

УДК 621.384.663

УСТРОЙСТВО ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ОТКАЧКИ

Е. В. Домаров, Ю. И. Голубенко, Н. К. Куксанов,
Р. А. Салимов, С. Н. Фадеев, И. К. Чакин

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mails: domarov88@mail.ru, golubenk@inp.nsk.su, kuksanov@inp.nsk.su,
rsalimov41@mail.ru, S.N.Fadeev@inp.nsk.su, chak_in2003@bk.ru

Приводится описание конструкции выпускного устройства электронов с использованием дифференциальной откачки. Дана оценка условий перехода от вязкостного режима к молекулярному, позволяющая подтвердить правильность выбора параметров системы дифференциальной откачки. Решена проблема теплосъема с диафрагм системы дифференциальной откачки в компактном цельнометаллическом корпусе выпускного устройства.

Ключевые слова: дифференциальная откачка, выпускное устройство, ускоритель электронов.

DOI: 10.15372/PMTF20220107

Введение. В середине 70-х гг. XX в. в Институте ядерной физики (ИЯФ) СО РАН было разработано устройство для вывода в атмосферу сфокусированного электронного пучка. Несколько ускорителей ЭЛВ-4 с подобным выпускным устройством было установлено в СССР. Непосредственно в ИЯФ в течение 30 лет на ускорителе ЭЛВ-6 работает такое устройство, имеющее статус уникальной научной установки (<http://ckp-rf.ru/usu/200984>). На этом ускорителе, как и на ранее изготовленных ЭЛВ, используется ускорительная трубка с магнитным сопровождением пучка. Постоянные магниты установлены непосредственно на электродах внутри ускорительной трубки. Конструкция и изготовление таких ускорительных трубок достаточно сложны. В настоящее время в ускорителях ЭЛВ используются более простые в изготовлении и надежные ускорительные трубки без магнитного сопровождения, имеющие большую (10 см) апертуру. Учитывая высокую надежность данных ускорительных трубок, а также сложность почти утерянной технологии изготовления трубок с магнитным сопровождением, поставлена задача замены в ускорителе с устройством для вывода в атмосферу сфокусированного пучка ускорительной трубки с магнитным сопровождением на ускорительную трубку с большой апертурой без магнитного сопровождения. Кроме того, предполагалось существенно уменьшить габариты устройства.

На ускорителе ЭЛВ-4 были проведены экспериментальные исследования динамики пучка в ускорительной трубке с большой апертурой. По результатам экспериментов была выбрана оптическая схема выпускного устройства и дана оценка минимального диаметра пучка (размера отверстий в диафрагмах выпускного устройства) [1].

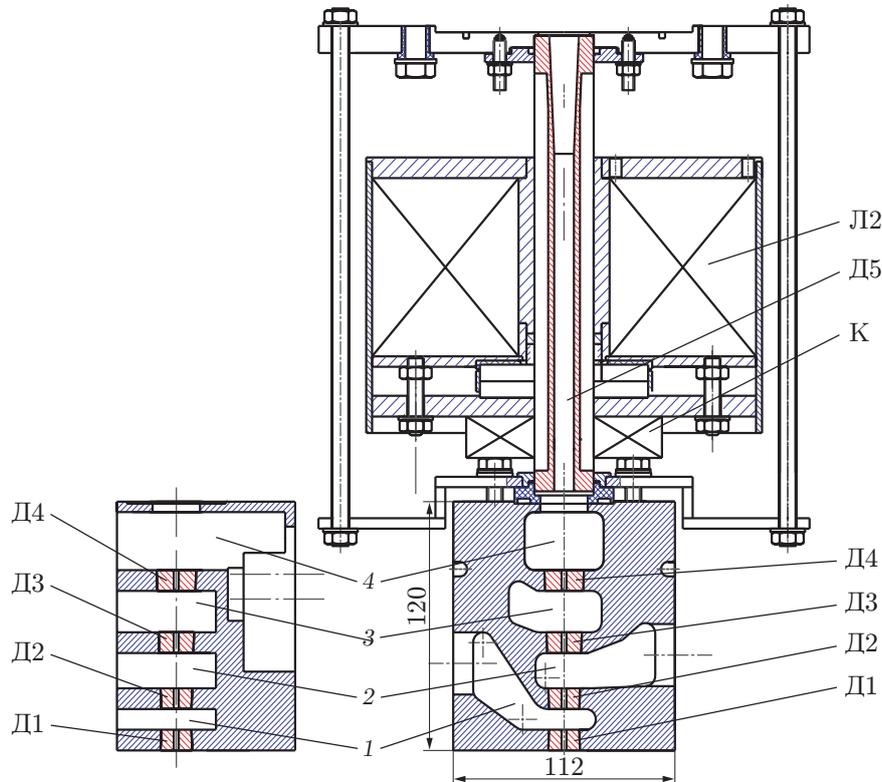


Рис. 1. Схема выпускного устройства:

Д1, Д2, Д3, Д4 — диафрагмы с отверстиями диаметром 2,5; 3,0; 4,0; 4,5 мм соответственно; Д5 — водоохлаждаемая диафрагма с отверстием диаметром 10 мм и длиной 200 мм; Л2 — электромагнитная фокусирующая линза с постоянными магнитами; К — катушки коррекции; 1–4 — ступени откачки

Конструкция устройства для обеспечения перепада давления с применением дифференциальной откачки. Рассматриваемое выпускное устройство создавалось для вывода в атмосферу из вакуума (давление 10^{-6} Торр (10^{-8} Па)) электронного пучка мощностью до 100 кВт на ускорителе ЭЛВ-6 [2]. Основным узлом выпускного устройства является медная коробка, состоящая из четырех ступеней дифференциальной откачки (рис. 1). С ней стыкуется узел с магнитной линзой, содержащий трубку с повышенным вакуумным сопротивлением. В случае если пучок имеет ненулевой эммитанс, некоторая часть этого пучка попадает на диафрагмы, разделяющие ступени устройства дифференциальной откачки. Для того чтобы диафрагмы не плавилась и не испарялись, требуется их интенсивное охлаждение. Для оперативного обслуживания диафрагмы должны быть быстроменяемы.

С учетом сказанного выше коробка изготовлена из цельного куска меди длиной вдоль пучка $h = 120$ мм с сечением размером 100×90 мм. Аналогичные устройства, в которых диафрагмы расположены непосредственно вблизи выхода, используются для вывода в атмосферу технологических пучков с низкой энергией. В ИЯФ ранее было разработано такое устройство [3], в котором диафрагмы системы дифференциальной откачки устанавливались в корпус выпускного устройства с помощью резьбы. Однако резьба окислялась, что ухудшало тепловой контакт. Это выпускное устройство позволило вывести в атмосферу через отверстие диаметром $2,5 \div 3,0$ мм адиабатически сжатый электронный пучок с энергией 800 кэВ и мощностью 500 кВт. Срок службы диафрагм составлял несколько часов.

В корпус описываемой коробки впаяна медная трубка, с помощью которой охлаждается весь ее объем. Коробка разделена тремя перегородками на четыре ступени откачки. При мощности токооседания несколько киловатт коробка должна нагреваться не более чем на $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При разработке коробки было решено избавиться от электрических и водяных вводов в вакуумную камеру. Электрические вводы необходимы для контроля оседания тока на изолированные диафрагмы, которые необходимо охлаждать. Отсутствие вводов воды и электричества должно упростить конструкцию. В итоге было решено конструировать выпускное устройство, показанное на рис. 1.

Размер отверстий в диафрагмах установлен в соответствии с расчетным значением огибающей пучка. Линза и катушки коррекции расположены вне вакуумной камеры. Диафрагма Д5, охлаждаемая водой, подаваемой в трубку, впаянную в корпус диафрагмы, рассчитана на снятие мощности порядка $1,0 \div 1,5$ кВт и изолирована изоляторами из капролона, которые применяются в ускорителях ЭЛВ в течение многих лет. Диафрагмы Д1–Д4 охлаждаются за счет непосредственного контакта с медным корпусом выпускного устройства. Контролировать отдельно силу тока каждой из диафрагм Д1–Д4 не представляется возможным, поскольку они имеют электрический контакт с корпусом. Корпус выпускного устройства изолирован от земли, сила подаваемого на него тока соответствует суммарной силе тока оседания на диафрагмы Д1–Д4. Путем охлаждения корпуса можно снять мощность до $1 \div 2$ кВт, при условии что каждая из четырех диафрагм способна принимать мощность до $0,5$ кВт. Проблемой является охлаждение непосредственно диафрагм, которые вставляются в перегородки коробки. Использование прижимных болтов в очень ограниченном объеме (особенно по вертикали) затруднительно и нетехнологично. Известно, что теплопроводность контактов металлов низка, если давление прижатия невелико. В то же время теплопроводность контакта становится практически равной теплопроводности контактирующих металлов, если давление превышает предел их текучести σ_T . Предположим, что диафрагма, сквозь которую проходит пучок, начинает нагреваться ореолом пучка, при этом она расширяется и начинает давить на обойму (посадочное место в корпусе коробки), в которой находится, и при достижении некоторой температуры ΔT давление достигает значения σ_T и теплопроводность контакта становится равной теплопроводности меди. Оценим эту температуру:

$$\frac{\Delta D}{D} = \alpha \Delta T.$$

Здесь ΔD — увеличение диаметра диафрагмы; α — коэффициент линейного расширения; ΔT — осредненный по радиусу диафрагмы прирост температуры.

Из закона Гука следует

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{\sigma_T}{E}$$

(E — модуль Юнга). Тогда искомое изменение температуры равно

$$\Delta T = \frac{\sigma_T}{\alpha E}. \quad (1)$$

Подставляя в (1) справочные значения σ_T , α , E для меди, получаем $\Delta T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этой величине изменения осредненной по радиусу температуры диафрагмы можно считать, что теплопроводность контакта становится близкой к теплопроводности λ меди. Оценим мощность, которая может быть снята с диафрагмы в данном случае (тепло выделяется на кромке отверстия диафрагмы, а прирост осредненной по радиусу температуры

составляет $\Delta T = 300 \text{ }^\circ\text{C}$). Действительно, температура диафрагмы $T(r)$ и температура кромки отверстия $T_{\text{отв}}$, где выделяется тепло, определяются формулами

$$T(r) = T_{\text{отв}} - \frac{P \ln(r/a)}{2\pi d\lambda}, \quad T_{\text{отв}} = 50 + \frac{P \ln(r/a)}{2\pi d\lambda},$$

где r — текущий радиус диафрагмы; $a = 1,25 \text{ мм}$ — радиус отверстия; P — мощность, Вт; $\lambda = 400 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ — теплопроводность меди; $d = 10 \text{ мм}$ — высота диафрагмы; 50 — температура на стенке охлаждения, $^\circ\text{C}$.

Перепад температуры составляет:

— на диафрагме (между отверстием и точкой контакта с коробкой)

$$\Delta T_{\text{д}} = \frac{P \ln(R/a)}{2\pi d\lambda};$$

— на коробке (между точкой контакта с диафрагмой и водой)

$$\Delta T_{\text{охл}} = \frac{P \ln(Z/R)}{2\pi d\lambda}$$

($R = 5 \text{ мм}$ — радиус диафрагмы; $Z = 50 \text{ мм}$ — эквивалентный радиус контура охлаждения).

При мощности $P = 1 \text{ кВт}$ значения данных температур равны $\Delta T_{\text{д}} = 57 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta T_{\text{охл}} = 94 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{отв}} = 201 \text{ }^\circ\text{C}$.

Используя осредненные по радиусу температуры

$$T_{\text{д}}^{\text{ср}} = T_{\text{отв}} - \frac{P}{2\pi d(R-a)\lambda} \left(R \ln \frac{R}{a} - (R-a) \right),$$

полагая $a \ll R$ и подставляя $T_{\text{отв}}$, получаем

$$T_{\text{д}}^{\text{ср}} = 50 - \frac{P}{2\pi d\lambda} \ln \frac{Z}{a} - \frac{P}{2\pi d\lambda} \left(\ln \frac{R}{a} - 1 \right).$$

При $P = 1 \text{ кВт}$ $T_{\text{д}}^{\text{ср}} = 184 \text{ }^\circ\text{C}$, т. е. приблизительно полусумме крайних значений.

Для элемента коробки между точкой контакта с диафрагмой и водой имеем

$$T_{\text{охл}}^{\text{ср}} = 50 + \frac{P}{2\pi d\lambda} \ln \frac{Z}{a} - \frac{P}{2\pi d(Z-R)\lambda} \left(Z \ln \frac{Z}{a} - R \ln \frac{Z}{a} - (Z-R) \right).$$

При мощности $P = 1 \text{ кВт}$ средняя температура этого участка равна $90 \text{ }^\circ\text{C}$, т. е. также приблизительно полусумме крайних значений в этой зоне. Исходя из условия $T_{\text{д}}^{\text{ср}} - T_{\text{охл}}^{\text{ср}} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ находим $P = 3,2 \text{ кВт}$, $T_{\text{отв}} = 643 \text{ }^\circ\text{C}$. Это означает, что при передаче диафрагме мощности $3,2 \text{ кВт}$ она не должна плавиться и изменять форму. Это справедливо лишь при условии, что медная трубка, впаянная в корпус коробки, нагревается до температуры, не превышающей нескольких десятков градусов, при полной мощности несколько киловаттов, т. е. обеспечивается нормальная теплопередача от корпуса к воде. В системе охлаждения коробки предусмотрено измерение разности температур воды на входе в коробку и выходе из нее $T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}$. Разность этих температур, равная $1 \text{ }^\circ\text{C}$, соответствует 200 Вт , т. е. при токооседании несколько киловаттов температура $T_{\text{вых}}$ не превышает $40 \div 50 \text{ }^\circ\text{C}$.

Поскольку при мощности менее 3 кВт перепад температур на диафрагме и участке охлаждения уменьшается, удлинение диафрагмы меньше и значение σ не достигает предела текучести $\sigma_{\text{т}}$. Следовательно, теплопроводность контакта уменьшается и температура диафрагмы увеличивается, что обеспечивает необходимую теплопередачу. Поэтому даже в случае попадания на диафрагму малого количества электронов ее температура достаточно высока (приблизительно $200 \div 300 \text{ }^\circ\text{C}$), несмотря на малый теплоперенос.

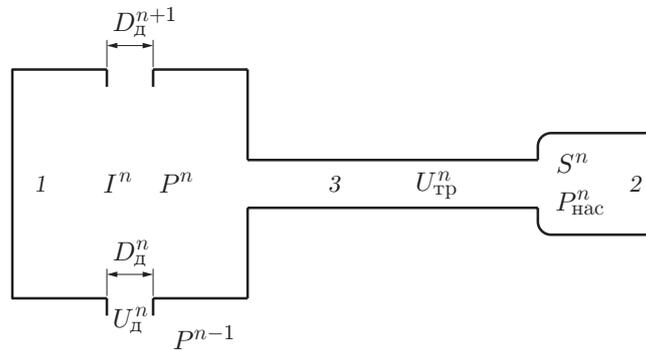


Рис. 2. Схема для вакуумного расчета ступеней дифференциальной откачки:
1 — камера, 2 — насос, 3 — трубка

В процессе эксплуатации возникали аварийные ситуации, когда на диафрагмы кратковременно (приблизительно в течение 1 с) передавалась мощность до 5 кВт, однако диафрагмы не разрушались, что соответствует приведенным выше оценкам. Длительная эксплуатация показала, что срок службы диафрагм является большим и данный метод может широко использоваться.

Расчет давления в условиях дифференциальной откачки. Проектный перепад давления на участке между атмосферой и четвертой ступенью приблизительно 10^5 , т. е. давление в четвертой ступени $P_4 \approx 10^{-2}$ Торр. Будем полагать, что диаметр отверстия в диафрагме Д1, через которую воздух поступает в коробку, должен быть приблизительно равен 2,5 мм, а массовый расход газа $I^n \approx 10^3$ (л·Торр)/с. На рис. 2 приведена схема для вакуумного расчета ступеней откачки. В первых трех ступенях течение газа является вязкостным, в четвертой — переходным, в пятой и шестой — молекулярным. Шестой ступенью является ускорительная трубка, рабочее давление в которой составляет 10^{-6} Торр (10^{-8} Па). Поскольку для понимания процессов газовой динамики в устройстве расчет является упрощенным, в данной работе не рассматриваются струйные эффекты, а также влияние нагрева поступающего газа электронным пучком. При этом будем полагать, что давление в откачивающих насосах значительно меньше давления в откачиваемой ступени. Поток газа, поступающий из предыдущей ступени, удаляется откачивающим насосом, а в следующую ступень поступает лишь незначительная часть этого потока.

Введем следующие обозначения: D_d^n — диаметр отверстия n -й диафрагмы, см; U_d^n — проводимость n -й диафрагмы, л/с (в случае вязкостного режима $U_d^n = 16(D_d^n)^2$); $U_{тр}^n$ — проводимость трубопровода n -й ступени (на участке от камеры до насоса), л/с, определяемая по формуле $U_{тр}^n = 181(P^{n-1} + P^n)(d^n)^4/(2L^n)$ для вязкостного режима и $U_{тр}^n = 12,1(d_{тр}^n)^2/L_{тр}^n$ для молекулярного режима; d^n — диаметр трубопровода, см; L^n — длина трубопровода на участке от камеры ступени n до насоса, см; S^n — скорость откачки с помощью насоса n -й ступени, л/с; P^n — давление в n -й ступени, Торр; $P_{нас}^n$ — давление на входе насоса n -й ступени; I^n — массовый расход газа в n -ю ступень, (л·Торр)/с. Для любой ступени массовый расход газа, поступающего через отверстие в диафрагме D_d^n из предыдущей ступени или из окружающей среды с атмосферным давлением (в первую ступень), определяется по формуле $I^n = S^n(P^{n-1} - P^n) \approx S^n P^{n-1}$. Тот же расход газа откачивается насосом данной ступени, давление в котором равно

$$P_{нас}^n = I^n / S^n.$$

Результаты вакуумного расчета параметров выпускного устройства по ступеням откачки

| Параметр | Номер ступени n | | | | | |
|---|-------------------|--------|---------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Тип насоса | АВЗ-90 | АВЗ-90 | РУТС ZJ-150 +АВЗ-20 | ТМН-450 +НВР5ДН | ТМН-450 +НВР5ДН | Два НМД-0,4 |
| Производительность насоса S^n , л/с | 90 | 90 | 150 | 450 | 450 | 400 |
| Диаметр отверстия в диафрагме D_d^n , мм | 2,50 | 3,00 | 3,50 | 4,50 | 10,00 | 12,00 |
| Длина диафрагмы L_d^n , мм | 10 | 10 | 10 | 10 | 200 | 100 |
| Проводимость диафрагмы U_d^n , л/с | 1,00 | 1,44 | 2,00 | 3,20 | 0,6 | 2,10 |
| Расход газа через диафрагму, I^n , (л·Торр)/с | 760 | 12 | 0,4 | 0,10 | $2 \cdot 10^{-2}$ | $6 \cdot 10^{-3}$ |
| Длина трубопровода $L_{тр}$, м | 5,0 | 5,0 | 3,0 | 1,0 | 0,5 | — |
| Диаметр трубопровода $D_{тр}$, см | 10,0 | 10,0 | 6,3 | 6,3 | 10,0 | — |
| Пропускная способность трубопровода $U_{тр}^n$, л/с | 18 000 | 400 | 15 | 30 | 240 | — |
| Расчетное давление на входе в ступень P^{n-1} , Торр | 760 | 8,5 | 0,2 | $3 \cdot 10^{-2}$ | $3 \cdot 10^{-3}$ | $8 \cdot 10^{-6}$ |
| Расчетное давление в ступени P^n , Торр | 8,5 | 0,2 | $3 \cdot 10^{-2}$ | $3 \cdot 10^{-3}$ | $8 \cdot 10^{-6}$ | $7,5 \cdot 10^{-7}$ |
| Расчетное давление на входе насоса $P_{нас}^n$, Торр | 8,5 | 0,13 | $3 \cdot 10^{-3}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-6}$ | $7,5 \cdot 10^{-7}$ |
| Измеренное давление на входе насоса $P_{нас\ изм}^n$, Торр | 10 | 1 | 0,40 | Не измеряется | Не измеряется | 10^{-6} |

Давление в ступени находим по формулам

$$P^n = \frac{I^n}{U_{тр}^n} = \frac{U_d^n P^{n-1}}{U_{тр}^n}, \quad P^{n+1} = \frac{U_d^{n+1} P^{n-1}}{U_{тр}^{n+1}} = \frac{U_d^{n+1} U_d^n P^{n-1}}{U_{тр}^n U_{тр}^{n+1}}.$$

В частности, для четвертой ступени имеем

$$P^4 = P^0 \frac{U_d^1 U_d^2 U_d^3 U_d^4}{U_{тр}^1 U_{тр}^2 U_{тр}^3 U_{тр}^4}$$

(P_0 — давление газа на входе насоса первой ступени, т. е. $P_{атм}$). Как указывалось выше, это справедливо при условии, что давление в насосах значительно меньше давления в откачиваемой ступени и переток газа между ступенями значительно меньше потока, удаляемого насосом.

Формулы для расчета проводимости диафрагм и трубопроводов меняются при изменении как режима течения газа, так и конструкции диафрагмы. Поэтому для первых четырех ступеней используются формулы для вязкостного режима течения газа, а для пятой

и шестой — для молекулярного. В таблице приведены результаты вакуумного расчета параметров выпускного устройства по ступеням откачки. Анализ результатов показывает, что выбор насосов, размеры выходного отверстия и параметры вакуумопроводов можно оптимизировать.

Измерение реальных значений давления в первой, второй и третьей ступенях проводилось на входе насоса. На четвертой ступени измерение давления пока невозможно вследствие особенностей конструкции. В шестой ступени давление в вакууме определяется по величине тока магниторазрядных насосов (1 мА соответствует 10^{-6} Торр, данные взяты из паспорта магниторазрядного насоса НМД-0,4).

Данные, приведенные в таблице, имеют оценочный характер, однако позволяют подтвердить правильность выбора параметров системы дифференциальной откачки. Значения измеренного давления на входе насоса в первой и шестой ступенях хорошо согласуются с расчетным давлением на входе насоса, что также подтверждает правильность выбора.

Заключение. Сконструировано и испытано устройство для вывода в атмосферу высокоэнергетичного электронного пучка. В этом устройстве охлаждение диафрагм обеспечивается за счет их термического расширения. Система дифференциальной откачки адаптирована к выбранной электронно-оптической схеме устройства. Устройство изготовлено и установлено на ускорителе ЭЛВ-6, оборудованном ускорительной трубкой с большой апертурой. Начиная с конца 2019 г. проводились испытания ускорителя с новым выпускным устройством, в ходе которых была достигнута устойчивая работа при мощности пучка 70 кВт и кратковременная работа при мощности 100 кВт. После длительной работы ускорителя при мощности 50 кВт диаметры отверстий в диафрагмах не изменились. Таким образом, подтвердилась правильность конструктивных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Домаров Е. В., Воробьев Д. С., Голковский М. Г. и др. Исследование параметров мощного электронного пучка промышленного ускорителя ЭЛВ // Сиб. физ. журн. 2019. Т. 14, № 2. С. 5–20. DOI: 10.25205/2541-9447-2019-14-2-5-20.
2. Zimek Z., Salimov R. A. Windowless output for high power-low energy electron accelerators // Intern. J. Radiat. Applicat. Instrument. Pt C. Radiat. Phys. Chem. 1992. V. 40, N 4. P. 317–320.
3. Фадеев С. Н. Выпуск в атмосферу мощного релятивистского сфокусированного электронного пучка для технологических применений: Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2005.

*Поступила в редакцию 18/XI 2020 г.,
после доработки — 18/XI 2020 г.
Принята к публикации 30/XI 2020 г.*