

## ТЕОРИЯ ПРОСТЕЙШЕЙ МОДЕЛИ ПЛОСКОГО НЕЙТРАЛИЗАТОРА СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Х. Ф. Таммет

1. Модель нейтрализатора. Аналитическое решение уравнений, описывающих движение аэроионов в каком-нибудь конкретном нейтрализаторе статического электричества, обычно невозможно. Для выяснения общих закономерностей целесообразно изучить идеализированную модель нейтрализатора. Ожидаемые результаты могут пригодиться и для приближенного расчета конкретных нейтрализаторов.

Устройство рассматриваемой модели поясняет рис. 1а. Эта модель соответствует следующим условиям:

- а) ионизация происходит только в ограниченном слое воздуха, прилегающем к ионизатору. Координатной плоскостью  $z=0$  выбираем граничную поверхность зоны ионизации (рис. 1а);
- б) в плоскостях, поперечных к оси  $z$ , все параметры однородны.

Мерой электризации нейтрализуемой поверхности принимаем напряженность электрического поля непосредственно над поверхностью  $E_s$ . Над проводящей поверхностью

$$E_s = \sigma / \epsilon_0, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — поверхностная плотность заряда и  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума ( $\epsilon_0 = 8,85 \text{ нф/м}$ , применяется система СИ). Относительная диэлектрическая проницаемость воздуха принята равной единице.

Влияние отступлений от изложенных условий на процесс нейтрализации целесообразно проанализировать при более конкретных задачах, которые выходят из рамок настоящей работы.

2. Уравнение нейтрализатора. Плотность тока в пространстве  $0 < z < h$  выражается

$$j = k \rho E, \quad (2)$$

где  $k$  — подвижность (около  $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ в}^{-1} \text{ сек}^{-1}$ ) и  $\rho$  — плотность объемного заряда аэроионов. Плотность тока не зависит

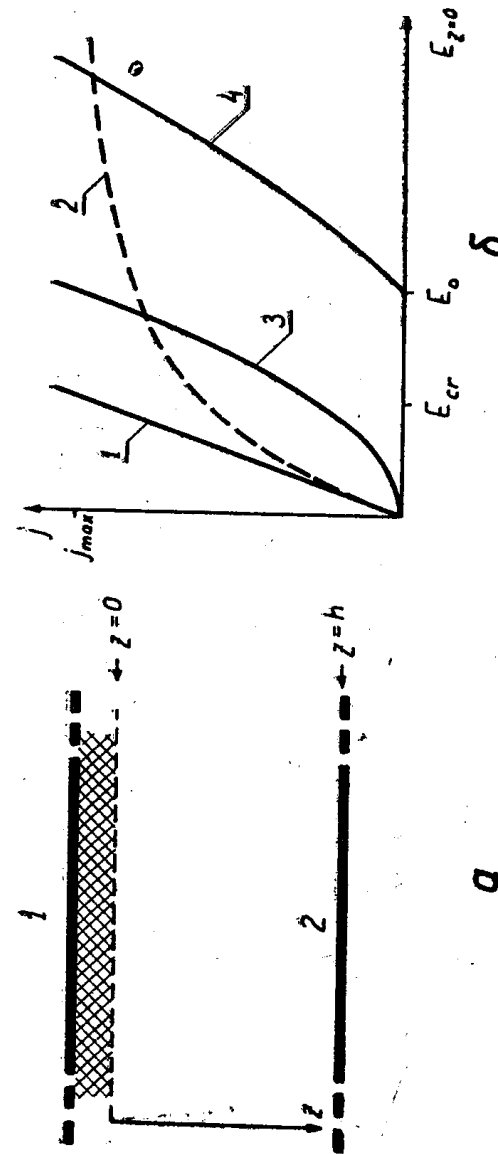


Рис. 1. а — схематизированный разрез нейтрализатора: 1 — плоский ионизатор; 2 — нейтрализуемая поверхность; заштрихованная область — зона ионизации; б — характеристики ионизаторов: 1 — линейная; 2 — насыщающаяся; 3 — прогрессирующая при  $E_0=0$ ; 4 — прогрессирующая;  $E_{z=0}$  — напряженность электрического поля на граничной поверхности зоны ионизации;  $E_{cr}$ ,  $E_0$ ,  $j_{max}$  — постоянные ионизаторов.

от координат. Решение уравнения электростатического поля  $\text{div } \vec{E} = \rho$  при этом следующее:

$$\frac{1}{\rho^2} - \frac{1}{\rho_0^2} = \frac{2kz}{\epsilon_0 \rho^3}, \quad (3)$$

где  $\rho_0$  — плотность заряда на поверхности  $z=0$ . Граничное условие  $E=E_0$ , если  $z=h$ , приводит к уравнению плоского нейтрализатора:

$$\frac{j^2}{\rho_0^2} + 2 \frac{kh}{\epsilon_0} j - k^2 E_0^2 = 0. \quad (4)$$

Высота  $h$  измеряется от границы зоны ионизации до нейтрализуемой поверхности (см. рис. 1а).

3. Идеальный нейтрализатор. Неограниченное увеличение интенсивности ионизатора привлекает переход  $\rho_0 \rightarrow \infty$ , и решение уравнения нейтрализатора приближается к предельному значению

$$j_{id} = \frac{\epsilon_0 k E_0^2}{2h}. \quad (5)$$

Для определения зависимости плотности тока от напряжения  $U$  между нейтрализуемой поверхностью и ионизатором надо вычислить интеграл от напряженности. Учитывая, что предположение  $\rho_0 \rightarrow \infty$  привлекает  $E_{z=0} = 0$ , получим

$$U = \frac{2}{3} h E_0.$$

Дальнейшее вычисление приводит к результату

$$j_{id} = \frac{9\epsilon_0 k U^2}{8h^3}. \quad (7)$$

Практический вид формул (5) и (7) следующий:

$$j_{id}/\text{ма} \cdot \text{м}^{-2} \approx \frac{2}{3} \frac{(E_0/\text{кв} \cdot \text{см}^{-1})^2}{h/\text{см}} \approx \frac{3}{2} \frac{(U/\text{кв})^2}{(h/\text{см})^3}. \quad (8)$$

Символы с единицами в наклонных скобках обозначают здесь численные значения физических величин.

4. Коэффициент эффективности. Введем коэффициент эффективности произвольного нейтрализатора как отношение

$$\eta = \frac{\bar{J}}{J_{id}^*} = \frac{I}{S j_{id}^*}, \quad (9)$$

где  $I$  — ток нейтрализации,  $S$  — площадь, подлежащая воздействию нейтрализатором,  $j_{id}^*$  — плотность тока идеального нейтрализатора при наименьшей допустимой высоте  $h=h_0$ .

5. Характеристика ионизатора. Характеристика ионизатора  $j=j(E_{z=0})$  совпадает с характеристикой нейтрализатора при  $h=0$ . Характеристику ионизатора считаем заданной. Имеются два основных типа характеристики: насыщающаяся и прогрессирующая (рис. 1б), свойственные радиоизотопным и коронным ионизаторам.

Выберем две конкретные функции:

$$j = j_{\max} \frac{E_{z=0}}{E_{cr}} \sqrt{\frac{\frac{E_{z=0}^2}{E_{cr}^2} + 4 - \frac{E_{z=0}}{E_{cr}}}{2}} \quad (10)$$

(насыщающаяся характеристика) и

$$j = \begin{cases} 0 & \text{при } E_{z=0} \leq E_0 \\ A (E_{z=0}^2 - E_0^2) & \text{при } E_{z=0} > E_0 \end{cases} \quad (11)$$

(прогрессирующая характеристика). Напряженности  $E_{cr}$  и  $E_0$  являются постоянными ионизаторов,  $j_{\max}$  и  $A$  — свободные коэффициенты. Графики рис. 1б построены по формулам (10) и (11).

Для коронного разряда характерна абсолютно-прогрессирующая характеристика, при которой  $A=\infty$ . Идеальная характеристика получается, если принимать  $A=\infty$  и  $E_0=0$ .

Линейная характеристика

$$j = \lambda_0 E_{z=0} \quad (12)$$

получается из характеристики (10) при переходе  $j_{\max} \rightarrow \infty$  и  $E_{cr} \rightarrow \infty$ .

Формулы (10) и (11) выбраны так, чтобы уравнение нейтрализатора имело простое решение. Отступление характеристик конкретных ионизаторов от рассматриваемых имеет для общих свойств нейтрализатора второстепенное значение.

6. Эффективность плоского нейтрализатора. Исключив из уравнения характеристики ионизатора  $E$  и применив соотношение (2), удается выразить  $\rho_0$ . В случае ионизатора с насыщающейся характеристикой

$$\rho_0 = \frac{j_{\max}}{k E_{cr}} \sqrt{1 - \frac{j}{j_{\max}}}. \quad (13)$$

Решение уравнения (4) позволяет найти выражение коэффициента эффективности:

$$\eta = \vartheta_i \frac{\vartheta_j + 1 - \sqrt{(\vartheta_j - 1)^2 + 4\vartheta_E}}{2(\vartheta_j - \vartheta_E)}, \quad (14)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \vartheta_i &= \frac{J_{\max}}{J_{\text{ид}}} \\ \vartheta_E &= \frac{E_{\text{кр}}^2}{E_0^2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

В случае ионизатора с линейной характеристикой

$$\eta = \vartheta \frac{\sqrt{\vartheta^2 + 4} - \vartheta}{-2}, \quad (16)$$

где

$$\vartheta = \frac{\lambda_0 E_0}{J_{\text{ид}}}. \quad (17)$$

В случае ионизатора с прогрессирующей характеристикой

$$\vartheta_0 = \frac{J}{k \sqrt{E_0^2 + \frac{J}{A}}}. \quad (18)$$

Уравнение (4) вырождается в линейное уравнение, решение которого приводит к результату:

$$\eta = \vartheta_A \frac{1 - \vartheta_0}{1 + \vartheta_A}, \quad (19)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \vartheta_A &= \frac{AE_0^2}{J_{\text{ид}}} = \frac{2Ah}{e_0 k} \\ \vartheta_0 &= \frac{E_0^2}{E_0^2} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

В случае ионизатора с абсолютно-прогрессирующей характеристикой

$$\eta = 1 - \vartheta_0. \quad (21)$$

7. Расчет ионизатора. Сущность задачи — рациональный выбор параметров  $\vartheta$ , чтобы обеспечить одновременно удовлетворительное значение  $\eta$  и простое устройство нейтрализатора. Теоретический расчет поможет сознательно избегать излишнего увеличения мощности ионизатора, что в режиме  $\eta \approx 1$  вело бы только к бессмысленному усложнению конструкции.

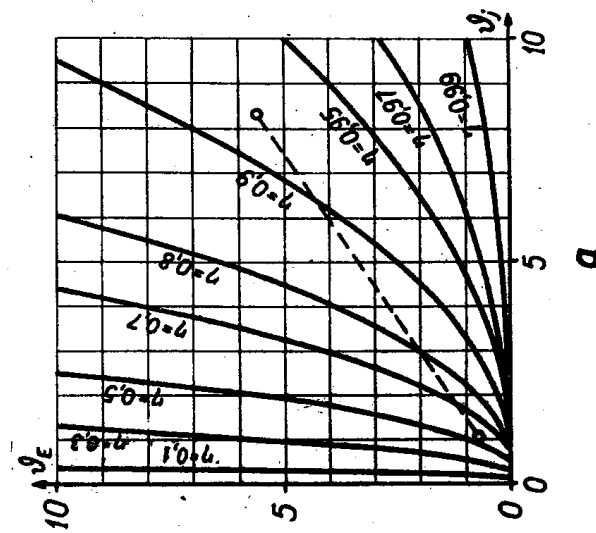
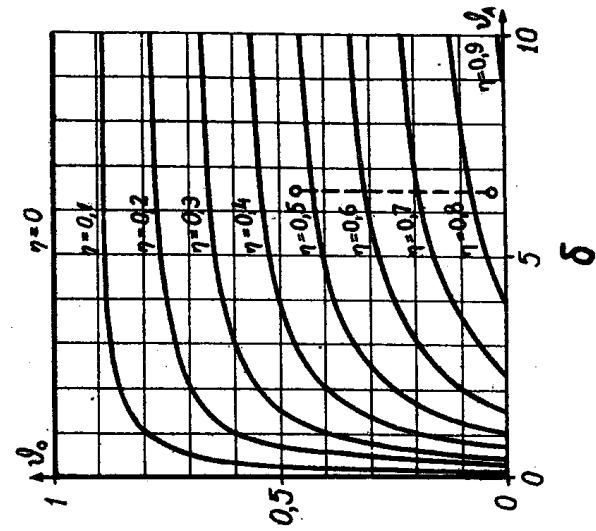


Рис. 2. Линии равной эффективности: а — для ионизатора с прогрессирующей характеристикой ионизатора; б — для нейтрализатора с прогрессирующей характеристикой ионизатора. Штриховой линией изображены примеры линий нейтрализации.

Для обеспечения наглядности полученных результатов и для упрощения практических расчетов на рис. 2 представлены графики, построенные по формулам (14) и (19). На график следует нанести точки, соответствующие наибольшему и наименьшему значению  $E_0$  и соединить эти точки прямой, которую можно называть линией нейтрализации. Линия нейтрализации показывает пределы и облегчает оценку среднего значения коэффициента  $\eta$ .

В случае прогрессирующей характеристики с  $E_0=0$  весь процесс нейтрализации происходит при постоянном значении  $\eta = \frac{\phi_A}{1+\phi_A}$ , и линия нейтрализации вырождается в точку на оси  $\phi_A$ .

Некоторые значения функции  $\eta = \eta(\phi)$  для ионизатора с линейной характеристикой:

|        |   |      |      |      |     |     |     |      |      |      |          |
|--------|---|------|------|------|-----|-----|-----|------|------|------|----------|
| $\phi$ | 0 | 0,11 | 0,36 | 0,71 | 1,3 | 1,8 | 2,8 | 4,2  | 5,6  | 9,9  | $\infty$ |
| $\eta$ | 0 | 0,1  | 0,3  | 0,5  | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 0,95 | 0,97 | 0,99 | 1        |

8. Время нейтрализации. Время уменьшения  $E_0$  от значения  $E_1$  до  $E_2$  определяется интегралом

$$t = \int_{E_0=E_2}^{E_0=E_1} \frac{d\sigma}{j} \quad (22)$$

В случае идеального нейтрализатора интегрирование дает:

$$t_{id} = \frac{2h}{\alpha k} \left( \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right), \quad (23)$$

где  $\alpha$  — среднее значение безразмерного отношения  $\epsilon_0 E_0 / \sigma$ . Для проводящей поверхности  $\alpha = 1$ . Обычно  $E_1 \gg E_2$ , и член  $1/E_1$  можно опустить. В таком приближении практический вид формулы (23):

$$t_{id}/\text{мсек} \approx \frac{4}{3} \frac{h/\text{см}}{\alpha E_2/k\text{в} \cdot \text{см}^{-1}} \quad (24)$$

В общем случае

$$t = \frac{t_{id}}{\eta}, \quad (25)$$

где  $\eta$  — средний коэффициент эффективности нейтрализатора.

По времени  $t$  и скорости движения нейтрализуемой поверхности вычисляется необходимая длина нейтрализатора вдоль нейтральной поверхности.

20/II 1968 г.

## LIHTSAIMA TASASE STAATILISTE LAENGUTE NEUTRALISAATORI MUDELI TEORIA

H. Tammet

Resümee

Lihtsaim staatiliste laengute neutralisaatori mudel sarnaneb tasakondensaatoriga, mille üheks kattedeks on ionisaator, teiseks aga neutraliseeritav pind (joon. 1a).

Ionisaatori võimsuse suurendamise korral läheneb aeroioonide voo tihedus valemiga (8) kirjeldatavale piirile. Piirrežiimi nimetame ideaalse neutralisaatori režiimiks. Ideaalse neutralisaatori intensiivsust piirab ionisaatori ja neutraliseeritava pinna vaheline ruumlaeg.

Neutralisaatori efektiivsuseguriks nimetame neutralisaatori keskmise voolutiheduse ja ideaalse neutralisaatori voolutiheduse suhet. Efektiivsuseguril sõltuvust neutralisaatori parameetritest kirjeldavad vastavalt kasutatava ionisaatori tüübile valemid (14, 16, 19, 21). Need valemid on kirjutatud sarnasusteooria kriteeriaalvõrrandite kujul.

Esitatud teooria on rakendatav neutralisaatorite konstrueerimisel. Tulemuste praktilise kasutamise hõlbustamiseks on joon. 2 toodud samaefektiivsusjoonte parved neutralisaatorite kahe põhitüübi jaoks.

## THEORY OF THE SIMPLEST MODEL OF A PLANE NEUTRALIZER OF STATIC CHARGES

H. Tammet

Summary

The simplest model of a neutralizer of static charges resembles a plane condenser whose one cover is an ionizer, the other cover is a surface to be neutralized (Fig. 1a).

In case of increasing the capacity of the ionizer, the density of the flux of air ions approaches a limit described by formula (8). The limiting operating conditions are called the conditions of an ideal neutralizer. The intensity of an ideal neutralizer is restricted by the space charge between the ionizer and the surface to be neutralized.

The ratio of the mean current density of the neutralizer to the current density of the ideal neutralizer is called the efficiency of a neutralizer.

The dependence of efficiency on the parameters of the neutralizer is described by the formulas (14, 16, 19, 21) of the corresponding type of the ionizer used. These formulas have been written in the form of criterial equations of the similarity theory.

The theory presented above is applicable to the construction of neutralizers. To make the practical application of the results easier, sets of isoefficiency lines have been given for both basic types (Fig. 2).