

## К РАСЧЕТУ ДЛИНЫ ИНФЛЕКТОРА БЕТАТРОНА

Б. В. ОКУЛОВ

В последние годы в бетатронах и электронных синхротронах все чаще применяют высоковольтную инжекцию с инфлекторным вводом [1, 2, 3, 4, 5]. В связи с этим приобретают интерес основные соотношения для расчета параметров инжекторного устройства и, в частности, длины электростатического инфлектора. Длина является важной характеристикой инфлектора [6]. Чем больше длина инфлектора, тем больше при прочих равных условиях теряется электронов на его пластинах и тем меньше электронов инжектируется в ускорительную камеру [7].

Рассмотрим три типа инфлекторов, имеющих наиболее простую геометрическую форму: плоский инфлектор, цилиндрический инфлектор и цилиндрический инфлектор обратной кривизны (рис. 1).

Введем следующие обозначения:

$l^-$  — длина плоского инфлектора;

$l^{\wedge}$  — длина цилиндрического инфлектора;

$l^{\circ}$  — длина цилиндрического инфлектора обратной кривизны;

$r_i$  — радиус инжекции;

$r_c$  — средний радиус инфлектора;

$r_a$  — радиус, на котором находится ближайшая к окружности радиуса инжекции точка анода электронной пушки;

$\delta_n$  — „радиальный“ размер анода пушки;

$\varphi$  — центральный угол инфлектора;

$\varepsilon$  — угол инжекции (угол между касательной к окружности радиуса  $r_i$  и касательной к окружности радиуса  $r_c$ ).

Найдем формулы для расчета длины указанных выше трех типов инфлекторов.

Пусть на рис. 1, б  $OB$  параллельна оси инфлектора, а  $IC$  и  $AB$  перпендикулярны ей. Тогда  $\angle OIC = \varepsilon$ ,  $CB = l^-$ ,  $IC = \delta_n + AB$ ,  $OB = OC + l^-$ . Из  $\triangle OAB$   $OB^2 = r_a^2 - BA^2$ , или  $(OC + l^-)^2 = r_a^2 - (IC - \delta_n)^2$ . Но  $OC = r_i \cdot \sin \varepsilon$ , а  $IC = r_i \cdot \cos \varepsilon$ , тогда  $(r_i \cdot \sin \varepsilon + l^-)^2 = r_a^2 - (r_i \cdot \cos \varepsilon - \delta_n)^2$ , и окончательно для длины плоского инфлектора имеем

$$l^- = \sqrt{r_a^2 - (r_i \cdot \cos \varepsilon - \delta_n)^2} - r_i \cdot \sin \varepsilon. \quad (1)$$

При  $\varepsilon = 0$

$$l_0^- = \sqrt{r_a^2 - (r_i - \delta_n)^2}. \quad (2)$$

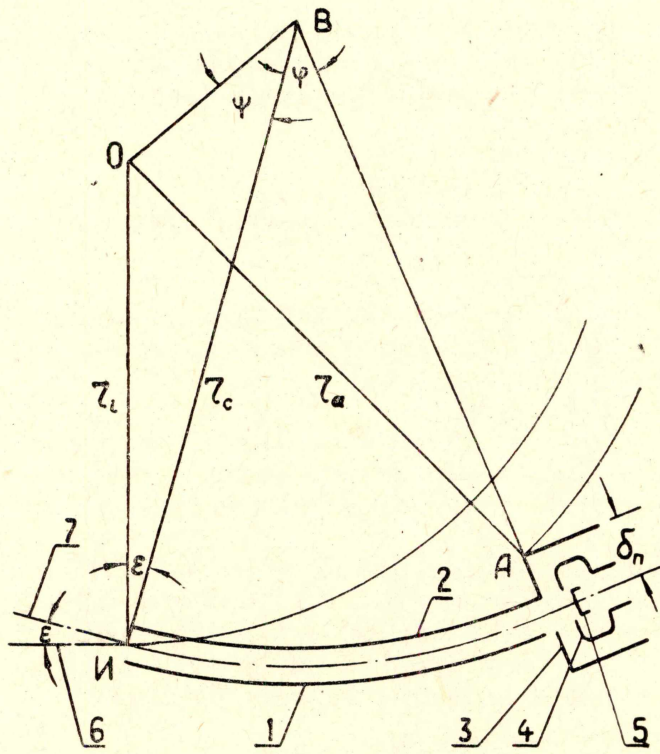
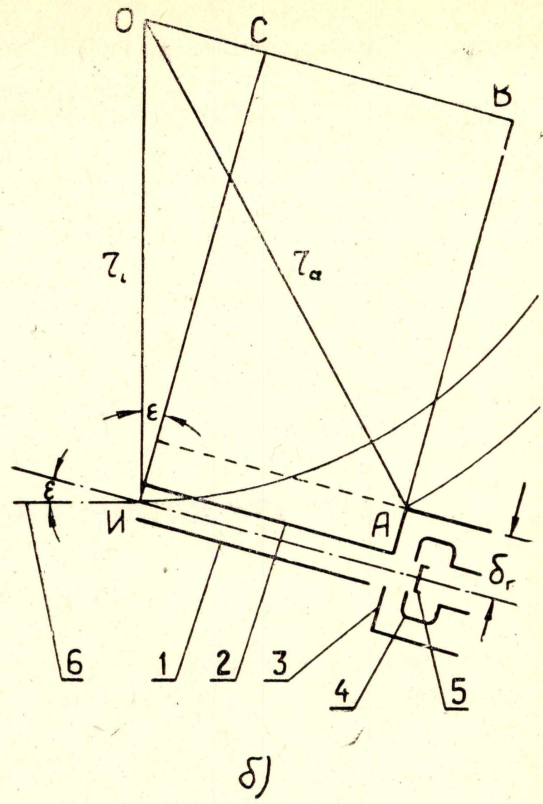
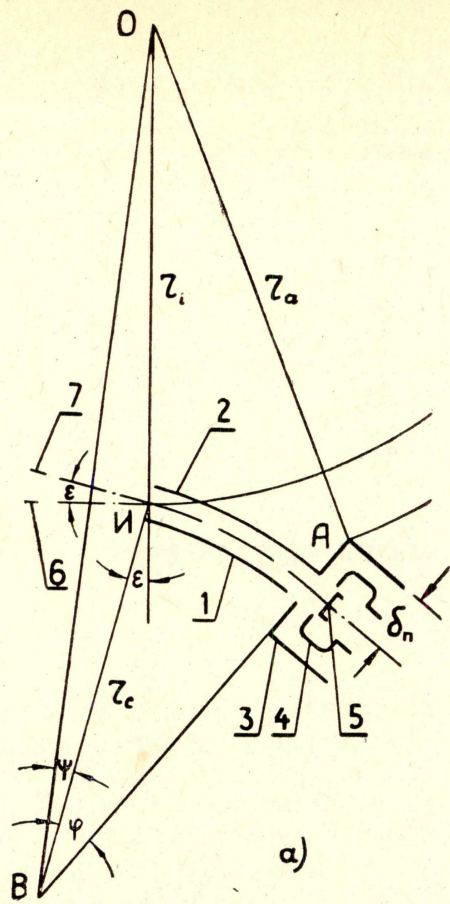


Рис. 1. а — цилиндрический инфлектор, б — плоский инфлектор, в — цилиндрический инфлектор обратной кривизны, 1 — отклоняющая пластина инфлектора, 2 — заземленная пластина инфлектора, 3 — анод инжектора, 4 — фокусирующий электрод, 5 — катод, 6 — касательная к окружности радиуса инъекции, 7 — касательная к окружности среднего радиуса инфлектора

в)

Если  $\varphi$  взять в радианах, то из рис. 1, а

$$l^{\wedge} = r_c \cdot \varphi. \quad (3)$$

Найдем  $\varphi$ .

По теореме косинусов из  $\triangle OAB$

$$r_a^2 = OB^2 + BA^2 - 2OB \cdot BA \cdot \cos(\varphi + \psi). \quad (4)$$

Из  $\triangle OIB$

$$OB^2 = r_i^2 + r_c^2 + 2r_i \cdot r_c \cdot \cos \varepsilon. \quad (5)$$

Из рис. 1, а

$$BA = r_c + \delta_n. \quad (6)$$

Из (4), (5), (6) следует:

$$\cos(\varphi + \psi) = \frac{r_i^2 + r_c^2 + 2r_i r_c \cdot \cos \varepsilon + (r_c + \delta_n)^2 - r_a^2}{2(r_c + \delta_n) \sqrt{r_i^2 + r_c^2 + 2r_i r_c \cdot \cos \varepsilon}} = N^{\wedge} \quad (7)$$

или

$$\varphi + \psi = \arccos N^{\wedge}.$$

Из  $\triangle OIB$

$$r_i^2 = OB^2 + r_c^2 - 2OB r_c \cdot \cos \psi.$$

С учетом (5)

$$\cos \psi = \frac{r_c + r_i \cdot \cos \varepsilon}{\sqrt{r_i^2 + r_c^2 + 2r_i r_c \cdot \cos \varepsilon}} = M^{\wedge}. \quad (8)$$

Откуда

$$\psi = \arccos M^{\wedge}.$$

Тогда

$$\varphi = \arccos N^{\wedge} - \arccos M^{\wedge}, \quad (9)$$

и уравнение (3) с учетом (7), (8), (9) примет вид:

$$l^{\wedge} = r_c \left[ \arccos \frac{r_i^2 + r_c^2 + 2r_i r_c \cdot \cos \varepsilon + (r_c + \delta_n)^2 - r_a^2}{2(r_c + \delta_n) \sqrt{r_i^2 + r_c^2 + 2r_i r_c \cdot \cos \varepsilon}} - \arccos \frac{r_c + r_i \cdot \cos \varepsilon}{\sqrt{r_i^2 + r_c^2 + 2r_i r_c \cdot \cos \varepsilon}} \right]. \quad (10)$$

В частном случае, при  $\varepsilon = 0$

$$l^{\wedge} = r_c \arccos \frac{(r_c + r_i)^2 + (r_c + \delta_n)^2 - r_a^2}{2(r_c + r_i)(r_c + \delta_n)}. \quad (11)$$

Из рис. 1, в

$$l^{\wedge} = r_c \cdot \varphi. \quad (12)$$

Найдем  $\varphi$ .

По теореме косинусов

$$r_a^2 = OB^2 + BA^2 - 2OB \cdot BA \cdot \cos(\varphi + \psi), \quad (13)$$

но

$$OB^2 = r_c^2 + r_i^2 - 2r_c \cdot r_i \cdot \cos \varepsilon \quad (14)$$

и

$$BA = r_c - \delta_n. \quad (15)$$

Из (12), (13), (14), (15) после преобразований, аналогичных преобразованиям при расчете цилиндрического инфлектора, получим:

$$l^{\wedge} = r_c \left[ \arccos \frac{r_c^2 + r_i^2 - 2r_c r_i \cdot \cos \varepsilon + (r_c - \delta_n)^2 - r_a^2}{2(r_c - \delta_n) \sqrt{r_c^2 + r_i^2 - 2r_c \cdot r_i \cdot \cos \varepsilon}} - \arccos \frac{r_c - r_i \cdot \cos \varepsilon}{\sqrt{r_c^2 + r_i^2 - 2r_c \cdot r_i \cdot \cos \varepsilon}} \right]. \quad (16)$$

В частном случае, при  $\varepsilon = 0$

$$l_o^\sim = r_c \cdot \arccos \frac{(r_c - r_i)^2 + (r_c - \delta_{ni})^2 - r_a^2}{2(r_c - r_i)(r_c - \delta_{ni})}. \quad (17)$$

Введем безразмерные величины:

$r_{ai} = \frac{r_a}{r_i}$  — приведенный минимальный радиус положения анода-инжектора,

$r_{ci} = \frac{r_c}{r_i}$  — приведенный средний радиус инфлектора,

$\delta_{ni} = \frac{\delta_{ni}}{r_i}$  — приведенный радиальный габарит инжектора,

$l_i^- = \frac{l^-}{r_i}$  — приведенная длина плоского инфлектора,

$l_i^{\wedge} = \frac{l^{\wedge}}{r_i}$  — приведенная длина цилиндрического инфлектора,

$l_i^{\sim} = \frac{l^{\sim}}{r_i}$  — приведенная длина цилиндрического инфлектора обратной кривизны.

Тогда получим соответственно:

в общем случае

$$l_i^- = \sqrt{r_{ai}^2 - (\cos \varepsilon - \delta_{ni})^2} - \sin \varepsilon, \quad (18)$$

$$l_i^{\wedge} = r_{ci} \left[ \arccos \frac{r_{ci}^2 + 2r_{ci} \cdot \cos \varepsilon + 1 + (r_{ci} + \delta_{ni})^2 - r_{ai}^2}{2(r_{ci} + \delta_{ni}) \sqrt{r_{ci}^2 + 2r_{ci} \cdot \cos \varepsilon + 1}} - \arccos \frac{r_{ci} + \cos \varepsilon}{\sqrt{r_{ci}^2 + 2r_{ci} \cdot \cos \varepsilon + 1}} \right], \quad (19)$$

$$l_i^{\sim} = r_{ci} \left[ \arccos \frac{r_{ci}^2 - 2r_{ci} \cdot \cos \varepsilon + 1 + (r_{ci} - \delta_{ni})^2 - r_{ai}^2}{2(r_{ci} - \delta_{ni}) \sqrt{r_{ci}^2 - 2r_{ci} \cdot \cos \varepsilon + 1}} - \arccos \frac{r_{ci} - \cos \varepsilon}{\sqrt{r_{ci}^2 - 2r_{ci} \cdot \cos \varepsilon + 1}} \right], \quad (20)$$

В частном случае, при  $\varepsilon = 0$

$$l_{io}^- = \sqrt{r_{ai}^2 - (1 - \delta_{ni})^2}, \quad (21)$$

$$l_{io}^{\wedge} = r_{ci} \cdot \arccos \frac{(r_{ci} + 1)^2 + (r_{ci} + \delta_{ni})^2 - r_{ai}^2}{2(r_{ci} + 1)(r_{ci} + \delta_{ni})}, \quad (22)$$

$$l_{io}^{\sim} = r_{ci} \cdot \arccos \frac{(r_{ci} - 1)^2 + (r_{ci} - \delta_{ni})^2 - r_{ai}^2}{2(r_{ci} - 1)(r_{ci} - \delta_{ni})}. \quad (23)$$

Из сравнения приведенных длин инфлекторов видно, что при заданных  $r_{ai}$ ,  $\delta_{ni}$  цилиндрический инфлектор имеет минимальную длину. Однако для его питания требуется максимальное напряжение. При этих же условиях цилиндрический инфлектор обратной кривизны имеет наибольшую длину, но для его питания требуется минимальное напряжение. На основе сказанного выше для сравнительно низких напряжений инжекции, когда влияние пространственного заряда на расходимость пучка велико, а напряжения на инфлекторе по абсолютной величине легко достижимы, можно рекомендовать к применению

цилиндрический инфлектор. При очень высоких энергиях инжекции когда роль пространственного заряда на расходимость пучка вследствие релятивистских эффектов уменьшается, а необходимое напряжение на инфлекторе по абсолютной величине становится трудно достижимым, можно рекомендовать к применению цилиндрический инфлектор обратной кривизны.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. В. Окулов, А. Е. Ерзылев. Труды III Межвузовской конференции по электронным ускорителям. 117—123. Томск. 1961.
  2. В. А. Москалев, Б. В. Окулов. ЖТФ XXXII, 9, 1040—1041. (1962).
  3. А. И. Павловский и др. ЖТФ. XXXII, 3, 374—376 (1963).
  4. А. П. Комар, О. П. Коровин. Доклады АН СССР, 159, 4, 775 (1964).
  5. А. И. Павловский и др. Доклады АН СССР, 160, 1, 68 (1965).
  6. Б. В. Окулов. К расчету длины инфлектора бетатрона. Отчет НИИ ЯФЭА при ТПИ. 1964.
  7. Б. В. Окулов. Расчет токопрохождения через инфлектор бетатрона. Отчет НИИ ЯФЭА при ТПИ. 1964.
-