

С 845 Н
Р- 598
ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

2042



В.Г. Рогозинский

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА
В ОБЛАСТИ ВЫХОДНОЙ ЩЕЛИ
ИОННОГО ИСТОЧНИКА ЦИКЛОТРОНА

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

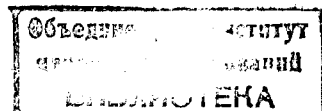
1965

2042

В.Г. Рогозинский

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА
В ОБЛАСТИ ВЫХОДНОЙ ЩЕЛИ
ИОННОГО ИСТОЧНИКА ЦИКЛОТРОНА

Направлено в ПТЭ



3134/2 чф

При подаче газа в газоразрядную камеру ионного источника /1/ в отсутствие разряда, когда достигается стационарный поток, в самой камере и в области за щелью устанавливается некоторое пространственное распределение давления газа. Характер изменения давления по длине трубки, через которую газ поступает в камеру источника, определяется ее диаметром и длиной, расходом и родом газа, режимом течения. Пространственное распределение давления газа в газоразрядной камере зависит от ее геометрии, от взаимного расположения отверстий, через которые газ попадает в камеру, выходной щели и зазоров у катода и антикатода, а также от расхода и рода газа, структуры струи, вытекающей из отверстий в камеру, и от скорости откачки через щель и зазоры. Распределение давления в области высокого вакуума за щелью зависит от того, будет ли поток, проходящий через щель, молекулярным или газодинамическим, что связано с отношением длины свободного пробега молекул в газоразрядной камере к ширине щели. Однако во время существования разряда в источнике, когда определенная часть ионов вытягивается ускоряющим напряжением, безусловно, картина распределения давлений как в самой камере, так и за щелью значительно усложняется, причем некоторая часть газа вытекает из щели. В среднем по времени существует некоторое давление в области за щелью, абсолютная величина которого, очевидно, будет меньшей, чем в случае отсутствия разряда, что, вероятно, и дает возможность поддержания высокого напряжения на дуантах. При выключении источника и наличии потока газа наблюдаются пробои в ускоряющем промежутке.

Изучение распределения давления внутри камеры может дать дополнительные сведения о процессах в разряде, а в области за щелью—позволит судить о возможном влиянии на электрическую прочность ускоряющего промежутка с вытягивающей линзой или щелевой оптикой, а также о влиянии на процессы перезарядки ионов, выходящих из щели с относительно небольшой энергией.

Для определения режима течения газа через отверстия в газоразрядной камере, которые представляют из себя цилиндрический канал $d = 1 - 1,5$, длиной 8 мм, необходимо знать давление газа непосредственно в области перед входом в эти каналы. На рис. 1 схематически изображен в разрезе один из вариантов газоразрядной камеры. По величине расхода газа, диаметра трубки и ее длины, а также по величине давления газа перед отверстием в игольчатом натекателе невозможно теоретически определить давление в конце трубки у газоразрядной камеры и в этом месте его трудно измерить. Поэтому были проведены измерения давления в сечении трубки на расстоянии 1,8 метра от натекателя в зависимости от расхода для различных газов. Давление измерялось специально изготовленным ртутным U-образным закрытым

манометром, измеряющее колено которого переходит в трубку меньшего диаметра, заполненную вакуумным маслом^{/2/}. Пределы измерения 1-10 тор, точность $\pm 0,25$ тор. Расход газа измерялся градуированной бюреткой. Длина трубки от натекателя до трубки в источнике была равна 2,3 м, а ее диаметр - 0,2 см, длина трубки в источнике - 4,5 м, диаметр - 0,4 см. Измерения проводились на вакуумной системе циклотрона У-300^{/3/} с ионным источником, у которого выходная щель имела размеры 2,5x20 мм², а подача газа в разрядную камеру осуществлялась через два канала диаметром 1,5 мм и длиной 8 мм, расположенных вблизи катода, примерно на расстоянии 5 см от него. На рис. 2 даны кривые давления в зависимости от расхода газа для воздуха, CO₂, Ar и Ne. Так как давление в этом месте не превышает 8 тор, то, очевидно, расход газа определяется площадью диафрагмы, образованной иглой и седлом натекателя. В этом случае при $p_1/p_a \leq 0,1$, где p_a - атмосферное давление перед диафрагмой, а p_1 - давление за натекателем в трубке, поток газа описывается формулой для тонкой диафрагмы^{/4/}. Эту формулу можно использовать для пересчета градуировочной кривой зависимости расхода по другим газам от числа оборотов штока регулирующего натекателя.

Для рассматриваемого нами случая поток через трубку является вязкостным, и для вычисления p_2 можно использовать формулу Пуазейля. Были вычислены давления на конце резиновой трубки при $R = 0,15$ см и $L = 50$ см для Ne и CO₂, а значение p_1 и Q брались из соответствующих кривых. Затем по значениям давления в конце резиновой трубки по той же формуле были вычислены давления p'_2 в области входа в каналы газоразрядной камеры. Для неона при $Q = 10$ лмтор/сек $p'_2 = 2,3$ тор, при $Q = 24$ лмтор/сек $p'_2 = 4,2$ тор; для CO₂ при $Q = 20$ лмтор/сек $p'_2 = 1$ тор и при $Q = 40 \frac{\text{лмтор}}{\text{сек}}$ $p'_2 = 4$ тор. Из этих данных следует, что поток через каналы в стенке газоразрядной камеры также вязкостный, так как длина свободного пробега значительно больше диаметра канала.

Газ из отверстий будет вытекать в вакуум в форме расширяющейся струи, в которой плотность и скорость будут падать по направлению к периферии. Ядро струи, в которой плотность и скорость газа сохраняются такими же, как в области канала, будет рассеиваться на некотором расстоянии от выходного отверстия^{/5/}. Среднее давление газа в разрядной камере можно определить по формуле

$$p = Q/S_k,$$

где Q - поток газа, S_k - суммарная скорость откачки разрядной камеры через выходную щель и зазоры, имеющиеся в области катода и антикатода. В случае молекулярного истечения газа в область высокого вакуума для воздуха при $t = + 25^\circ\text{C}$ $S_k = 11,8\text{A л/сек}$, а для вязкостного - $S'_k = 20\text{A л/сек}$, где A - суммарная площадь диафрагмы в см².

При площади щели $1 \times 0,25$ см² и суммарной площади зазоров на торцах камеры $2 \times 0,8$ см² для $Q = 30$ лмтор средние давления будут равны $p = 1,7 \cdot 10^{-3}$ тор; $p' = 10^{-3}$ тор. Измерения среднего давления в разрядной камере дали величину порядка 10^{-3} тор^{/6/}.

При таком давлении средняя длина свободного пути молекул - около 5 см, что значительно больше поперечных размеров камеры и щели. Поэтому по направлению к катодам режим течения газа, вероятнее всего, будет молекулярным. При расположении отверстий против выходной щели может иметь место такая величина давления перед щелью, что длина свободного пробега становится меньше ее ширины, и, следовательно, осуществляется вязкостный поток. Возможная картина распределения давления газа по оси разрядной камеры имеет вид кривой с максимумом в месте расположения отверстий и двумя симметрично спадающими ветвями, близкими к прямым линиям, соответствующим падению давления при молекулярном потоке.

Для выяснения характера распределения давления газа за щелью в области высокого вакуума были проведены измерения давления в зависимости от расстояния по направлению, перпендикулярному плоскости щели. Измерения проводились в вакуумной камере стенда источника^{/7/}. Источник имел щель $2,5 \times 10$ мм², три канала $\phi = 1$ мм, расположенные против щели, как показано схематически на рис. 1. Заборная трубка для измерения давления длиной 1,8 м и внутренним диаметром 14 мм могла передвигаться через уплотнение в стенке камеры, а снаружи к трубке был подсоединен манометр ЛМ-2. Плоскость отверстия заборной трубки составляла с плоскостью щели угол 30° . В ионный источник подавался воздух, его расход измерялся методом градуированной бюретки. На рис. 3 (сверху) показаны кривые изменения давления с расстоянием от щели для различных величин расхода газа. Из этих кривых следует, что давление вблизи щели падает довольно быстро и с увеличением расстояния его величина приближается к среднему давлению в камере.

Распределение потоков молекул в плоскости XOY, параллельной плоскости прямоугольной щели со сторонами $2a$ и $2b$, находящейся от нее на расстоянии h , описывается довольно громоздкой формулой^{/8/}, которую мы здесь не приводим. Из этой формулы при $X = 0, Y = 0$ и $a < h$, $b < h$, можно получить приближенно:

$$q = 4abq_0/\pi h^2, \quad (1)$$

где q_0 - поток молекул, выходящий из щели. Формула (1) будет верна для рассматриваемого нами случая прямоугольной щели $a = 0,5$, $b = 0,125$ см и $b \geq 1$ см. При этом давлении

$$p = (4ab/\pi h^2) p_0 + p_1, \quad (2)$$

где p_1 - среднее давление в камере, определяемое суммарным потоком газа через источник и натеканием в камеру. Если газ в источник не подается, то $p_0 = 0$ и $p = p_1$, где p_1 - предельный вакуум в камере. При $h \rightarrow \infty$ $p \rightarrow p_1$, т.е. к среднему давлению в камере.

На рис. 3 (внизу) показано отношение p/p_0 как функция расстояния до плоскости щели. 1' - экспериментальные данные. Кривая 2' - вычислена по формуле (2) $p_0 = 1.10^{-4}$ тор и $p = 5.10^{-5}$ тор. Зависимость 3' - вычислена по эмпирической формуле $p/p_0 = c/h + p_1/p_0$, где p , p_0 и p_1 равны 5.10^{-5} тор, 1.10^{-4} тор и $1.7.10^{-5}$ тор соответственно; $h = 1$ см, при этом C , определенное из этой формулы, равно 0,33.

Из этих кривых следует, что падение давления по длине струи отклоняется от закономерности для молекулярного потока и на малых расстояниях ближе к $1/h$, а с ростом расстояния подходит к зависимости $1/h^2$.

Это указывает на то, что в области разрядной камеры перед щелью существует такое давление, при котором длина свободного пробега значительно меньше ширины щели, что, в свою очередь, приводит к отклонению от молекулярного течения. Действительно, длина свободного пробега будет иметь величину меньше ширины щели 0,25 см при давлениях выше 2.10^{-2} тор, что вполне реально, если учесть, что на выходе струи из отверстия давление может составлять несколько тор. Поэтому при подсчете среднего давления в разрядной камере для получения значения скорости откачки через щель надо пользоваться формулой для вязкостного истечения. Необходимо заметить, что к абсолютным значениям измеренных давлений следует подходить осторожно, так как здесь погрешность измерения может быть высокой из-за большой длины трубки, большой величины диаметра входного отверстия по сравнению с размерами щели и за счет расположения плоскости отверстия. Как следует из кривых (1, 2, 3), давление, измеряемое манометром ЛМ-2, с заборной трубкой на больших расстояниях от щели, выше примерно в 1,5 раза давления, измеренного манометром ЛМ-2, установленным на вакуумной камере. Однако ход изменения самих кривых давления и отношения давлений дает основание считать приемлемой картину распределения давления в области за щелью.

В заключение автор приносит благодарность члену-корреспонденту АН СССР Г.Н. Флерову за постановку задачи, А.С. Пасюку и Н.А. Тужикову за содействие и помощь в проведении опытов.

Л и т е р а т у р а

1. Го Ци-цзянь, А.С. Пасюк и др. Получение многозарядных ионов неона в импульсном источнике для циклотрона. Препринт ОИЯИ, 924, Дубна, 1982.

2. Р. Яккель. Получение и измерение вакуума. ИЛ, 1952.
3. И.Ф. Малышев, В.Г. Рогозинский. Вакуумная система циклотрона многозарядных ионов У-300. Препринт ОИЯИ, 1398, Дубна, 1983.
4. А. Гутри, Р. Уокерлинг. Вакуумное оборудование и вакуумная техника, ИЛ, 1951.
5. Н.И. Ющенко. Структура осесимметричной струи, истекающей в вакуум. Сб. "Проблемы энергетики", Энергоиздат, 1958.
6. Ю.Р. Пигаров, П.М. Морозов, ЖЭТФ, XXXI, № 4, 467, 1981.
7. А.С. Пасюк и др. Препринт ОИЯИ, 1528, Дубна, 1984.
8. В.И. Лозгачев. ЖЭТФ, XXXI, 8, 1012, 1982.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 марта 1985 г.

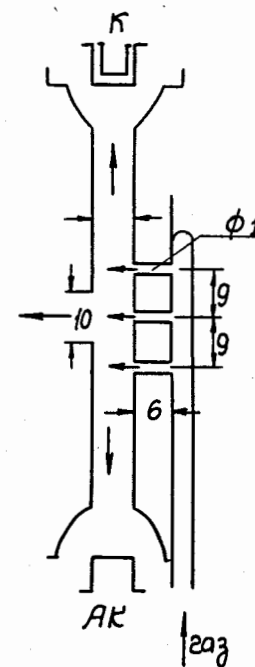


Рис. 1. Схема газоразрядной камеры ионного источника:
К - катод, АК - антикатод.

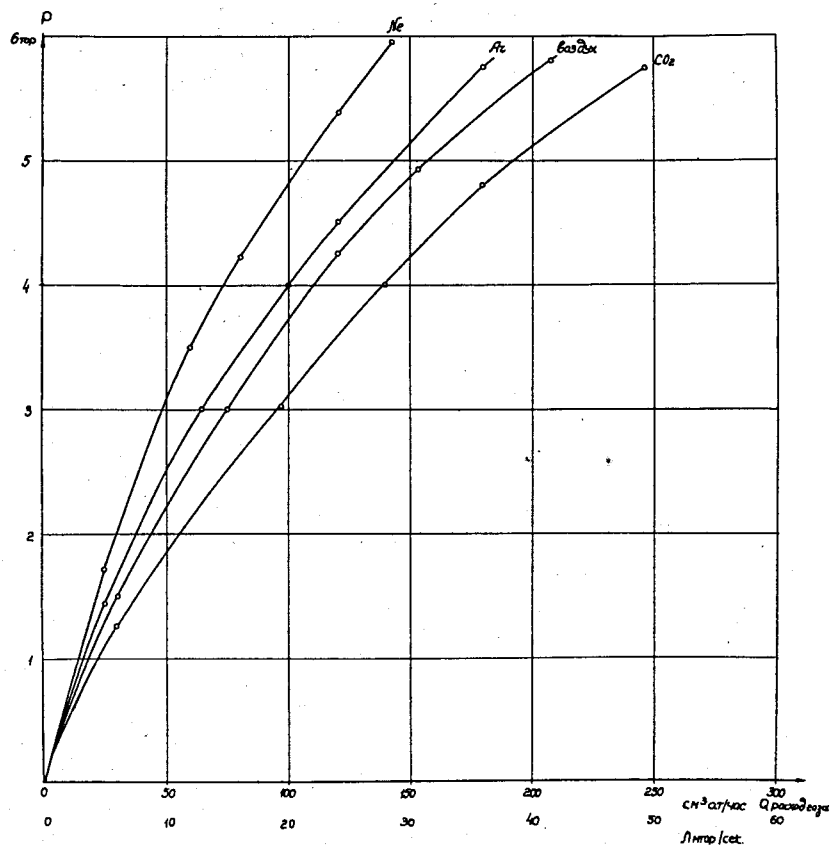


Рис. 2. Кривые изменения давления в зависимости от расхода Ne , Ar , воздуха, CO_2 .

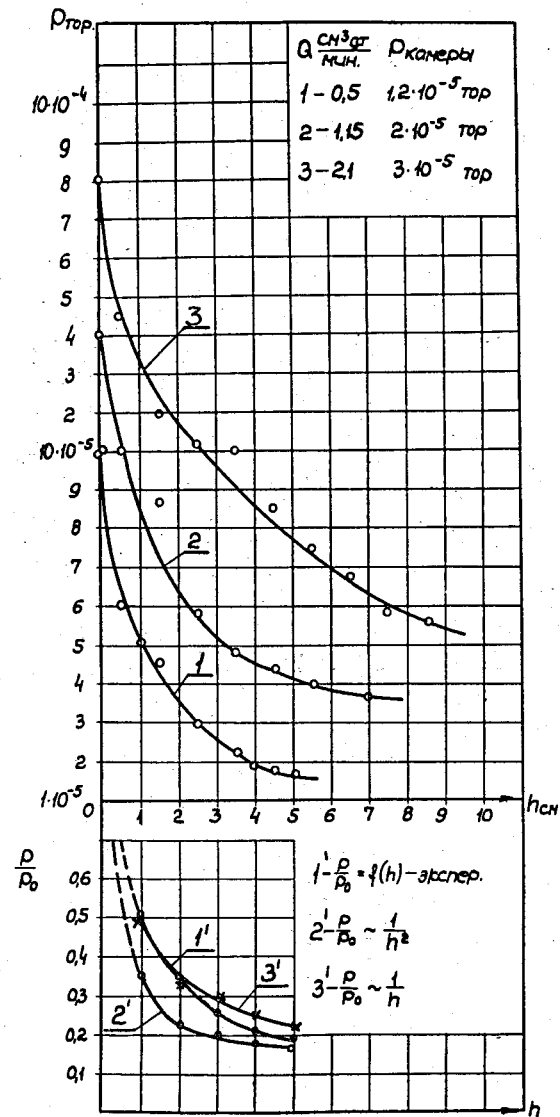


Рис. 3. Кривые изменения давления для различной величины потока газа через источник (вверху) и относительного изменения давления для $Q = 0,5 \frac{cm^3}{мин} ат$ в зависимости от расстояния до плоскости щели.