

4. Большие транспортные потоки в районах жилой застройки.
5. Строительство школ на магистралях с высокой интенсивностью движения.
6. Опасные условия движения по двухполосным дорогам.
7. Отсутствие безопасных наземных и надежных подземных пешеходных переходов.
8. Отсутствие ограждений, мешающих выходу пешеходов на проезжую часть скоростных дорог.

Все эти факторы в сочетании создают ситуацию, характеризующуюся чрезвычайно высокой концентрацией факторов риска дорожно-транспортного травматизма.

**Выводы.** Как видно из проведенного анализа, во многих областях и в Украине в целом наметилась тенденция роста автомобилизации и в то же время постепенно снижается уровень дорожной аварийности. Как показывает опыт зарубежных стран, при более высоком уровне доходов, когда темпы автомобилизации замедляются, а государство, гражданское общество и физические лица вкладывают больший объем средств в безопасность дорожного движения, качество дорог улучшается, и в итоге снижается смертность в результате дорожно-транспортных происшествий произошедших по вине неудовлетворительного состояния дорог.

### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Ефремова Т. Ф.** Большой современный толковый словарь русского языка в 3 томах. – АСТ, Астрель, 2006. – 3312 с.
2. Региональные различия автомобилизации в России и в мире. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://geo.1september.ru/2004/01/11.htm>
3. Сколько автомобилей в Украине на 1 000 жителей? [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.delfi.ua/news/daily/auto/skolko-avtomobilej-v-ukraine-na-1000-zhitelej.d?id=842816>
4. Уровень автомобилизации России. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://222avto.ru/zakon-i-avtobiznes/uroven-avtomobilizacii-rossii.html>
5. Страна контрастов. Автомобилизация Украины очень неравномерна. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://autoconsulting.ua/article.php?sid=25735>
6. Украинские дороги, по которым лучше не ездить. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://dnepr.on-nash.dp.ua/novosti/dorogiukraini>
7. Украинская правда. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.rbc.ua, ukanews.com](http://www.rbc.ua, ukanews.com)
8. World Bank Report No. 51667-ECA. Противостояние «смерти на колесах». Обеспечение безопасности дорожного движения в Европе и Центральной Азии. Создание межотраслевых партнерств для борьбы с тихой эпидемией.
9. Statistical database of the UN Economic Commission for Europe (UNECE) [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://w3.unece.org/pxweb/quickstatistics/readtable.asp?qs\\_id=44&lang=14](http://w3.unece.org/pxweb/quickstatistics/readtable.asp?qs_id=44&lang=14).

УДК 532.525.2:533.697.4

### ПРИБЛИЖЕННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ ГАЗА, ИСТЕКАЮЩИХ В ВАКУУМ

*О. А. Левкович, к. ф.-м. н., доц.*

**Ключевые слова:** импульсные плазменные генераторы (ИПГ) и ускорители плазмы с замкнутым дрейфом электронов и плазмы (УЗДП), плотность ионного тока, погрешность аппроксимации

К перспективным направлениям в технологии обработки поверхностей строительных материалов относятся импульсные плазменные генераторы (ИПГ) и ускорители плазмы с замкнутым дрейфом электронов и плазмы (УЗДП).

Преимущества применения импульсных плазменных генераторов усложняются недостаточно полным и достоверным знанием динамики, структуры и пространственно-временного распределения параметров сгустков и струй импульсной плазмы, расширяющейся в вакуум. Это обусловлено рядом специфических особенностей, связанных, прежде всего, с малым временем существования, кратковременностью протекания процессов и высокими

скоростями движения плазмOIDов. В [12] для исследования сгустков и струй импульсной плазмы разработана методология комплексной диагностики с применением различных по физической природе методов – зондового, СВЧ- и фотометрического. Методология позволяет исследовать процессы разлета и динамики плазменных сгустков и струй в вакууме с характерными временами порядка десятков и сотен микросекунд, независимо от способа генерации и предыстории движения плазмы. Методология основана на синхронной регистрации тока на электрический зонд, амплитуды СВЧ-сигнала, проходящего через плазму в области размещения зонда, и фоторегистрации плазменного образования.

Задачи о разлете плазменных сгустков и струй, взаимодействии струй импульсной плазмы с преградами имеют самостоятельное фундаментальное значение.

Условием применения плазменных струй в технологии обработки материалов является условие равномерного распределения ионов в рабочем сечении струи.

Пространственное распределение плотности ионного тока  $j_i$  в плазменной струе приближенно может быть представлено в виде

$$j_i = j_{0i} f(\vec{r}) \approx e N_{0i} U_{\infty} f(z, \theta), \quad (1)$$

где

$$f(z, \theta) = \frac{1}{2z^2} \left\{ (\cos \theta)^2 + 0,91 \left[ 1 - \left( \sin \frac{\theta}{2} \right)^{0,09} \right] \left[ \sin \left( \theta + \frac{\pi}{6} \right) \right]^3 \right\} \times \\ \times \left[ (1,1 - 0,1z) + 2 \cdot 10^{-3} z^2 (z - 9) \right] \cdot 10^{-[2+0,09(\sin \theta)^{0,8}]};$$

$N_{0i}$  – концентрация ионов на срезе струи,

$U_{\infty}$  – скорость истечения струи,

$e$  – заряд электрона,

$z = r/R$ ,

$r$  – радиальная координата,

$\theta$  – полярный угол,

$R$  – расстояние от среза УЗДП.

Погрешность аппроксимации (1) для распределений плотности ионного тока в плазменной струе УЗДП-70 и УЗДП-100 иллюстрирует рисунок 1. Точками 1 на рисунке 1 представлены результаты измерений в струе УЗДП-70 [3]; точками 2, 3, 4 – в струе УЗДП-100 [2]. Кривая 5 – функция  $f(z, \theta = 0)$ .

Данные рисунка 1 свидетельствуют о том, что при  $z < 9$  рассчитанные с помощью аппроксимации (1) зависимости плотности ионного тока  $j_i(z, 0)/j_{0i}$  в плазменной струе в пределах погрешности  $\pm 5\%$  согласуются с результатами физического и эксперимента для разных типов УЗДП.

Представленные на рисунке 1 данные подтверждают требуемую точность модели (1) для распределения параметров в струе плазмы и могут быть использованы при обработке поверхности материалов для определения рабочего расстояния с заданной плотностью ионного тока в сечении струи.

В [5] приведены конструктивные схемы ИПГ-1 (с цилиндрической разрядной камерой), ИПГ-2 (разрядный канал образован торцами анода, катода и внутренней поверхностью рабочего тела), ИПГ-3 («Ариэль»); пространственно-временные распределения параметров, структуры сгустков и струй, инжектируемых ИПГ эрозионного типа с твердым диэлектриком в качестве рабочего тела.

В данной работе показано (рис. 2), что начало области стабилизации спада температуры электронов  $T_e$  при истечении импульсной плазмы в вакуум, характеризующей изменение режима расширения плазмы вдоль трассы расширения плазмOIDа, является точка  $r/r_{e\alpha} \approx 23,0$  ( $r$  – радиус струи;  $r_{e\alpha}$  – радиус среза сопла ИПГ). На рисунке 2 приведена зависимость  $T_e(r/r_{e\alpha})/T_{0e}$ , где точки 1 относятся к ИПД-2, 2 – данные работы [6], 3 – ИПД-3, 4 – данные работы [7], кривая 5 – аппроксимация

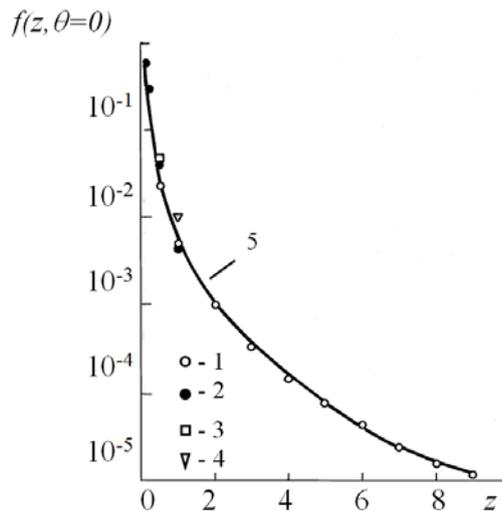


Рис. 1. Распределение плотности нормированного ионного тока на оси плазменной струи УЗДП

$$T_e(r/r_{e\alpha})/T_{0e} = a + (1-a)\exp\left(-\frac{r/r_{e\alpha}}{b}\right) \quad (2)$$

при  $a \approx 0,51$ ;  $b = 4,0$ ,

$T_{0e}$  – температура на срезе ускорителя.

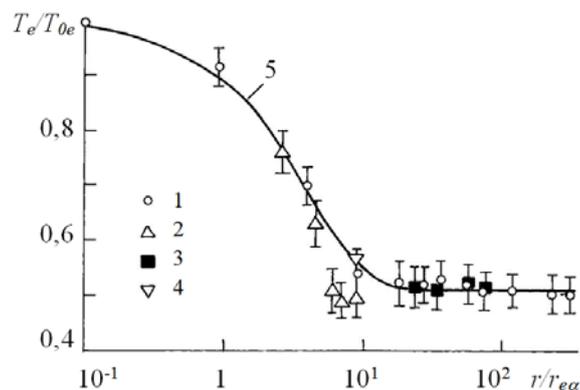


Рис. 2. Распределение температуры электронов вдоль трассы расширения плазмоида

С изменением режима расширения импульсной плазмы в вакуум связано и изменение характера зависимостей среднемассовой скорости плазмоидов  $V_i(r/r_{e\alpha})/V_{0i}$ , измеренных в ИПД-1 (кривая 1) и ИПД-3 (кривая 2, рис. 3). Здесь  $r/r_{e\alpha} \approx 23,0$  соответствует началу отклонения от линейного участка зависимости  $V_i(r/r_{e\alpha})/V_{0i}$  ( $V_{0i}$  – среднемассовая скорость плазмоида на срезе ИПД).

На рисунке 3 приведены усредненные результаты зависимости  $V_i/V_{0i}$ , полученные время-пролетным методом, по импульсу зондового тока, ионному току насыщения вольтамперной характеристики одиночного зонда Ленгмюра и по эффекту Доплера. Величина среднемассовой скорости плазмоида, найденная по времени запаздывания сигнала с пояса Роговского, в пределах погрешности  $\sim \pm 2,5\%$  согласуется с результатами измерений скорости по эффекту Доплера. Это иллюстрируют точки кривых 1, 2 (рис. 3).

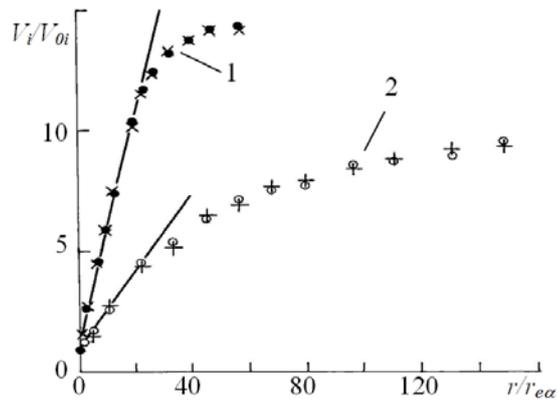


Рис. 3. Пространственная зависимость скорости ионов плазмоида

На начальном участке трассы наблюдается непрерывное ускорение плазмоида. Согласно существующим представлениям, ускорение импульсной плазмы при расширении в вакуум обусловлено амбиполярной диффузией. На фронте плазмоида электроны, опережая ионы на длине порядка дебаевского радиуса, за счет электрического поля увлекают за собой ионы. В результате средние скорости ионов в направлении движения плазмы выравниваются (амбиполярное ускорение). Для реализации амбиполярного ускорения необходимо наличие совместного движения ионов и электронов с равными скоростями дрейфа при равных концентрациях разнополярно заряженных частиц [8; 9].

Результаты зондовых измерений, подобие структур осциллограмм ионного и электронного токов, их одинаковое положение во времени свидетельствуют о выполнении условия квазинейтральности в плазмоидах и равенстве средних скоростей поступательного движения ионов и электронов при расширении плазменного образования в вакуум.

Непрерывное ускорение возможно, если энергия электронов, переданная ускоряемым ионам, восполняется за счет притока электронного тепла из разрядного канала ускорителя. Это проявляется особенно наглядно, когда плазменное образование состоит из нескольких сгустков, движущихся с разными скоростями [5].

Непрерывное ускорение плазмоида наблюдается в течение некоторого времени и после прекращения основного разряда, когда разрядный ток  $I_p = 0$  и напряжение  $U_p = 0$ . Согласно представлениям [6], это обусловлено существованием замкнутых токовых конфигураций, имеющих вид овалов, вложенных друг в друга, вытянутых вдоль электродов и замкнутых по азимуту. Существование замкнутых токовых петель регистрируется поясом Роговского. Наиболее наглядно эффект непрерывного ускорения после прекращения основного разряда проявляется для медленных сгустков (групп ионов). Для ИПД-1;3 линейный участок зависимости среднемассовой скорости второго (медленного) сгустка плазмоида  $V_2(t_2/t_p)/V_{02}$  (кривые 1, 2, рис. 4) свидетельствует о том, что процесс непрерывного ускорения продолжается до  $t_2/t_p \approx 1,15...1,20$ . Здесь  $t_p$  – время длительности основного разряда,  $V_2$  – среднемассовая скорость второго (медленного) сгустка плазмоида; зависимость 1 соответствует ИПД-1; 2 – ИПД-3.

Динамику и структуру плазмоида, расширяющегося в вакуум, характеризуют две последовательные стадии: механизмы эффективного джоулева нагрева плазмоида на начальном участке трассы и бесстолкновительного разлета [10; 11]. На зависимости  $V_2(t_2/t_p)/V_{02}$  (кривые 1, 2 рис. 4) эти стадии представлены двумя пересекающимися прямыми. Условие эффективного джоулева (теплового) ускорения определяется соотношением  $\tau_r \leq t_0 \approx l_p/V_{0i}$ , которое хорошо выполняется в системах с плазмой высокой плотности при невысокой скорости истечения  $V_{0i}$ .

Бесстолкновительное расширение реализуется при  $t_0 \ll \tau_r$ . Здесь  $t_0$  – пролетное время,  $l_p$  – длина канала ускорения ИПД,  $\tau_r$  – время релаксации ( $\tau_r \approx \tau_{ei}$ ),  $\tau_{ei}$  – время электрон-ионных столкновений [9].

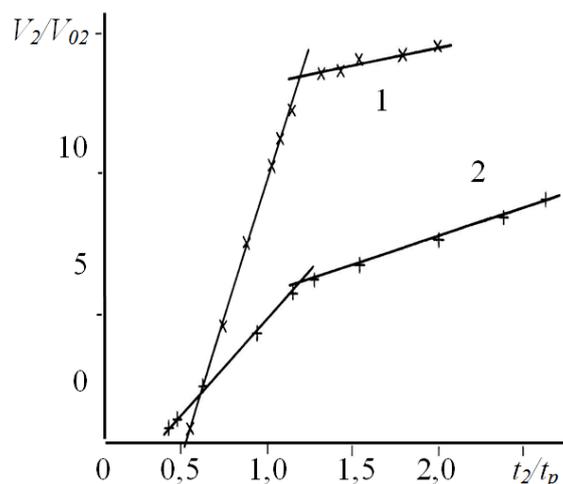


Рис. 4. Временная зависимость скорости ионов плазмоида

Для ИПД с тефлоном, фторопластом-4 в качестве рабочего тела в составе плазмоида преобладают ионы с массовыми числами 31, 50 и 69 – CF, CF<sub>2</sub> и CF<sub>3</sub> соответственно (масс-спектрограмма работы [6]). По результатам зондовых измерений данной работы среднее массовое число ионов плазмоида  $A_i \approx 53$ . Для плазмоидов ИПД-3 (рабочее тело BaCl<sub>2</sub> с полиуретаном в качестве связующего) принято  $A_i > 140$ . Оценки значений  $\tau_{ei}$ , соответствующих  $N_i$  и  $T_e$ , измеренным на расстоянии  $r_* \approx 23,0$  от среза ускорителя, свидетельствуют, что для плазмоидов ИПД-1,2,3 выполняется условие  $t_0 < \tau_{r_*}$  ( $\tau_{r_*} = \tau_{ei}(r_*)$ ). Значение параметра  $r_* \approx 23,0 \pm 0,5$  является граничным, характеризующим окончание стадии джоулева (теплого) ускорения и начало стадии бесстолкновительного разлета плазмоида, инжектируемого ИПД в вакуум.

Методология комплексной диагностики плазменных сгустков и струй в вакууме позволяет в реальной физической ситуации оценивать динамическое воздействие струй на образцы строительных материалов.

Модель позволяет в реальной физической ситуации определять структуру, плотность ионного тока, распределение плазмогазодинамических параметров, оценивать динамическое воздействие струй на образцы строительных материалов.

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Авдюшин С. И.** Использование плазменных ускорителей для изучения физических процессов в космосе / С. И. Авдюшин, И. М. Подгорный, Г. А. Попов и др. // Плазменные ускорители и ионные инжекторы. – М. : Наука, 1984. – С. 232 – 250.
2. **Boyd I. D.** Review of hall thruster plume modeling. // Journal Spacecraft and Rockets. – 2001. – 38, № 3. – P. 381 – 387.
3. **Асхабов С. Н.** Исследования струи стационарного плазменного ускорителя с замкнутым дрейфом электронов (УЗДП) / С. Н. Асхабов, М. П. Бургасов, А. Н. Веселовзоров и др. // Физика плазмы. – 1981. – 7, № 1. – С. 225 – 230.
4. **Лукьянов Г. А.** Сверхзвуковые струи плазмы. – Л. : Машиностроение, 1985. – 264 с.
5. **Левкович О.** Структура плазменных струй для модификации поверхности строительных материалов / О. Левкович, А. Цокур, Д. Лазученков // Теоретичні основи будівництва: сб. наукових праць. – Т. 14. (Варшава – Вильнюс, июнь 2006 г.) – С. 631 – 636
6. **Eckman R., Byrue L., Gatsonis N.A. et al.** Triple Langmuir probe measurements in the plume of a pulsed plasma thruster // Journal Propulsion and Power. – 2001. – 17, № 4. – P. 762 – 771.
7. **Gatsonis N. C., Eckman R., Yin X. et al.** Experimental investigations and numerical modeling of pulsed.
8. **Грановский В. Л.** Электрический ток в газе. – М. : Гостехиздат, 1952. – 432 с.
9. **Райзер Ю. П.** Физика газового разряда. – М. : Наука, 1987. – 592 с.
10. **Гришин С. Д., Лесков Л. В.** Электрические ракетные двигатели космических

аппаратов. – М. : Машиностроение, 1989. – 216 с.

11. **Чутов Ю. И., Кравченко А. Ю.** Влияние дополнительного охлаждения и нагрева электронов на разлет плазменных сгустков в вакуум // Физика плазмы. – 1983. – 9, № 3. – С. 655 – 658.

12. **Шувалов В. А.** Приближенные модели истечения сверхзвуковой струи газа в вакуум / В. А. Шувалов, О. А. Левкович, Г. С. Кочубей // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – 42, № 2. – С. 62 – 67.

УДК 622.4:532.595.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Ф. А. Корсун, к. т. н., асист.*

**Ключевые слова:** охлажденная вода, отепленная вода, неустановившееся движение жидкости, установившееся движение жидкости, гидравлический удар, процессы, давление

**Введение.** Многие физические явления, между которыми на первый взгляд нет ничего общего, подчиняются одним и тем же математическим законам.

Так, неустановившееся движение жидкости в трубопроводе и распространение тока вдоль электрической линии (как, впрочем, и переходные процессы в ряде других областей физики и техники) описываются уравнениями гиперболического типа. Это обстоятельство позволяет использовать результаты, полученные в одной области, для изучения и расчета процессов в другой.

**Анализ публикаций.** Наиболее дешевыми и удобными для исследования являются электрические модели. Такая модель была применена автором для изучения гидравлических ударов в шахтной гидравлической системе кондиционирования рудничного воздуха.

Альтернативой метода электрического моделирования принято считать математическое моделирование, т. е. решение поставленной задачи каким-либо численно-аналитическим методом.

Это не совсем верно, ибо математическое моделирование правомерно, когда верны исходные уравнения, описывающие изучаемый процесс. Последние должны выводиться не только умозрительно, но и на основе натурального, в частности, гидравлического эксперимента.

Другие авторы под термином «математическое моделирование» понимают более широкий круг действий:

- анализ изучаемого явления или работы технического устройства;
- выделение главных факторов, влияющих на процесс, и отбрасывание второстепенных – для упрощения исследования;
- построение физической модели;
- математическое описание этой модели;
- решение уравнений, описывающих процесс;
- сравнение решения с результатами исследования на физической модели и с натурой;
- корректировка математических уравнений и т. д. до получения удовлетворительного результата.

Однако их может восполнить также электрическая модель изучаемого процесса или устройства.

Поэтому уместно сравнивать электрическое моделирование как с численно-аналитическим расчетом, так и с гидравлическим экспериментом. При сравнении будем обращаться к конкретному примеру.

Изучалась работа гидравлической системы, представленной на рисунке 1. Охлажденная вода подается по вертикальному трубопроводу 3 на глубину 1 000 м и через гидрораспределитель 5 – на подземный горизонт, а отепленная – по обратному трубопроводу 4 наверх, при этом поток воды в месте сопряжения трубопроводов 3 и 4 периодически прерывается, в системе возникает гидравлический удар.

**Задача исследования** – определить параметры этого процесса, т. е. изменения давления и скорости жидкости во времени вдоль трубопроводов, и возможности уменьшения амплитуд