

А. А. ТРОФИМОВ

УСТАНОВКА ДЛЯ СТАТИЧЕСКОЙ ПРОДУВКИ СОПЛОВЫХ РЕШЕТОК МИКРОТУРБИН

Каналы микротурбин имеют размеры, соизмеримые с толщиной пограничного слоя. Поэтому все виды потерь в решетках микротурбин (в том числе и волновые потери) определяются в нераздельном виде, так как опытное определение профильных и отдельных вторичных потерь при таких размерах является трудоемкой задачей. Определение этих потерь по методике и формулам, предназначенным для каналов больших размеров, приводит к значительным погрешностям. Ввиду этого применение существующих теорий расчета обычных турбин к расчету микротурбин дает ошибки, так как эти теории не отражают реальность происходящих в каналах микротурбин процессов.

Парциальные микротурбины выполняются активными с перепадом давлений, значительно превышающим критический. Наличие сверхзвуковых полей скоростей на выходе из решеток создает дополнительные волновые потери, относительная доля которых значительна. Расчетное определение этих потерь для неравномерного сверхзвукового потока представляет собою сложную задачу.

Все вышеуказанное приводит к тому, что расчетные значения к. п. д. микротурбин, определяемые по методикам и формулам обычных турбин, значительно превышают значения к. п. д., получаемые экспериментальным путем.

Потери в микротурбинах приходится определять опытным путем в каждом конкретном случае, так как в существующей литературе отсутствуют какие-либо рекомендации по величине этих потерь и их зависимости от критериев подобия.

Условимся все потери, возникающие в решетке соплового аппарата С. А., оценивать коэффициентом φ_{CA} , который вычисляется по следующей формуле:

$$\varphi_{CA} = \frac{c_1}{c_{1ad}}$$

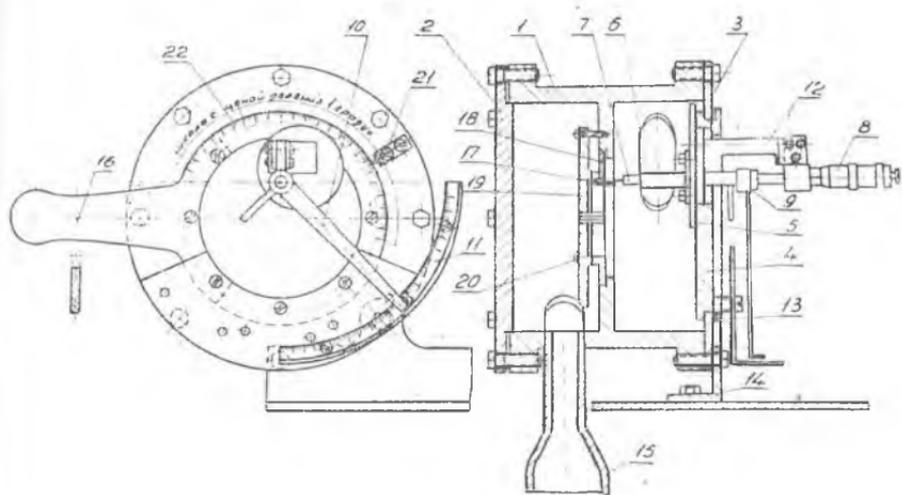
Здесь C_1 — реальная скорость потока на входе в рабочее колесо турбины, полученная из опыта с учетом всех видов потерь в канале CA и в зазоре между CA и PK ;

$C_{1ад}$ — скорость истечения потока из канала CA в изоэнтропном процессе, подсчитанная по действительному перепаду давления.

В настоящей статье дается описание установки для статической продувки центростремительных и осевых круговых сопловых решеток микротурбин и изложена методика определения потерь в нераздельном виде.

КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ И СХЕМА ИЗМЕРЕНИЙ. ИЗМЕРЯЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

Общий вид установки представлен на фиг. 1. Траверсирование исследуемой решетки 18 осуществляется трубкой 17, являющейся



Фиг. 1.

приемником полного давления (в дальнейшем сокращенно ППД). Трубка ППД имеет три степени свободы: перемещение вдоль оси ползуна 7, поворот относительно оси ползуна и относительно оси испытуемой решетки.

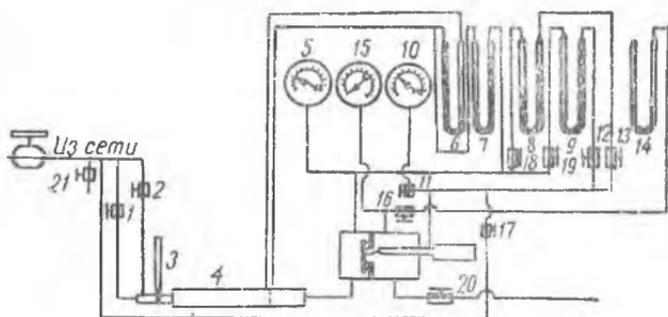
Вращением маховика микрометрического винта 8 трубка ППД перемещается вдоль оси ползуна, не поворачиваясь вокруг оси его, так как последний при этом не нагружается внешним моментом. Так осуществляется установка трубки ППД в любой точке решетки по высоте канала. Показания на шкале микрометрического винта обозначаются через l_n .

Поворот трубки ППД относительно оси решетки осуществляется вращением поворотной шайбы 4 за рукоятку 16. Поворот шайбы

отмечается стрелкой 21 на шкале 22 и обозначается угловой координатой ω_n . Так трубку ППД можно установить в любой точке по шагу решетки.

Поворот трубки относительно оси ползуна осуществляется поворотом последнего вокруг собственной оси стрелкой 10. Это угловое перемещение обозначается угловой координатой γ_n и фиксируется на шкале 11. При повороте трубки ППД относительно оси ползуна центр заборной плоскости трубки остается на продолжении оси ползуна. Так, трубку ППД можно установить в направлении потока в любой точке по шагу и высоте канала решетки.

Радиальный зазор между трубкой ППД и выходной плоскостью решеток регулируется при помощи эксцентрика 5. Шкалы угловых перемещений имеют цену делений один градус.



Фиг. 2.

Схема измерений представлена на фиг. 2. Воздух из сети через запорный кран 1 поступает в расходомерную трубу 4 с нормальной диафрагмой, а затем в камеру, где установлена испытываемая решетка. Давление на входе в решетку измеряется контрольным манометром 5 и обозначается через P_{2M}^* . Расширяясь в каналах решетки, воздух попадает в камеру низкого давления установки и затем выбрасывается в атмосферу. Температура поступающего воздуха перед диафрагмой измеряется ртутным термометром 3, шкала которого имеет цену деления $0,1^\circ\text{C}$ с диапазоном измерений от $+25^\circ\text{C}$ до -30°C и обозначается через t_g^* .

Перепад давлений на нормальной диафрагме измеряется водяным дифманометром 6 и обозначается через ΔP_g . Потеря полного давления от диафрагмы до входа в решетку измеряется водяным дифманометром 7 и обозначается через ΔP_m .

Полное давление в потоке на выходе из решетки измеряется ртутным 8 или водяным 9 дифманометрами и обозначается через $(\Delta P_1^*)^1$. При необходимости полное давление на выходе из решетки можно измерить контрольным манометром 10, обозначив это давление через $(P_{1M}^*)^1$. Все три измерительных прибора подклю-

ны параллельно и могут отключаться кранами 13, 18, 12, 19 и 11 от трубки ППД в зависимости от рабочего давления P_{2M}^* .

Вышеуказанное полное давление (P_{1M}^*)¹ в случае сверхзвукового течения замеряется за прямым скачком уплотнения, который возникает перед заборной плоскостью трубки ППД. Полное давление перед скачком уплотнения рассчитывается по известным для прямого скачка формулам.

Статическое давление на выходе из решетки измеряется ртутным пьезометром 14 и обозначается через ΔP_1 . При наличии в камере за решеткой повышенного давления P_{1M} , его можно измерить контрольным манометром 15. При использовании манометра 15 ртутный пьезометр 14 отключается краном 16.

Применяемые контрольные манометры имеют класс 0,4 и шкалу с ценой деления 0,1 кг/см². Дифманометры имеют шкалу с ценой деления 1 мм. Трубка ППД имеет внутренний диаметр $d_{nng} = 0,2$ мм и наружный диаметр $D_{nng} = 0,5$ мм. Для очистки от случайных включений при проведении опыта трубка продувается воздухом из рабочей сети. При закрытых кранах 12 и 13 и открытом кране 17 воздух попадает по центральному сверлению ползуна (фиг. 1) к трубке ППД и очищает ее от посторонних включений. Кран 2 регулирует байпасный подвод воздуха. Краном 20 создается противодавление на выходе из решетки. Кран 21 отключает установку от сети при проверке ее на герметичность.

Установив трубку ППД в любой точке на выходе из решетки, изменяем ее угловую координату γ_n до тех пор, пока перепад столбов жидкости дифманометров 8 или 9 будет минимальным, и производим отсчет измеряемых величин

$$P_{2M}^*; \omega_n; \gamma_n; (\Delta P_1^*)'; \Delta P_g; \Delta P_m; t_g^* \text{ и } \Delta P_1.$$

При измерении полного давления по шагу и высоте канала дополнительно вводим соответствующие обозначения

$$(\Delta P_{1tn}^*)' \text{ и } (\Delta P_{1hi}^*)'.$$

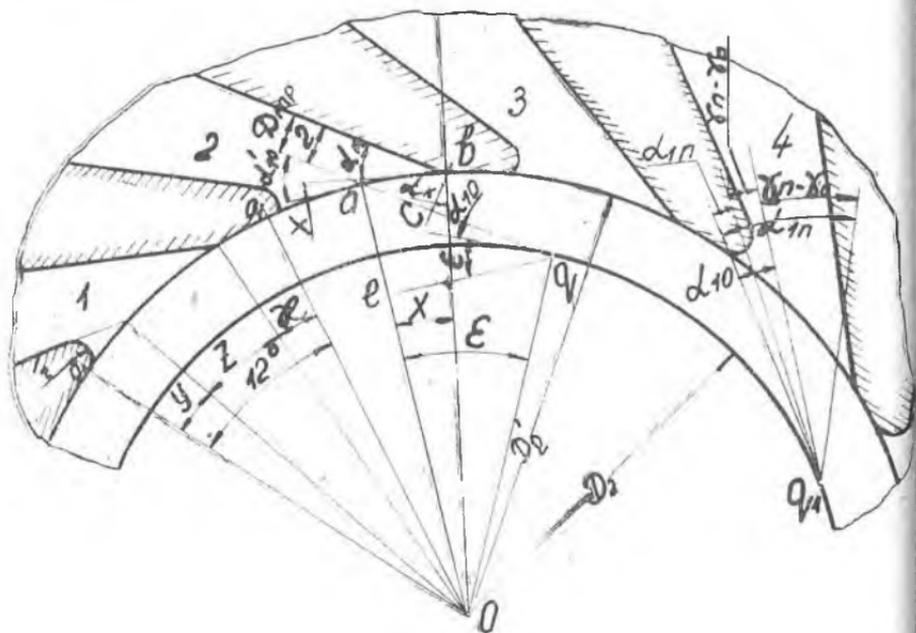
Замер статического давления в исследуемых точках осуществляется зондом, который отличается от трубки ППД тем, что его заборная плоскость расположена перпендикулярно оси ползуна 7 и имеет припаянную тонкую стальную шайбу диаметром 5 мм. Статические давления по шагу и высоте канала решетки измеряются до скачка уплотнения и обозначаются соответственно через ΔP_{1tn} и ΔP_{1hi} .

Траверсирование осевых круговых решеток осуществляется на той же установке путем несложной переделки деталей, смонтированных на эксцентрик 5.

Установка позволяет осуществлять траверсирование радиальных решеток с диаметром на выходе от 35 до 75 мм и осевых решеток с наружным диаметром от 30 до 75 мм.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОТОКА НА ВХОДЕ В РАБОЧЕЕ КОЛЕСО

В отличие от плоских решеток фронт радиальных решеток представляет собой окружность. Угол набегания потока у таких решеток определяется как угол между направлением потока и касательной, проведенной к окружности на входе в рабочее колесо в точке ее пересечения с линией тока.



Фиг. 3.

Обозначим (фиг. 3) через α_{1n} угол набегания потока в исследуемой точке входа PK , через D_2^1 — диаметр решетки CA на выходе, через D_2 — диаметр на входе в рабочее колесо. Для определения α_{1n} через геометрические размеры решетки сделаем построения указанные на фиг. 3. Представим, что прямая, проведенная параллельно длинной стенке сужающегося канала и отстоящая от нее на расстоянии $\frac{D_{mp}}{2}$ является начальной линией тока, угол набегания которой обозначим через α_{10} . Точки пересечения окружностей D_2^1 и D_2 с начальной линией тока, т. е. точки a и q , и точку пересечения длинной стенки канала с окружностью D_2^1 , т. е. точку b , соединим с точкой O . Из точки b опустим перпендикуляр на aq , а из точки q на ao . Образовавшийся центральный угол aob обозначим через X , а центральный угол aog — через ϵ . Проведя в точках a , b и касательные, получим простые геометрические соотношения для определения угла α_{10}

$$a_{10} = a_{10} - \varepsilon, \quad (2)$$

$$a'_{10} = a_{\kappa} + X; \quad (3)$$

где X — конструктивный угол решетки — угол между стенкой канала и касательной, проведенной к окружности D_2' в точке ее пересечения со стенкой канала.

Обычно линии тока не прямолинейны. Если к линии тока провести касательную в точке ее пересечения с окружностью D_2 , то угол набегания потока в любой точке входа в РК определяется из соотношения

$$a_{1n} = a_{10} + (\gamma_n - \gamma_0). \quad (4)$$

Таким образом, для определения угла набегания потока необходимо знать центральные углы X и ε . Найдем соотношения, определяющие эти углы через геометрические параметры решеток (фиг. 3).

Из прямоугольного треугольника abc имеем

$$ab = \frac{D_{mp}}{2 \sin \left(a_{\kappa} + \frac{X}{2} \right)}. \quad (5)$$

Из равнобедренного треугольника aob имеем

$$ab^2 = \frac{(D_2')^2}{2} (1 - \cos X). \quad (6)$$

Совместное решение (5) и (6) дает соотношения для определения центрального угла X .

$$2(1 - \cos X) \cdot \sin^2 \left(a_{\kappa} + \frac{X}{2} \right) = \left(\frac{D_{mp}}{D_2'} \right)^2. \quad (7)$$

Из прямоугольных треугольников oed и aeq имеем

$$\left. \begin{aligned} eq &= \frac{D_2}{2} \sin \varepsilon \\ ae &= \frac{D_2}{2} \cos \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$ae = \frac{D_2}{2} \sin \varepsilon \cdot \operatorname{tg} (\varepsilon + a_{10}). \quad (9)$$

Учитывая, что

$$a_{10} = a_{\kappa} + (X - \varepsilon), \quad (10)$$

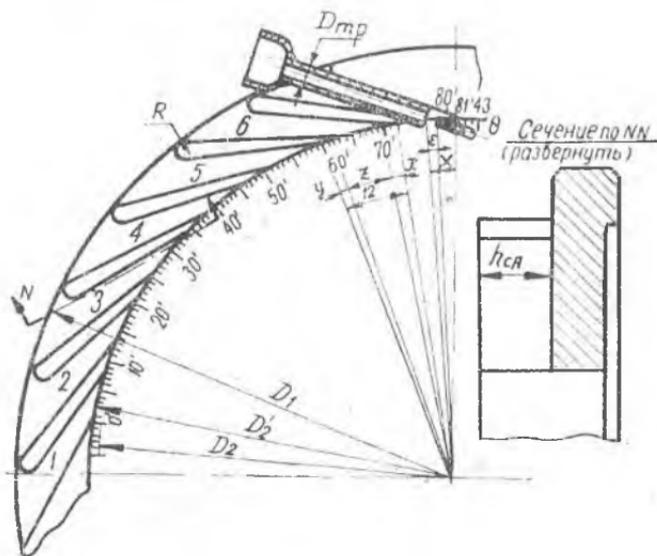
получим уравнение, из которого определяется центральный угол ε .

$$\cos \varepsilon + \sin \varepsilon \cdot \operatorname{tg} (a_{\kappa} + X) = \frac{D_2'}{D_2}. \quad (11)$$

При проведении опыта угол γ_n берется как среднее арифметическое двух крайних значений, отсчитываемых на шкале установки, при которых перепад столбов жидкости дифманометра становится одинаковым.

Отладка установки включает в себя проверку на герметичность и определение вышеуказанного угла γ_0 .

Проверка системы на герметичность производится при заглушенных деревянными пробками и дополнительно замазанных во всем канале испытуемой решетки и закрытых соответствующих кранах системы. Утечка воздуха из системы в течение десяти минут не должна превышать более двух десятых процента от минимального расхода воздуха через решетку, что составляет по шкале манометра падение давления не более половины деления от первоначального положения стрелки.



Фиг. 4.

Для определения угла γ_0 в канал решетки, как показано на фиг. 4, вставляется тарировочная трубка, внешний и внутренний диаметры которой соответственно равны $D_{mp} = 1,46 \text{ мм}$ и $d_{mp} = 0,9 \text{ мм}$. Установив визуально заборный конец трубки ППД по оси тарировочной трубки, уточняем ее установку по показанию дифманометра. Для этого, создав сверхкритический перепад давления, изменяем поочередно координаты l_n , γ_n и ω_n так, чтобы перепад столбов жидкости дифманометра при фиксированных значениях двух из указанных координат был минимальным. Повторяемость значений минимума означает, что приемник ППД установлен на продолжении оси тарировочной трубки, т. е. по направлению прямолинейной линии тока. Так как координаты трубки ППД при этом обозначаются через l_0 , γ_0 и ω_0 , то углу набегания прямолинейной струйки α_{10} соответствует на шкале установок угол γ_0 .

РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

1. Полное давление на входе в решетку СА

$$P_z^* = P_{zm}^* + \frac{P_n}{980,655} \cdot \frac{\kappa z}{\text{см}^2}.$$

2. Измеренное полное давление на выходе из решетки СА за скачком уплотнения, возникающим перед ППД в n -й точке по шагу на середине высоты канала

$$(P_{1tn}^*)' = P_z^* - \frac{(\Delta P_{1tn}^*)}{735,6} \cdot \frac{\kappa z}{\text{см}^2},$$

в i -й точке по высоте канала в сечении, где $(P_{1tn}^*)'$ имеет максимальное значение:

$$(P_{1hi}^*)' = P_z^* - \frac{(\Delta P_{1hi}^*)'}{735,6} \cdot \frac{\kappa z}{\text{см}^2}.$$

3. Измеренное (оно же и действительное) статическое давление на выходе из решетки СА до скачка уплотнения, но в тех же сечениях, где измеряется полное давление

в n -й точке по шагу решетки

$$P_{1tn} = \frac{P_n}{980,665} + \frac{\Delta P_{1tn}}{735,6} \cdot \frac{\kappa z}{\text{см}^2},$$

в i -й точке по высоте канала

$$P_{1hi} = \frac{P_n}{980,665} + \frac{\Delta P_{1hi}}{735,6} \cdot \frac{\kappa z}{\text{см}^2}.$$

4. Числа M_{1tn} и M_{1hi} определяем для каждой точки, пользуясь известной формулой для прямого скачка

$$\frac{(P_1^*)'}{P_1} = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \left(\frac{2}{k-1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \frac{M_1^{\frac{2k}{k-1}}}{\left(\frac{2k}{k-1} M_1^2 - 1 \right)^{\frac{1}{k-1}}}.$$

По данной формуле построен график и в зависимости от отношений $\frac{(P_{1tn}^*)'}{P_{1tn}}$ и $\frac{(P_{1hi}^*)'}{P_{1hi}}$ определяем числа M_{1tn} и M_{1hi} .

5. Действительное полное давление на выходе из решетки СА до скачка уплотнения в точках измерения

в n -й точке по шагу решетки

$$P_{1tn}^* = P_{1tn} \left[1 + \frac{k-1}{2} M_{1tn}^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \cdot \frac{\kappa z}{\text{см}^2},$$

в i -ой точке по высоте канала

$$P_{1hi}^* = P_{1hi} \left[1 + \frac{k-1}{2} M_{1hi}^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \cdot \frac{\kappa z}{\text{см}^2}.$$

6. Среднее значение полного давления на выходе из решетки на середине высоты по шагу канала.

$$P_{1t\text{cp}}^* = \frac{\sum_1^n (P_{1tn}^*)}{n}, \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}.$$

7. Среднее значение полного давления на выходе из решетки по высоте канала

$$P_{1h\text{cp}}^* = \frac{\sum_1^i (P_{1hi}^*)}{i}, \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}.$$

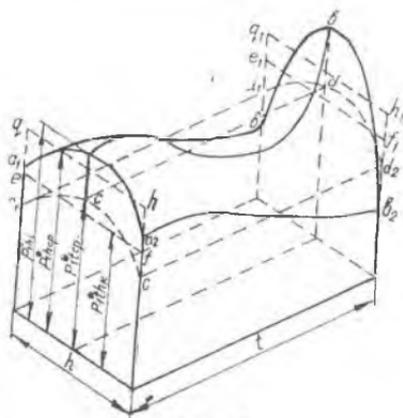
8. Среднее значение статического давления на выходе из решетки на середине высоты по шагу канала

$$P_{1t\text{cp}} = \frac{\sum_1^n (P_{1tn})}{n}, \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}.$$

9. Среднее значение статического давления на выходе из решетки по высоте канала

$$P_{1h\text{cp}} = \frac{\sum_1^i (P_{1hi})}{i}, \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}.$$

10. Среднее значение полного давления на выходе из решетки для канала (см. фиг. 5)



Фиг. 5.

Кривые a_1b_1 , ab , a_2b_2 соответствуют распределению полных давлений на выходе из решетки СА до скачка уплотнения по шагу P_{1tn}^* в трех различных сечениях по высоте канала. Кривые a_1a_2 и b_1b_2 соответствуют распределению полных давлений на выходе из решетки СА до скачка уплотнения по высоте канала P_{1ti}^* в двух различных сечениях по шагу.

Прямые c_1d_1 , cd , c_2d_2 соответствуют среднему значению полного давления на выходе из решетки по шагу канала $P_{1t\text{cp}}^*$ в трех различных сечениях по высоте.

Прямые qh и q_1h_1 соответствуют среднему значению полного давления на выходе из решетки по высоте канала $P_{1h\text{cp}}^*$ в двух различных сечениях по шагу.

Прямые ef и e_1f_1 соответствуют осредненному значению в данном сечении средних значений $P_{1t\text{cp}}^*$ г. е. среднему значению пол-

ного давления на выходе из решетки для канала P_{1thk}^* . Для определения этого давления считаем, что кривые c_1cc_2 и a_1aa_2 в любом сечении по шагу конгруэнтны, а прямые, ef и gh — параллельны. Исходя из этого предположения, можно составить пропорцию:

$$\frac{P_{1thk}^*}{P_{1hcr}^*} = \frac{P_{1hcr}^*}{P_{1hi}^*},$$

откуда

$$P_{1hcr}^* = P_{1hcr}^* \cdot \frac{P_{1hcr}^*}{P_{1hi}^*}, \frac{\kappa z}{c.m^2}.$$

11. Среднее значение статического давления на выходе из решетки для канала (аналогично п. 10).

$$P_{1thk} = P_{1hcr} \cdot \frac{P_{1hcr}}{P_{1hi}}, \frac{\kappa z}{c.m^2}.$$

12. Среднее значение полного давления на выходе для решетки, имеющей z каналов.

$$P_{1CPCA}^* = \frac{\sum_1^z (P_{1thk}^*)}{z}, \frac{\kappa z}{c.m^2}.$$

13. Среднее значение статического давления на выходе для решетки, имеющей z каналов.

$$P_{1CPCA} = \frac{\sum_1^z (P_{1thk})}{z}, \frac{\kappa z}{c.m^2}.$$

14. Коэффициент сохранения полного давления для канала

$$\sigma_k = \frac{P_{1thk}^*}{P_z^*}; \text{ для решетки } \sigma_{CA} = \frac{P_{1CPCA}^*}{P_z^*}.$$

15. Коэффициент потерь φ для канала

$$\varphi_k = \frac{\sqrt{1 - \left[\frac{P_{1thk}}{P_z^* \sigma_k} \right]^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}}{\sqrt{1 - \left[\frac{P_{1thk}}{P_z^*} \right]^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}},$$

для решетки

$$\varphi_{CA} = \frac{\sqrt{1 - \left[\frac{P_{1CPCA}}{P_z^* \sigma_{CA}} \right]^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}}{\sqrt{1 - \left[\frac{P_{1CPCA}}{P_z^*} \right]^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}}.$$

16. Температура воздуха на входе в решетку

$$T_z^* = t_g^* + 273, \text{ } ^\circ\text{K}.$$

17. Расход воздуха через решетку, замеренный нормальной диафрагмой.

$$G_g = 1,252 \cdot a \cdot \varepsilon \cdot d_g^2 \sqrt{\Delta P_g \cdot \gamma_g} \cdot \frac{1}{60}, \frac{\text{кг}}{\text{мин}}.$$

18. Теоретический расход

$$G_{th} = 0,397 \cdot F_{\text{кр}} \cdot \frac{P_z^*}{\sqrt{T_z^*}} \cdot 60, \frac{\text{кг}}{\text{мин}}.$$

19. Коэффициент расхода решетки

$$\mu = \frac{G_g}{G_{th}}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Е. Дейч. Техническая газодинамика, Издание 2-е, 1961.
-