

# Газоразрядна плазма для прискорювача на основі плазмонаповненого діода

Є.І. Скібенко, О.М. Озеров, В.Б. Юферов

National Science Center “Kharkov Institute of Physics and Technology”, Kharkiv, Ukraine  
e-mail: [skibenko38@gmail.com](mailto:skibenko38@gmail.com), [ozerov@kipt.kharkov.ua](mailto:ozerov@kipt.kharkov.ua)

Одним із проблемних питань, пов'язаним з використанням плазмових комутаторів струму (ПКС) при створенні та експлуатації сільнострумових електронних прискорювачів (СЕР) прямої дії, є можлива нестабільність плазмового утворення в розрядному проміжку (РП) ПКС. Тому при виборі способів і засобів заповнення плазмою РП необхідно звертати увагу на це і аналізувати можливі наслідки виникнення цієї нестабільності. Відомо, що найбільш поширений спосіб заповнення - це використання плазмових гармат різного типу. Безсумнівно, що досить широкому використанню їх в експериментальній практиці з плазмовими комутаторами струму сприяли сильні сторони цієї плазмової технології: - досить висока густина плазми в згустку, до  $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ; - досить висока абсолютна енергоємність згустку порядку  $10^3 \text{ Дж}$ ; - досить висока загальна кількість прискорених частинок, близько  $10^{19} \text{ част/імп}$ ; - досить висока швидкість плазмового згустку близько  $3 \cdot 10^5 \text{ м/с}$  і більше, до  $8 \cdot 10^7 \text{ см/с}$ .

Поряд з цими перевагами слід відзначити деякі недоліки, які ускладнюють їх застосування в технології і практиці ПКС. Це неоднорідна структура згустку (головна частина і довгий хвіст), зайва протяжність плазмового згустку, недостатня повторюваність по плазмовим параметрам згустку, нерівномірний розподіл домішок по довжині згустку, невисокий енергетичний ККД,  $\sim 8,3\%$ , має місце радіальне розширення згустку і, відповідно, втрати на стінках за рахунок індукованих струмів величиною до 10 кА. Для усунення деяких з перерахованих вище недоліків були запропоновані і досліджені різні способи відсікання хвостовій частині згустку і зниження кількості домішок. В одному разі ця задача вирішувалася за допомогою окупольного магнітного поля. В іншому разі запропоновано спосіб отримання коротких плазмових згустків за рахунок застосування в часі поперечного магнітного поля. Вищенаведені способи покращують характеристики плазмових згустків, але досить сильно ускладнюють технологію отримання порівняно коротких і чистих згустків. Відзначимо також невисокий відсоток попадання плазми згустку в розрядний проміжок, це  $\sim 1\%$ . Таким чином, внутрішня і зовнішня нестабільність гарматної плазми не дозволяє досягати максимальної ефективності заповнення розрядного проміжку ПКС плазмою і, відповідно, оптимальних умов комутації струму.

З урахуванням проведеного аналізу стає нагальним пошук альтернативних методів заповнення міжелектродного простору ПКС плазмою, в яких умови створення і нагріву плазми забезпечується розвитком фізичних механізмів в самій плазмі, що призводять, наприклад, до самозбудження ВЧ - коливань, відповідальних за нагрів іонів. До них можна віднести пучково-плазмову нестійкість, відповідальну за розвиток пучково-плазмових розрядів (ППР), а також циклотронно-дрейфову нестійкість відбивного розряду (ВР), що забезпечують ефективний нагрів іонів плазми. Основні напрацювання, отримані при дослідженні цих двох розрядів, дозволяють зробити наступні висновки і рекомендації. Відомо, що існують чинники впливу, встановлені експериментально, що визначають ефективність комутації струму в установках з використанням ПКС. Це в першу чергу фактори, що визначають кількість плазми в розрядному проміжку, сталість множення  $\sigma I$ , де  $\sigma$  - електропровідність плазми, l - товщина плазмового шару і склад плазми. Оцінимо, з точки зору реалізації цих факторів, можливості використання вищеназваних розрядів (ППР і ВР). Їх основні параметри наведені в таблиці 1.

Діапазон плавно регульованої величини густини плазми в розряді ППР лежить в досить широкому інтервалі її значень від  $10^{11} \text{ см}^{-3}$  до  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . При цьому в розряді досягається 100% іонізація плазми і сталість атомно-молекулярного складу плазмового утворення. Для розрядів типу ВР цей діапазон дещо менше від  $10^{11} \text{ см}^{-3}$  до  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Наведені в таблиці 1 значення параметрів плазми, одержувані в розрядах ППР і ВР, відповідають вимогам факторів впливу. Таким чином, обидва вищеназвані розряда можуть бути рекомендовані для використання в технології ПКС для заповнення його РП плазмою. Обидва розряда можуть працювати в імпульсному, квазістаціонарному та стаціонарному режимах на різному рівні потужності. Оскільки в лабораторній практиці існує стенд, описаний в літературі, в якому в якості джерела плазми використовується розряд Пеннінга, зупинимось на цьому варіанті і досліджуємо його можливості для заповнення розрядного проміжку турбулентною плазмою.

На рис. 1 представлена схема експериментального пристрою. Його особливістю є наявність двох пар електродів різного призначення. Одна з них являє собою анодно-катодну систему осередку Пеннінга і служить для утворення плазми. Друга пара електродів утворює собою розрядний проміжок плазмового комутатора струму. На рис. 2-4 представлені часові характеристики створеної плазми. Вимірювання густини плазми проводилося за допомогою СВЧ інтерферометра. Довжина зондуєчої хвилі  $\lambda = 8 \text{ мм}$ ,  $n_{кр} = 1,8 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ . В якості робочих газів використовувалися Ar, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>. На рис. 2 представлені залежності часу утворення плазми від тиску. На рис. 3 наведені залежності часу існування плазми з  $n_p \geq n_{кр}$ . На рис. 4 показано часовий хід густини плазми, включаючи фазу її наростання і розпаду. Передній фронт залежності відповідає зростанню густини плазми до  $n_p = n_{кр}$ . Горизонтальна ділянка - густини  $n_p \geq n_{кр}$ . Задній фронт - густини  $n_p \leq n_{кр}$ .

Таблиця 1. Основні параметри ППР і ВР

Параметри плазми		Густина плазми, $\text{см}^{-3}$	Час утворення, мкс	Швидкість іонізації, $\text{см}^3/\text{с}$	Час існування, мкс	Ступень іонізації, %
Розряди	ППР	$10^{11} \div 2 \cdot 10^{15}$	$10 \div 20$	Ar $2 \div 8 \cdot 10^{-8}$ 20÷40 эВ	600	100
	ВР	$10^{11} \div 10^{14}$	$10 \div 60$	Ar $1 \cdot 10^{-7}$ 50 эВ Kr $0,75 \cdot 10^{-7}$ 50 эВ	$10^3$	100

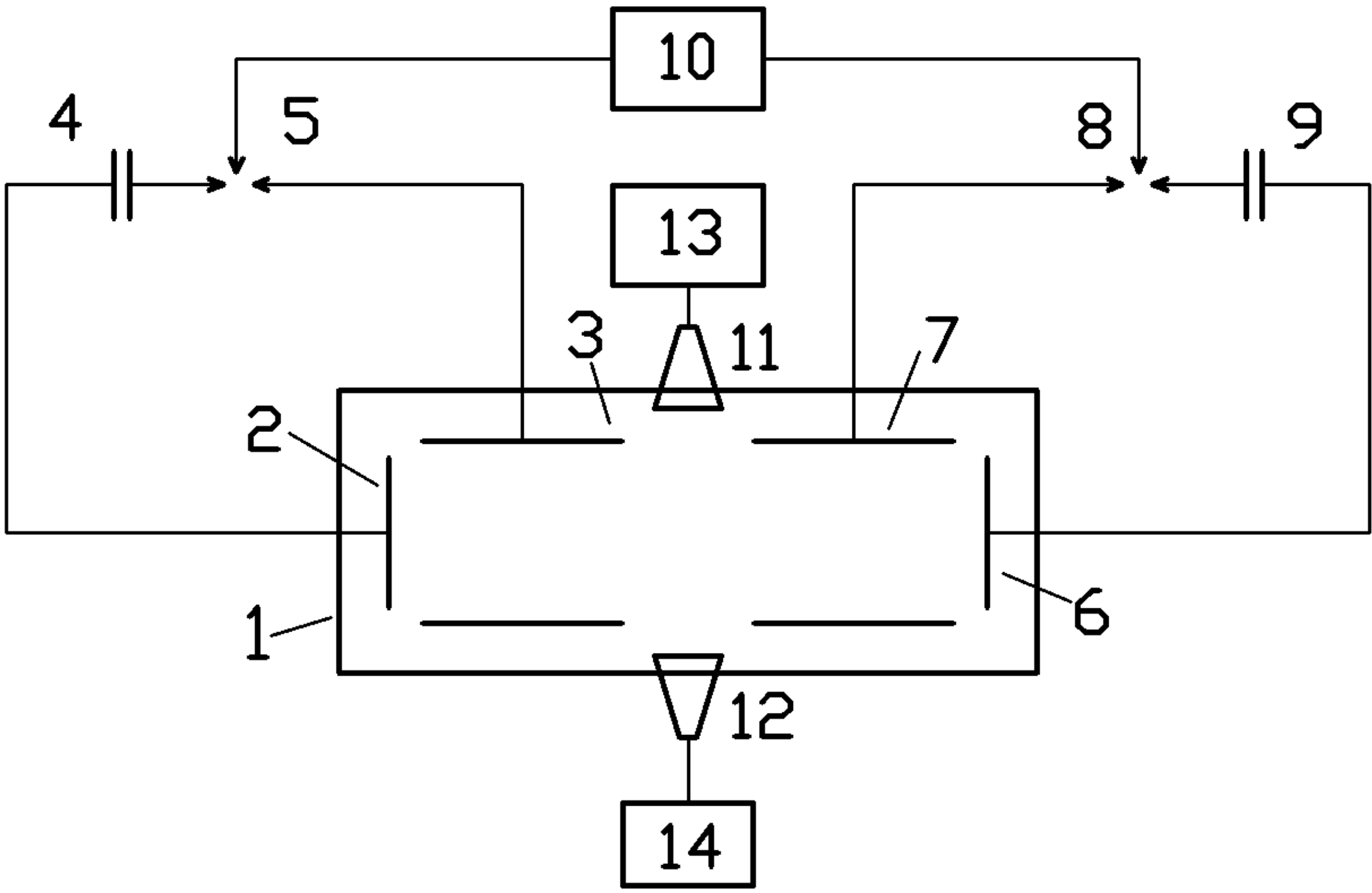


Рис. 1. Схема установки. 1 - Вакуумна камера; 2, 3 - катод і анод осередку Пеннінга; 4 - ємнісний накопичувач для живлення осередки Пеннінга, 5 - керований комутатор; 6, 7 - електродна система прискорювача; 8, 9 - ємнісний накопичувач і комутатор прискорювача; 10 - блок синхронізації і затримки; 11, 12- рупорні СВЧ антени; 13 - Генератор СВЧ діапазону; 14 - реєстратор сигналів.

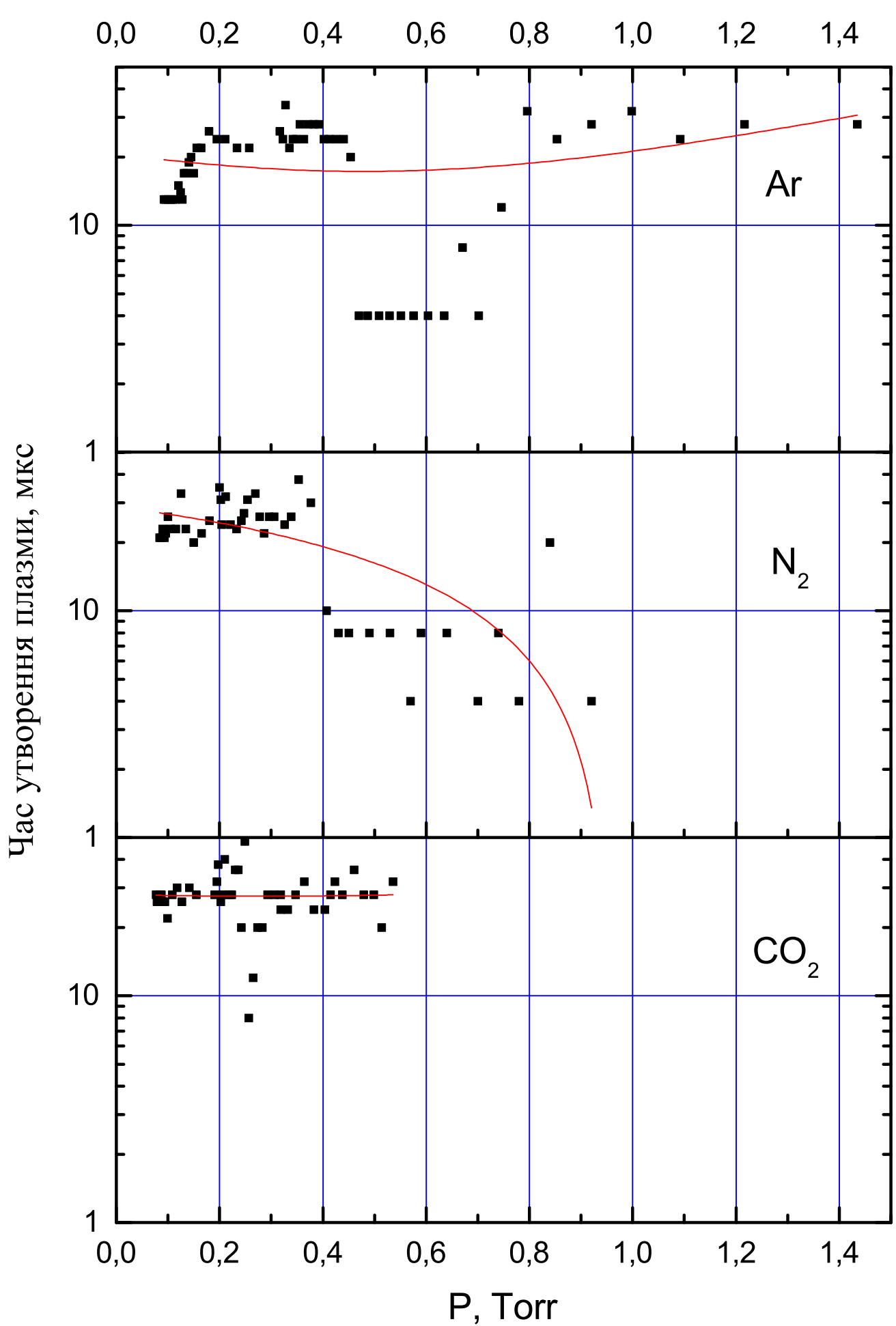


Рис. 2. Залежність часу утворення плазми від тиску для різних газів (Ar, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>)

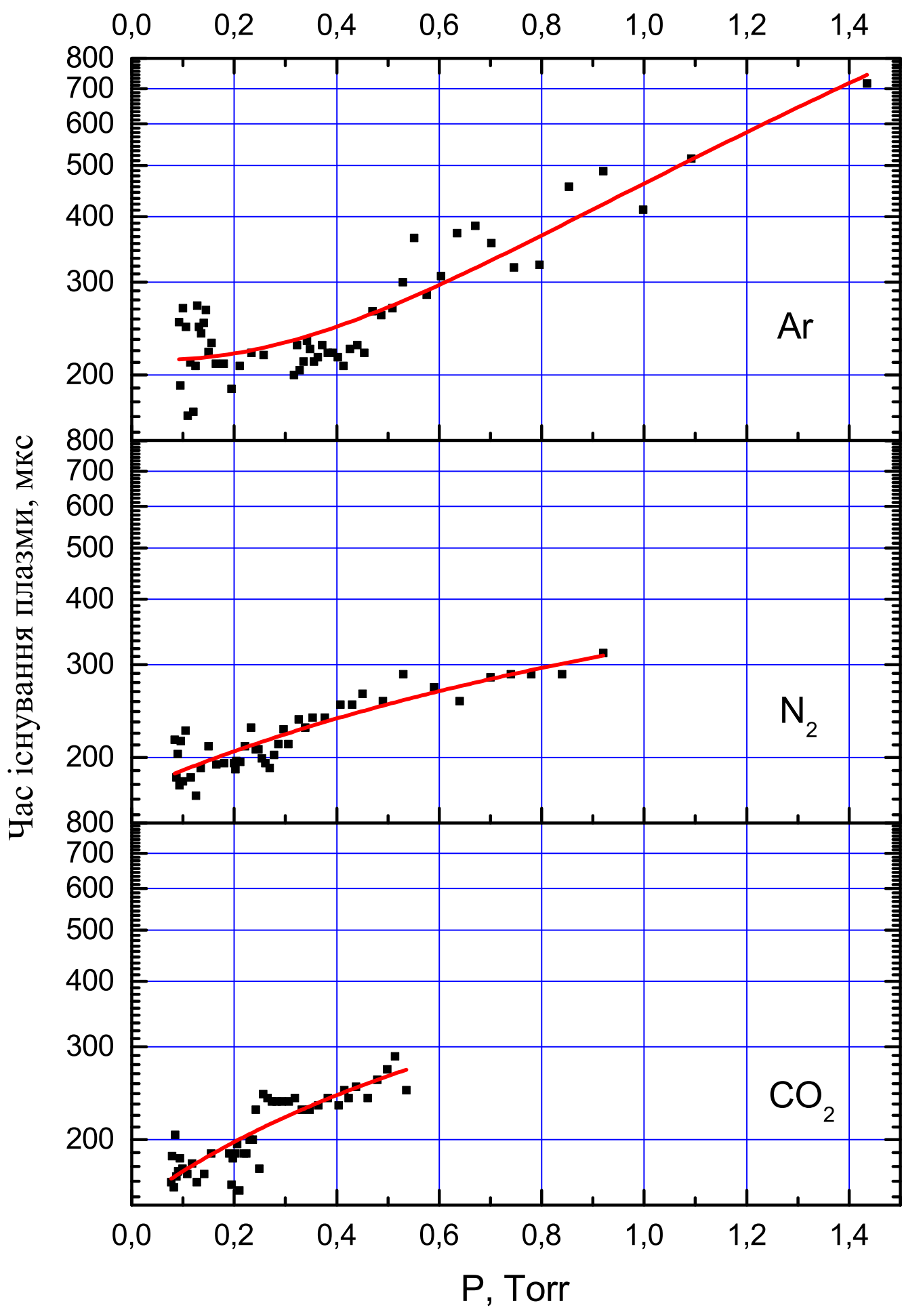


Рис. 3. Залежність часу існування плазми від тиску для різних газів (Ar, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>)

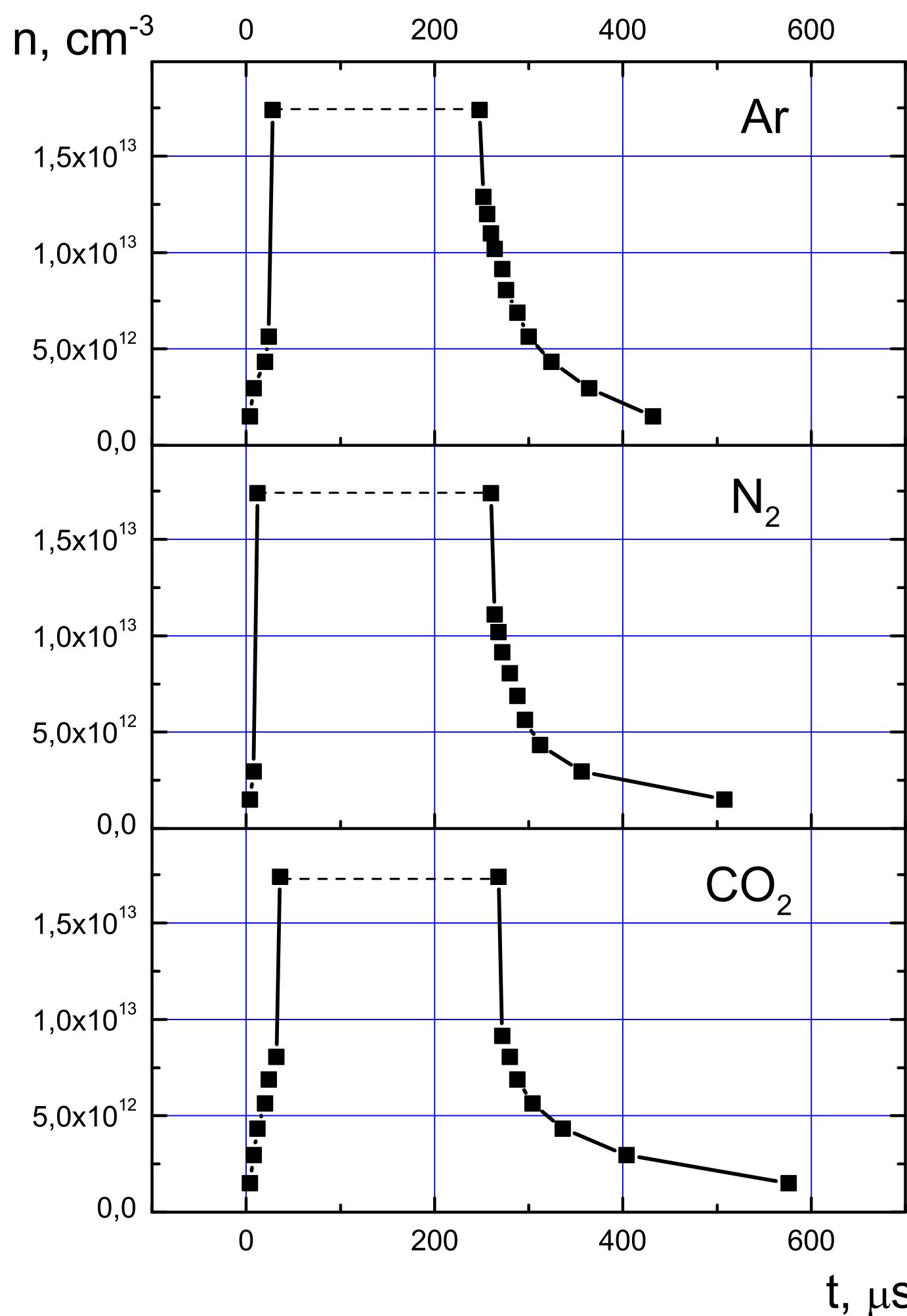


Рис. 4. Зміна густини плазми у часі, для різних газів, для тиску P = 0,43 Торр

**Висновки.** Проведені дослідження показали придатність використання газорозрядної плазми для заповнення розрядного проміжку плазмового комутатора струму.