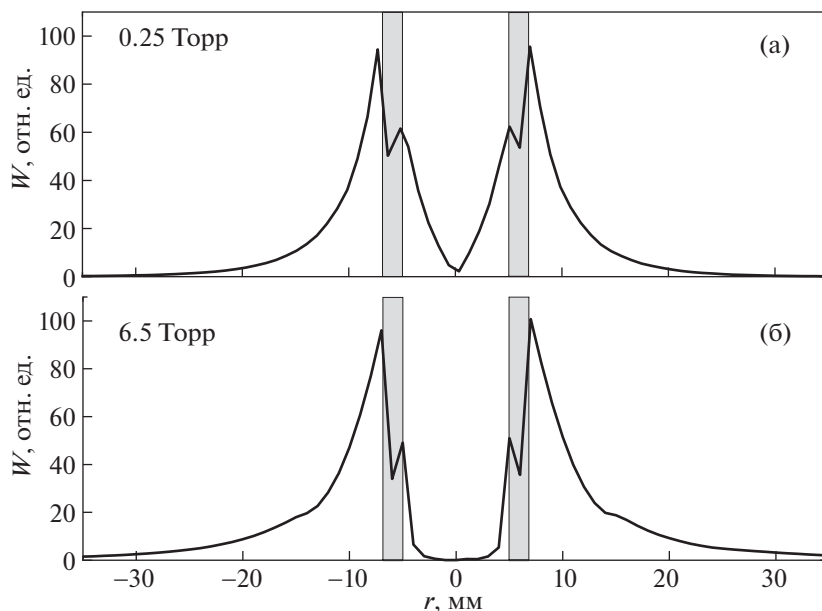
Радиальные распределения компоненты  $E_z$ , вносящей доминирующий вклад в поддержание разряда, получены в результате численного моделирования в CST Microwave Studio (рис. 10б). Из приведенных результатов видно, что характер распределения плотности плазмы коррелирует с распределением электрического поля ПЭВ, определяющего процессы ионизации. Радиальный профиль определяется балансом между процессами амбиполярной диффузии и объемной диссоциативной рекомбинации, приводящими к формированию более плавного по сравнению с полем градиенту. При пониженном давлении (0.25 Торр) диффузия превалирует над рекомбинацией  $v_d = 2.7 \times 10^5 \text{ c}^{-1} \gg v_r$ , а распределение поля близко к однородному. В области повышенного давления (6.5 Торр) профиль поля сильно неоднороден и падает практически до нуля к центру трубки. В то же время профиль плотности спадает менее резко, что, по-видимому, определяется балансом процессов диффузии и рекомбинации. Рассчитанное значение частоты диффузии  $v_d = 5.2 \times 10^3 \text{ c}^{-1}$ . Значение частоты рекомбинации, измеренное в схожих условиях [22] близко к частоте диффузии и равно  $v_r \approx 7 \times 10^3 \text{ c}^{-1}$ .

Используя полученные в работе [23] выражения для энергии ПЭВ, проникающей в плазму  $W_{pl}$  и энергии ПЭВ в окружающем плазменный столб пространстве  $W_{vac}$ , был проведен расчет отношения  $W_{pl}/W_{vac}$ . В условиях нашего эксперимента

отношение  $W_{pl}/W_{vac}$  равно 0.25 при 0.25 Торр и 0.04 при 6.5 Торр. Расчет проводился для средней по свободному плазменному столбу плотности плазмы. Распределения энергии ПЭВ внутри и снаружи плазменного столба были получены и в результате численного моделирования (рис. 11). Данные моделирования хорошо согласуются с расчетными данными  $W_{pl}/W_{vac}$ . Результаты моделирования и расчета отношения  $W_{pl}/W_{vac}$  были подтверждены экспериментально. Для этого стоячая волна возбуждалась как при совмещенных внутреннем и внешнем зеркалах, так и при их раздельном использовании. Перемещение внутреннего зеркала при высоком давлении (6.5 Торр) не приводит к значительным изменениям КСВН и профиля плотности плазмы, что подтверждает малую долю энергии ПЭВ внутри плазмы  $W_{pl} \ll W_{vac}$ . В эксперименте с пониженным давлением (0.25 Торр) максимальные значения КСВН = 25, и степени модуляции  $n_{emax}/n_{emin} = 2$  были достигнуты при одновременной установке внешнего и внутреннего зеркал. Использование только внешнего зеркала уменьшает величину КСВН, а степень модуляции достигает  $n_{emax}/n_{emin} = 1.5$ , тогда как при использовании только внутреннего зеркала  $n_{emax}/n_{emin} = 1.3$ . Видно, что в таких условиях эффект от зеркал складывается. Степень влияния внутреннего и внешнего зеркал на модуляцию плотности плазмы и поля поверхностной волны напрямую связано с долями энергии поверхностной волны внутри плазмы и вне ее.



**Рис. 10.** а) – Радиальные распределения плотности плазмы в бактерицидной лампе (глюющий разряд). Пунктирная кривая – распределение, измеренное методом поперечных снимков. Сплошная кривая – теоретическое распределение. б) – Сплошные кривые – измеренные методом поперечных снимков распределения плотности плазмы в разряде на поверхностной волне. Пунктирные кривые – радиальные распределения напряженности электрического поля  $E(r)$  внутри плазменного столба (результаты численного моделирования).



**Рис. 11.** Результаты моделирования радиального распределения энергии ПЭВ внутри и снаружи плазменного столба. а)  $p = 0.25$  Торр;  $n_e = 1.4 \times 10^{12}$  см $^{-3}$ . б)  $p = 6.5$  Торр;  $n_e = 1.6 \times 10^{13}$  см $^{-3}$ .

Выражение для мощности поверхностной волны, расходуемой в плазме свободного разряда  $P_{pl} = P_0 - P_{vac} - P_{loss}$ , где  $P_{vac}$  – мощность ПЭВ в вакууме, а  $P_0 = 800$  Вт – мощность источника. Уровень потерь, связанный с отражением внутри ап-

пликатора и излучением с конца разряда не превышает 30% ( $P_{loss} \approx 200$  Вт) [24]. Используя ранее рассчитанные значения  $W_{pl}/W_{vac}$  мощность ПЭВ поглощаемую в плазме можно оценить как  $P_{pl} \approx 110$  Вт при 0.25 Торр и  $P_{pl} \approx 22$  Вт при 6.5 Торр.

Мощность, затрачиваемая на создание пары электрон-ион, может быть рассчитана как в [25]:

$\theta = P_{\text{pl}} / \pi \bar{n}_e l a^2$ , где  $l$  – длина плазменного столба. Учитывая измеренные поперечные профили плотности плазмы, были получены следующие оценки:  $\theta \approx 1.1 \times 10^{-14}$  Вт (6.5 Торр) и  $\theta \approx 6.7 \times 10^{-13}$  Вт (0.25 Торр), находящиеся в хорошем согласии с теоретическими моделями и экспериментальными данными  $\theta$  для аргона из других работ [20, 26, 27].

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован СВЧ-разряд низкого давления в аргоне, поддерживаемый поверхностной электромагнитной волной. Проведены измерения компонент электрического поля ПЭВ вне плазмы, экспериментально получены значения плотности плазмы и ее пространственные распределения. В программе CST Studio Suite создана численная модель, позволяющая исследовать поле ПЭВ как внутри, так и снаружи плазменного столба. С увеличением давления в 20 раз наблюдается значительное уменьшение доли энергозаклада на образование пары электрон-ион, что наряду с ростом концентрации электронов приводит к “вытеснению” поля ПЭВ – изменению отношения энергии ПЭВ в плазме и вакууме с  $W_{\text{pl}}/W_{\text{vac}} = 0.25$  до  $W_{\text{pl}}/W_{\text{vac}} = 0.04$ . Измеренные радиальные профили плотности плазмы с увеличением давления демонстрируют изменение от столбовидного вида до неоднородного с провалом на оси трубки. Профиль плотности определяется распределением электрического поля, а также процессами амбиполярной диффузии и объемной рекомбинации. Возбуждение стоячей поверхностной волны на плазменном столбе позволило детально исследовать продольную  $E_z$  и радиальную  $E_r$  компоненты электрического поля ПЭВ, сдвинутые друг относительно друга на  $180^\circ$ . Достаточно высокое значение КСВН приводит к образованию модуляции плотности плазмы вдоль столба, максимумы и минимумы которой совпадают с максимумами и минимумами продольной компоненты  $E_z$ . Установлено, что время формирования модулированной структуры близко к характерному времени диффузии, а степень модуляции растет с ростом давления и может достигать  $n_{\text{emax}}/n_{\text{emin}} = 5$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РЦНИ, проект № 20-5804019 Бел\_мол\_а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schluter H., Shivarova A. // Physics Reports. 2007. V 443. № 4–6. P. 121–255. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2006.12.006>
2. Sommerfeld A. // Ann. der Physik und Chem. 1899. Vol. 67. № 2. P. 233.
3. Borges C.F.M., Airoidi V.T., Corat E.J., Moisan M., Schelz S., Guay D. // Journal of Applied Physics. 1996. V. 80. № 10. <https://doi.org/10.1063/1.363600>
4. Moisan Michel, Karim Boudam, Denis Carignan, Danielle Kéroack, Pierre Levif, Jean Barbeau, Jacynthe Séguin, et al. // The European Physical Journal Applied Physics. 2013. V. 63. № 1. P. 10001. <https://doi.org/10.1051/epjap/2013120510>
5. Istomin E.N., Karfidov D.M., Minaev I.M., Rukhadze A.A., Tarakanov V.P., Sergeichev K.F., Trefilov A.Yu. // Plasma Physics Reports. 2006. V. 32, № 5. P. 388–400. <https://doi.org/10.1134/S1063780X06050047>
6. Zhao Jiansen, Zhen Sun, Yuxiang Ren, Lu Song, Shengzheng Wang, Wei Liu, Zhe Yu, and Yuhuan Wei. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2019. V. 52. № 29. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab1b0a>
7. Moisan M., Zakrzewski Z. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1991. V. 24. P. 1025. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/24/7/001>
8. Moisan M., Shivarova A., Trivelpiece A.W. // Plasma Phys. 1982. V. 24. № 11. P. 1331. <https://doi.org/10.1088/0032-1028/24/11/001>
9. Margot-Chaker J., Moisan M., Chaker M., Glaude V.M.M., Lauque P., Paraszczyk J., Sauve G. // J. Appl. Phys. 1982. V. 66. № 9. P. 4134. <https://doi.org/10.1063/1.343998>
10. Zhelyazkov I., Benova E., Atanassov V. // Journal of Applied Physics. 1986. V. 59. № 5. P. 1466–1472. <https://doi.org/10.1063/1.336501>
11. Trivelpiece A.W. // The DP degree Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, 1958.
12. Rogers J., Asmussen J. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1982. V. PS-10. № 1. P. 11. [https://doi.org/0093-3813/82/0300-0011\\$00.75](https://doi.org/0093-3813/82/0300-0011$00.75)
13. Wolinska-Szatowska J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1988. V. 21. № 6. P. 937. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/21/6/012>
14. Rakem Z., Leprince P., Marec J. // Rev. Phys. Appl. (Paris). 1990. V. 25. № 1. P. 125. <https://doi.org/10.1051/rphysap:01990002501012500>
15. Жуков В.И., Карфидов Д.М. // Физика плазмы. 2023. Т. 49. № 3. С. 260–269. <https://doi.org/10.1134/S1063780X22601651>
16. Солнцев Г.С., Булкин П.С., Мокеев М.В., Цветкова Л.И. // Вестник Московского университета. 1997. Сер. 3. № 6. С. 36.
17. Moisan M., Beaudry C., Leprince P. // Physics Letters A. 1974. V. 50. № 2. P. 125. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(74\)90903-7](https://doi.org/10.1016/0375-9601(74)90903-7)
18. Жуков В.И., Карфидов Д.М., Сергейчев К.Ф. // Физика плазмы. 2020. Т. 46. № 8. С. 1. <https://doi.org/10.31857/S0367292120080120>
19. Moisan M., Levif P., Nowakowska H. // International Workshop “Microwave Discharges: Fundamentals and Applications” (MD): 3–7 September 2018, Zvenigorod, Russia: Proceedings. Moscow: Yanus-K, 2018.

20. *Cotrino J., Gamero A., Sola A., Saez M., Colomer V., Sanz-Medel A., Uria J.E.* // *Mikrochimica Acta*. 1989. V. 99. № 3–6. P. 179.  
<https://doi.org/10.1007/BF01244672>
21. *Moisan M., Ferreira C.M., Hajlaoui Y., Henry D., Hubert J., Pantel R., Ricard A., Zakrzewski Z.* // *Revue de Physique Appliquée*. 1982. V. 17. № 11. P. 707–27.  
<https://doi.org/10.1051/rphysap:019820017011070700>
22. *Cotrino J., Gamero A., Sola A., Colomer V.* // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1988. V. 21. № 9. P. 1377–1383.  
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/21/9/010>
23. *Кондратенко А.Н.* // Поверхностные и объемные волны в ограниченной плазме. М.: Энергоатомиздат, 1985. С. 17.
24. *Nowakowska H., Lackowski M., Moisan M.* // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2020. V. 48. № 6. P. 2106.  
<https://doi.org/10.1109/TPS.2020.2995475>
25. *Moisan M., Nowakowska H.* // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2018. V 27. № 7. 073001.  
<https://doi.org/10.1088/1361-6595/aac528>
26. *Moisan M., Ganachev I.P., Nowakowska H.* // *Physical Review E*. 2022. V. 106. № 4. 045202.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.106.045202>
27. *Ferreira C.M., Moisan M.* // *Physica Scripta*. 1988. V. 38. № 3. P. 382–399.  
<https://doi.org/10.1088/0031-8949/38/3/008>