



化工单元设备资料

射流真空泵

上海化学工业设计院医药农药工业设计建设组

本文译自1973年莫斯科出版的В.А.Успенский Ю.

М.Кузнецов 所著“射流真空泵”一书中第I、II、III

章，由王荫棠同志译，汪义尧、齐福来同志校。

目 录

第一章 气体喷射器	1
喷射流的动力特性	1
喷射方程式	10
流道的设计	13
喷射器的喷嘴	13
入口段	15
扩散器	16
混合段	18
气体喷射器的计算	23
第二章 蒸汽喷射器的设计与计算	29
蒸汽喷射器的作用原理和效率	30
理论和计算概论	35
主要计算方程	38
喷嘴的计算	41
喷射器主要几何参数的确定	45
流道尺寸的确定	51
第三章 多级蒸汽喷射装置	66
蒸汽喷射泵的基本特性	66
结 构	68
运转特性	86
喷射器的计算	92
用大喷射系数时喷射器的计算	104
第四章 蒸汽喷射泵真空系统的计算和真空测量 (未译)	
参考文献	

第一章 气体喷射器

喷射流的动力特性

目前，对自由射流的动力特性研究很详细，其扩展规律也为人们所了解。在自由射流的全长上均有吸入周围气体的作用。然而在喷射器内，介质的抽吸和混合过程则受到混合室壁面的约束。喷射器混合段直径与喷嘴口的直径比越大，那么，射流自喷嘴口至接触壁面所经的路程就越长，被射流吸入的气量也就越多。

图1表示了喷射流从喷嘴截面I-I至不同距离 X/R ，截面的动压头分布。喷嘴直径 $D_1=2R_1=28.3$ 毫米，喷嘴至混合段起始部长度 $L_1=300$ 毫米，混合段直径 $D_2=2R_2=156$ 毫米，长640毫米。混合段后之扩散器长800毫米，扩散器大小直径之比为1.56。

从动压头场看出，射流与壁面接触（截面a-a）之前，同自由射流一样，分起始部（长度 x' ）和基本部（长度 $x''-x'$ ）。

为了研究动压头场，利用无因次座标给出 h/h_0 与 $y/\sqrt{h_0}/2$ 的关系图（图2）（ h —研究的动压头； h_0 —该截面射流中心线上的动压头； y —研究点至中心线的距离； $\sqrt{h_0}/2$ —该截面上等于最大动压头一半的那个点至射流中心线的距离）。测定点选在离喷嘴的不同距离上，范围为0.6—11.5倍喷嘴半径。

同自由射流一样，起始部动压头场曲线发生着变化（曲线1, 2, 3, 4）；逐渐靠近基本部的动压头场变化曲线（曲线5）。

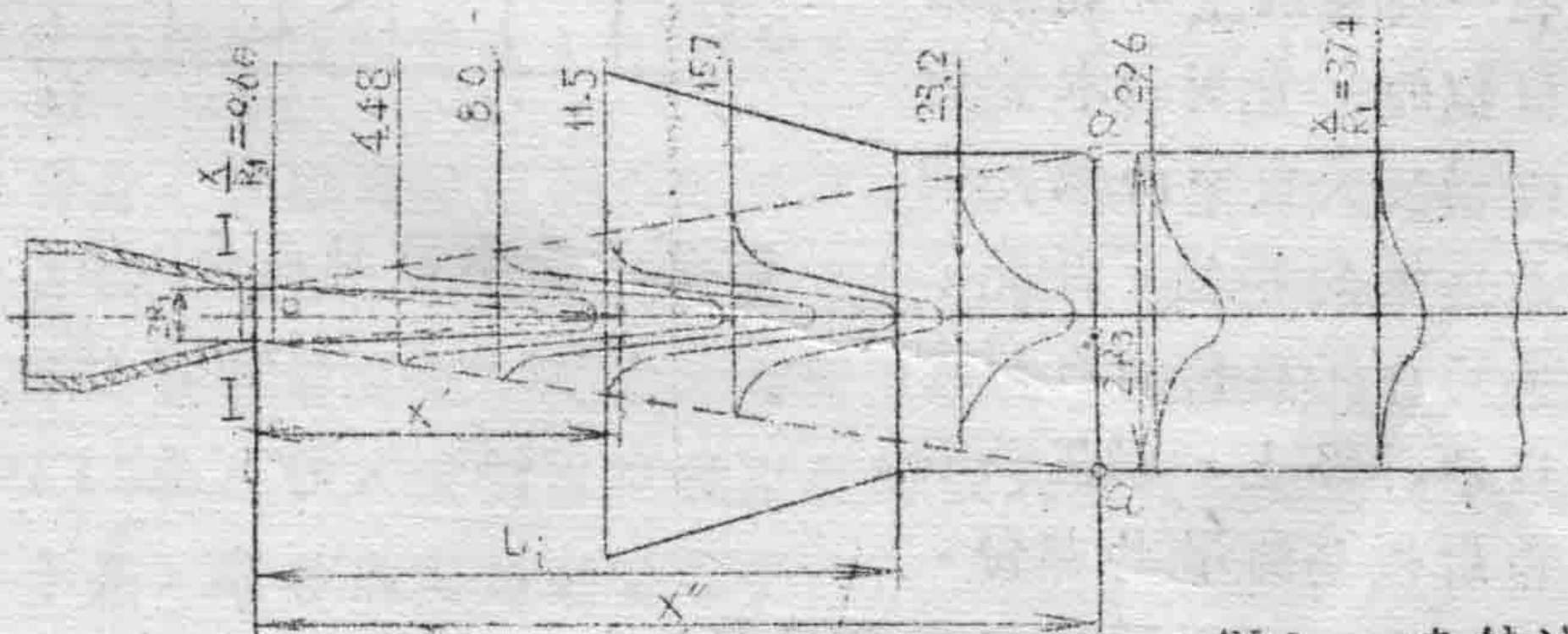


图1 喷射流示意图

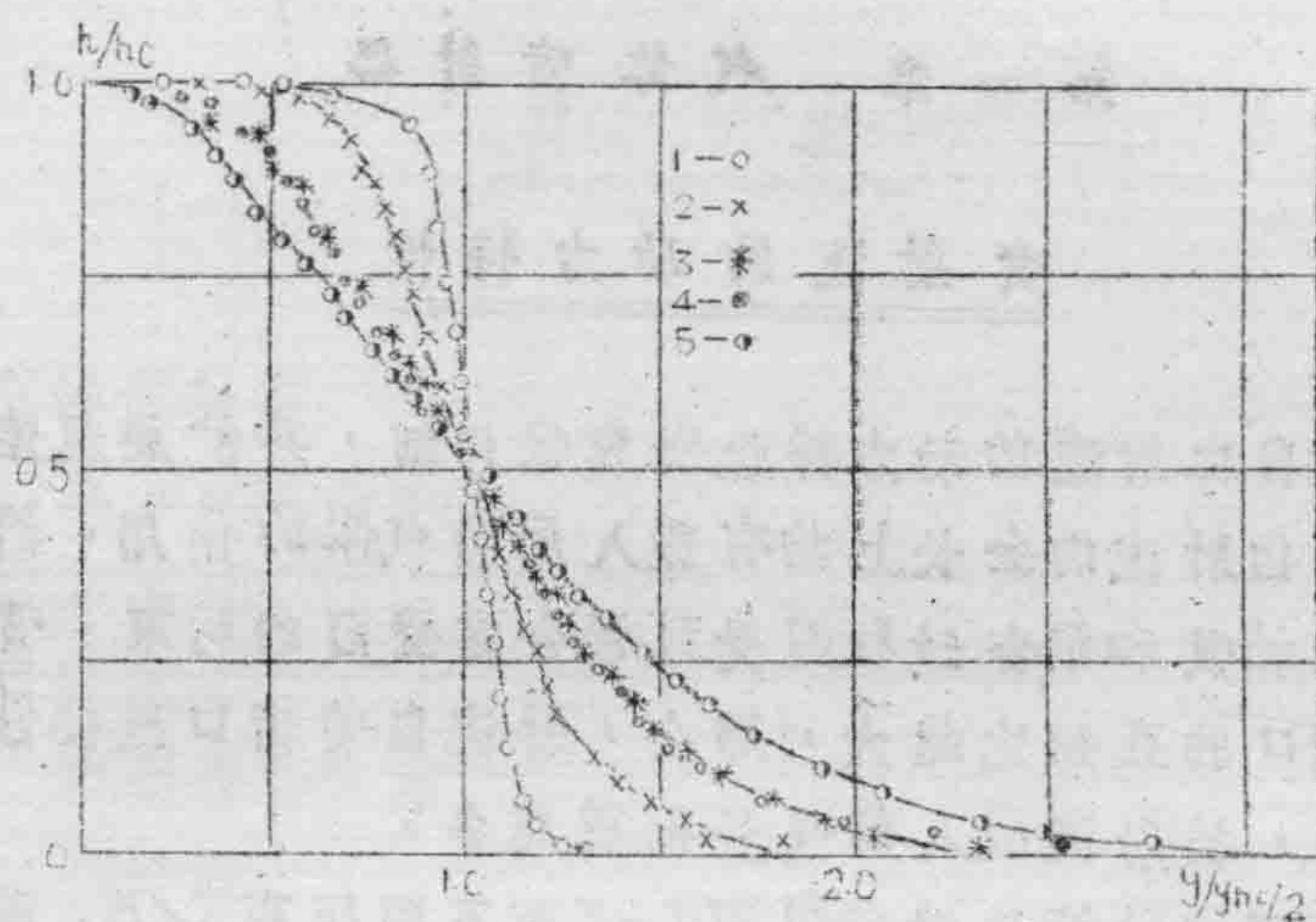


图2 射流起始部5个截面上的动压头 h/h_0 与距离 $y/y_{h_0}/2$ 的关系

1— $l_1=195$ 毫米, $x=3.5$ 毫米, $x/R_1=0.6$; 2— $l_1=250$ 毫米
 $x=63.5$ 毫米, $x/R_1=4.48$; 3— $l_1=300$ 毫米, $x=113.5$ 毫米
 $x/R_1=8.0$; 4— $l_1=200$ 毫米, $x=120.5$ 毫米, $x/R_1=8.5$
 5— $l_1=350$ 毫米, $x=163$ 毫米, $x/R_1=11.5$

图3表示基本部的上述关系, 其测定范围为11.5-67倍喷嘴半径。测定时可以固定喷嘴, 也可以使喷嘴沿轴线移动。所有试验点都落在一条曲线上, 说明动压头场是相似的。此时基本部的邻近截面内动压头由中心线处的最大值变至边缘的零值。因此, 这些动压头场为完整的自由射流场。在以后的截面上, 动压头场仅重复自由射流场的平均部份。

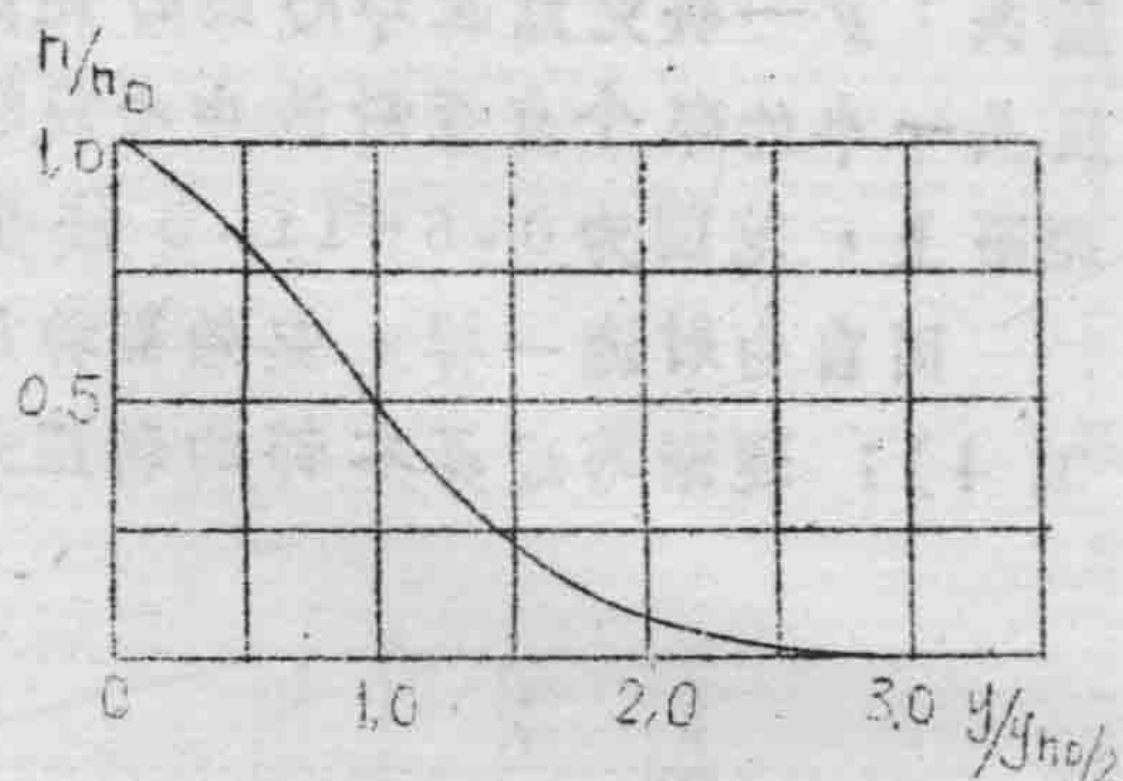


图3 基本部动压头 h/h_0 与距离 $y/y_{h_0}/2$ 的关系

图3中的曲线可用下列方程式表示,

$$\frac{h}{h_0} = \left[1 - \left(\frac{0.293 y}{yh_0/2} \right)^{3/2} \right]^4 \quad (1)$$

或

$$\frac{h}{h_0} = \left[1 - \left(\frac{y}{R_{\Gamma P}} \right)^{3/2} \right]^4 \quad (2)$$

式中 $R_{\Gamma P}$ —该截面上射流半径（射流中心线至边缘的距离）
 $yh_0/2$ 值决定着射流的边缘，其中有一个 0.293 的关系，即

$$R_{\Gamma P} = \frac{yh_0/2}{0.293} \quad (3)$$

这些方程对于计算冷射流和燃气火炬（横截面上密度有变化的射流），都是正确的。

喷射流截面上的动量

根据被测定的动压头场可以计算出射流不同截面上每秒钟的气体动量。此喷射流动量与自由射流动量不同，是有变化的，它随着不同截面上压力的不同而变化。图 4（曲线 1）表示了沿喷射器长度的压力变化。喷射器截面积 F 乘以 ΔP （该截面与射流始端的压差），得每个截面上的压力 $F\Delta P$ 公斤力（曲线 2）。曲线 3 表示沿射流长度上的动量变化。曲线 3 上的每个点都是根据座标系 h, y — y 的相应的动压头场（ h —距中心线 y 处的动压头）进行图解积分求得的。将曲线和横座标轴所围的面积乘以 4π （即 $4\pi \int_0^{R_{\Gamma P}} h y dy$ ），数值等于该截面上的动量。射流与壁面接触处的 $R_{\Gamma P}$ 值，等于此截面上混合段的半径。由曲线 3 可知，在射流与壁面接触之前（该试验 $x''=392$ 毫米）每秒气体质量的动量是不变的，等于 0.92。实验时喷嘴的喷射速度为 $w_1=115$ 米/秒，喷嘴出口截面处的吸入空气流速可取其为零（ $w_2=0$ ）。于是，每秒的起始动量等于

$$\frac{G_1 w_1}{g} + \frac{G_2 w_2}{g} = 0.88 \text{ 公斤力} \quad (4)$$

式中 $G_1 = 270$ 公斤力/时 和 $G_2 = 808$ 公斤力/时——分别为通过喷射器固定截面的工作空气量和吸入空气量。

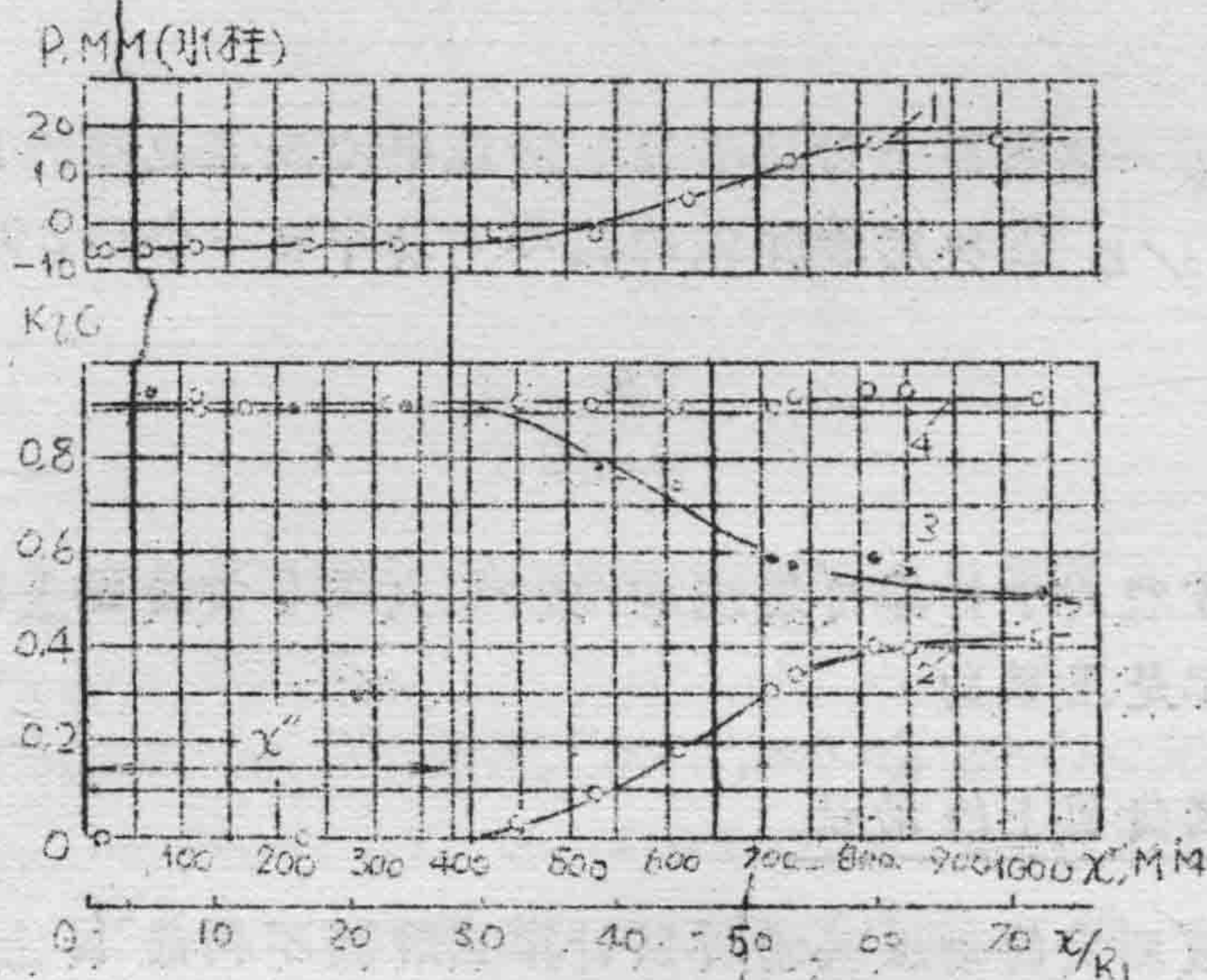


图4 喷射器长度上压力和动量变化图

求得的值小于上述确定的 0.92 公斤力。不相符的原因可能是由于试验误差，喷嘴出口截面上被吸入的空气速度 w 。不等于零，以及在此截面上工作空气速度场的平衡有所破坏等因素造成。这样，如果按 1/7 幂定律取喷嘴出口截面处的速度分布，那么实际动量将大于计算值 (0.88 公斤力) 1.5%。射流在 $x > x''$ 处，即射流与壁面接触之后，动量减小，而静压力增加。动量 (曲线 3) 和压力 (曲线 2) 变化曲线的纵座标的和仍然是一个常数 (曲线 4)，即

$$4\pi \int_0^{R_{up}} h y dy + F \Delta p = \text{常数} \quad (5)$$

由方程 (4) 和 (5) 得

$$\frac{G_1 w_1}{g} + \frac{G_2 w_2}{g} = 4\pi \int_0^{R_{\Gamma p}} h y dy + F \Delta p \quad (6)$$

通过喷射器工作的试验验证可知，冲量方程式(6)相当精确地描述了受约束射流的喷射过程。

动压头沿喷射流轴线的变化

根据喷射流不同截面上的动压头场，不仅可以确定射流的扩张角，还可以确定沿喷射流轴线动压头的变化(图5)。

曲线1为 h_0/h_1 与 x 的关系(h_0 ——喷射器轴线上的动压头； h_1 ——起始动压头； x ——截面和喷嘴之间距离)。射流轴线处的动压头在起始部是不变的。动压头从C点开始，最初急剧，然后平稳地下降。C点相当于过渡截面，位于离喷嘴 $x'=12R_1$ 处。

上面已讲过，喷射流的扩展情况可以用冲量方程式(6)说明。在射流与壁面接触之前，即在 x'' 部分，压力是不变的。此时方程(6)可写成下列形式

$$2h_1 F_1 + 2h_2 F_2 = 4\pi \int_0^{R_{\Gamma p}} h y dy \quad (7)$$

式中 F_1 和 F_2 ——分别为喷嘴出口处截面1-1上的喷射流和吸入流所通过的截面积；

h_1 和 h_2 ——分别为 F_1 和 F_2 截面上的喷射流和吸入流的动压头。

方程式右面部分所表示的动量，可以用下列形式表示

$$4\pi \int_0^{R_{\Gamma p}} h y dy = 4\pi h_0 R_{\Gamma p}^2 \int_0^1 \frac{h y}{h_0 R_{\Gamma p}} d \frac{y}{R_{\Gamma p}} \quad (8)$$

此方程中的积分为常数；将方程(2)的 h/h_0 值代入积分式中，得

$$\int_0^1 \frac{h y}{h_0 R_{\Gamma p}} d \frac{y}{R_{\Gamma p}} = \int_0^1 \left(1 - \left(\frac{y}{R_{\Gamma p}}\right)^{3/2}\right)^4 \frac{y}{R_{\Gamma p}} d \frac{y}{R_{\Gamma p}} = B = 0.0668 \quad (9)$$

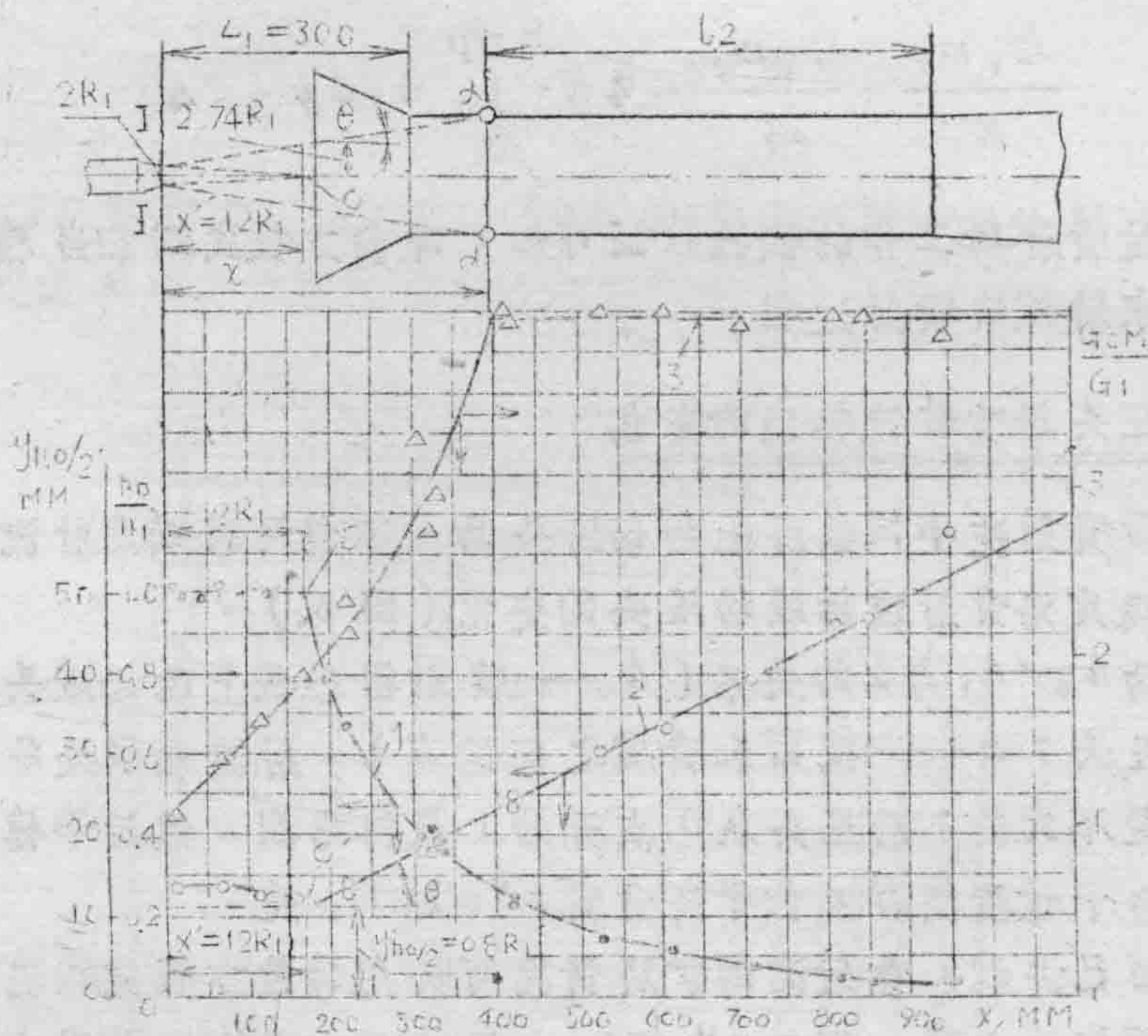


图5 喷射流的特性

1— $h_0/h_1 = f(x)$; 2— $y h_0/2 = f(x)$; 3— $G_{CM}/G_1 = f(x)$

式中 $B = 0.0668$ —射流基本部的动压头场系数

$$\text{则 } 4\pi \int_0^{R_{\Gamma p}} h y dy = 4\pi h_0 R_{\Gamma p}^2 B = 4B h_0 F \quad (10)$$

式中 $F = \pi R_{\Gamma p}^2$ —射流截面积。

由方程(7)和(10)求得

$$4B h_0 F = 2h_1 F_1 + 2h_2 F_2 \quad (11)$$

如果吸入流的速度在喷嘴出口处截面等于零 ($w_2 = 0$; $h_2 = 0$), 那么在过渡截面处 $h_0 = h_1$, $F = \pi (R_{\Gamma p}^1)^2$ 。

由此得:

$$R_{\Gamma p} = 2.74 R_1 \quad (12)$$

$$y'_{h_0}/2 = 0.8 R_1 \quad (13)$$

曲线 2 (图 5) 说明 $y'_{h_0}/2$ 值沿射流长度的变化。当 $x > x'$ 时, 根据方程(3), 在射流基本部内纵座标有一个 0.293 的关系。这个关系表示射流边界特性, 因此也表示其扩张角 θ 特性。上面已指出, 起始部的长度 $x' = 12R_1$, 相当于曲线 2 上 C' 点的横座标, 其纵座标 $y'_{h_0}/2 = 11$ 毫米, 根据方程(13)求得 $y'_{h_0}/2 = 0.8R_1 = 11.3$ 毫米。这就说明试验值与计算值是相符的。当 $x < x'$ 时, 即在起始部内, $R_{\Gamma p}$ 与 $y'_{h_0}/2$ 的关系不能用方程(3)确定, 因而曲线 2 在 C' 点处折断。

Г. Н. 阿勃拉莫维奇假设射流的扩张角在起始部和基本部都是相同的, 根据这一假设就提出用公式 $\alpha x'/R_1 = 0.67$ 计算喷嘴出口截面与过渡截面之间的距离。式中 $\alpha = 0.07 \sim 0.09$ 为结构系数, 此系数取决于湍流的主要参数。

Ю. В. 伊凡诺夫采用不同的喷嘴作试验, 确定结构系数为 $\alpha = 0.06$ 由此可知, 起始部的长度为 $x'/R_1 = 0.67/0.06 = 11.2$ 和 $x' = 11.2R_1$ 。根据 И. Д. 塞米金的数据, 起始部的长度为 $x' = 12R_1$ 。

根据曲线 2 (图 5) 直线段的斜率可以确定基本部的射流扩张角

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{y_{h_0}/2 - y'_{h_0}/2}{0.283(x - x')} = 0.177,$$

得 $\theta \approx 10^\circ$;

此处 θ 为基本部射流扩张角的一半; $x' = 12R_1$ 为起始部长度; $y'_{h_0}/2 = 0.8R_1$ 为过渡截面纵座标; $x, y_{h_0}/2$ 为动点座标。

在起始部的射流半扩张角可以用下列方程式求得

$$\operatorname{tg} \theta_H = \frac{R_{\Gamma p} - R_1}{x'} = 0.145,$$

得 $\theta_H = 8^\circ 15'$;

式中 $R_{\Gamma p} = 2.74R_1$ —— 起始部末端处射流半径 [方程(12)]。

由试验数据可知，射流扩张角不是不变的。当平均值为 $\theta = 8^{\circ}15'$ 时，起始部 (x') 射流的半扩张角在 0 至 10° 的范围内变动。

吸入气量

吸入气量 G_2 和混合段截面积 F_a 为主要计算值。此计算值通常以无因次参数 q 和 m_1 确定之。 $q = G_2 / G_1$ 为喷射系数，它等于吸入气量 G_2 和喷射气量 G_1 之比； $m_1 = F_a / F_1$ 为射流和壁面接触处混合段的截面积 F_a 与喷嘴出口截面积 F_1 之比。

在射流与壁面接触之前的这一区段（长度为 x'' ）内吸入气体。试验证明，在这一区段内的压力是不变的。

对于相距 x'' 距离的 2 个平行的截面 I-I 和 a-a（图 6）之间的区段，假定在喷嘴出口处截面上的吸入流速度等于零时可得到下面的冲量方程。

$$2h_1 F_1 = 4B h_0 F_a \tag{14}$$

或

$$\frac{h_0}{h_1} = \frac{1}{2B m_1} \tag{15}$$

假定工作气体的比重 γ_1 与吸入气体的比重 γ_2 相等 ($\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$)，整理方程 (15) 和 (2) 可得出截面离中心线 y 处的速度方程。

$$w = \frac{w_1}{\sqrt{2 B m_1}} \left(1 - \left(\frac{y}{R_{FP}} \right)^{3/2} \right)^2 \tag{16}$$

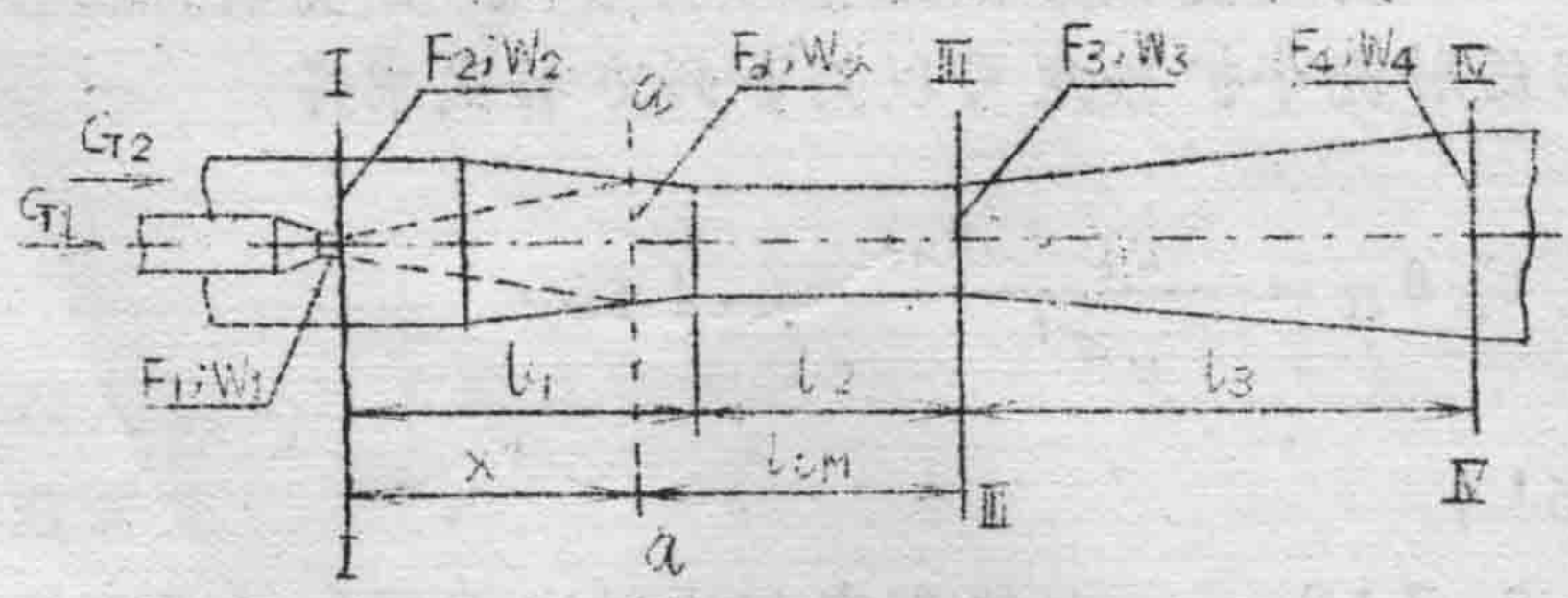
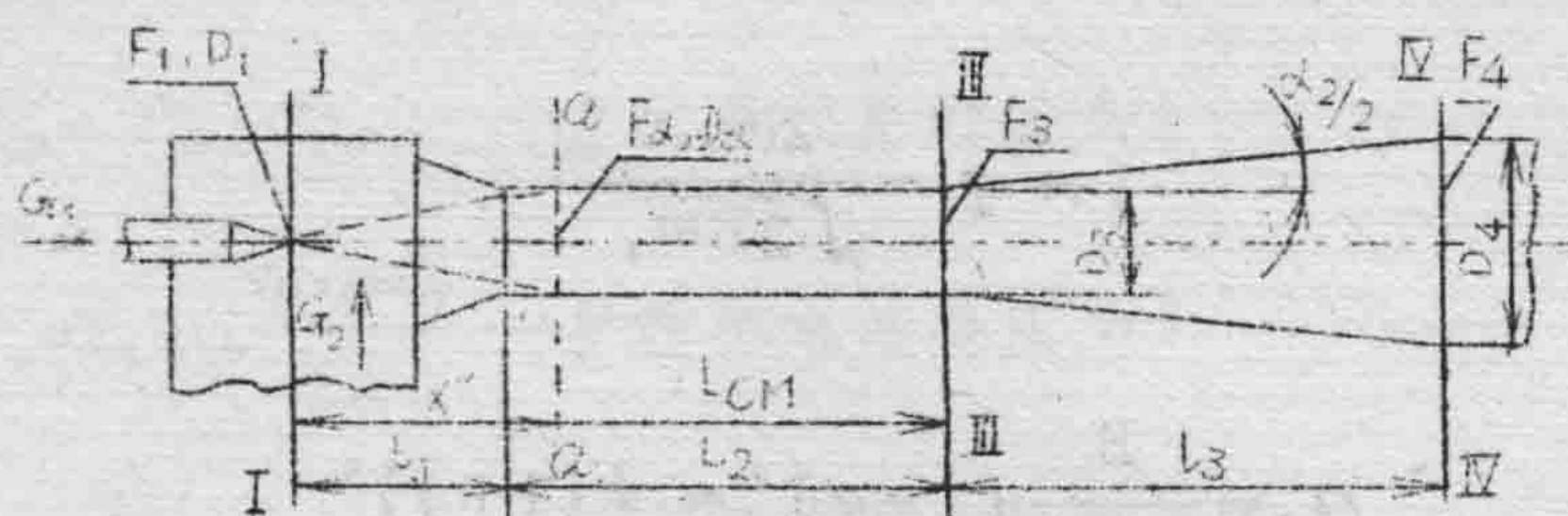


图 5 (a).



(6)

图6 在截面 I-I 上吸入气体速度为 w_2 时, 喷射器状态图

a — 当 $w_2 > 0$; 6 — 当 $w_2 = 0$

在射流截面 $F_a = \pi R_{rp}^2$ 处的混合物流量 (力单位)

$$G_{CM} = 2\pi \int_0^{R_{rp}} \gamma w y dy \quad (17)$$

联解方程 (16) 和 (17), 得

$$G_{CM} = 2\pi\gamma_1 \frac{w_1}{\sqrt{2Bm_1}} \int_0^{R_{rp}} \left(1 - \left(\frac{y}{R_{rp}}\right)^{3/2}\right)^2 y dy \quad (18)$$

或

$$G_{CM} = \frac{2\pi\gamma_1 w_1 R_{rp}^2 m_1}{\sqrt{2Bm_1}} \int_0^1 \left(1 - \eta^{3/2}\right)^2 \frac{y}{R_{rp}} d\frac{y}{R_{rp}} \quad (19)$$

式中

$$R_{rp}^2 / R_1^2 = F_a / F_1 = m_1$$

当 $\eta = y/R_{rp}$ 由零变至 1 时, 方程 (19) 的积分为:

$$\varepsilon = \int_0^1 (1 - \eta^{3/2})^2 \eta d\eta = 0.1286 \quad (20)$$

工作气体消耗量为 $G_1 = \gamma_1 w_1 \pi R_1^2$, 以及 $G_M / G_1 = \frac{G_1 + G_2}{G_1} = 1 + q$,

由方程 (19) 和 (20) 得出

$$1 + q = \frac{2m_1 \varepsilon}{\sqrt{2Bm_1}},$$

由此得

$$m_1 = \frac{B}{2\varepsilon^2} (1+q)^2 = k(1+q)^2 \quad (21)$$

根据方程(9)和(20)，系数

$$k = \frac{0.0668}{2 \times 0.1266^2} = 2.02 \approx 2$$

这样，在喷嘴至射流与壁面接触处的区段，可得到计算喷射器的主要方程之一。

$$m_1 = 2(1+q)^2 \quad (22)$$

此方程通过试验验证，验证条件采用以空气抽入空气，喷嘴出口射流的速度 w ，近临界速度，以及 $q > 1$ 。

喷射方程式

为推导计算喷射器的主要方程（见图6），采用下列符号： $m = F_3/F_1$ ； $n = F_3/F_2$ ； $S = F_4/F_3$ ：

$$h_1 = \frac{\gamma_1 w_1^2}{2g} \text{——喷嘴出口处（截面I-I）喷射流的动压头；}$$

$$h_2 = \frac{\gamma_2 w_2^2}{2g} \text{——在截面I-I上吸入流的动压头；}$$

$$h_3 = \frac{\gamma_{CM} w_3^2}{2g} \text{——在截面III-III上的混合物的动压头；}$$

P_1, P_a, P_3, P_4 ——分别为截面I-I, a-a, III-III,和IV-IV上的静压力；

$h_w = P_3 - P_1$ —— 喷射器产生的压头；

$P_4 = P_3 + \varphi \frac{\gamma_{CM} w_3^2}{2g}$ —— 扩散器末端处压力；

φ —— 扩散器内压力转换系数；

γ_1, γ'_1 —— 分别为截面 I-I 和 III-III 处的喷射气体比重；

γ_2, γ'_2 —— 分别为截面 I-I 和 III-III 处的吸入气体比重；

γ_{CM} —— 混合物比重；

$$\gamma_{CM} = \frac{G_1 + G_2}{\frac{G_1}{\gamma'_1} + \frac{G_2}{\gamma'_2}} = \frac{1 + q}{\frac{1}{\gamma'_1} + \frac{1}{\gamma'_2} q} \quad (23)$$

圆筒形混合段末端速度场趋于平坦，此情况下喷射器截面 I-I 和 III-III 之间部分的冲量方程(6)可写成下列形式

$$\frac{G_1 w_1}{g} + \frac{G_2 w_2}{g} = \frac{G_{CM} w_3}{g} + \Delta P F_3$$

或 $2h_1 F_1 + 2h_2 F_2 - 2h_3 F_3 = F_3 (P_3 - P_1) \quad (24)$

方程两边除以 $2h_1 F_1$ ，并以速度来表示动压头，得如下形式；

$$\frac{m(P_3 - P_1)}{2h_1} = 1 - \frac{\gamma_{CM} w_3^2 m}{\gamma_1 w_1^2} + \frac{\gamma_2 w_2^2 m}{\gamma_1 w_1^2 n}$$

或 $\frac{h_w}{h_1} = \frac{2}{m} - \frac{2\gamma_{CM} w_3^2}{\gamma_1 w_1^2} + \frac{2\gamma_2 w_2^2}{a\gamma_1 w_1^2} \quad (25)$

速度比值通过喷射系数来表示；

$$\frac{w_3}{w_1} = (1 + q) \frac{\gamma_1}{\gamma_{CM} m} ; \quad \frac{w_2}{w_1} = q \frac{n\gamma_1}{m\gamma_2}$$

式中

$$w_1 = \frac{G_1}{\gamma_1 F_1} ; \quad w_2 = \frac{G_2}{\gamma_2 F_2} ; \quad w_3 = \frac{G_1 + G_2}{\gamma_{CM} F_3}$$

将这些关系代入方程(25)中, 得喷射主要方程, 此方程表示被克服的阻力 h_w , 喷射流动压头 h_1 , 喷射系数 q , 及 m 和 n 值之间的关系;

$$\frac{h_w}{h_1} = \frac{2}{m} - \frac{2(1+q)^2 \frac{\gamma_1}{\gamma_{CM}} - 2q^2 n \frac{\gamma_1}{\gamma_2}}{m^2} \quad (26)$$

当 $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_{CM}$ 时

$$\frac{h_w}{h_1} = \frac{2}{m} - \frac{2(1+q)^2 - 2q^2 n}{m^2} \quad (27)$$

喷射器效率

$$\eta = \frac{G_2 \gamma_1 h_w}{G_1 \gamma_2 h_1} = q \frac{h_w}{h_1} \quad (28)$$

为了确定效率的最大值, 将方程(27)中 h_w/h_1 值代入方程(28)中, 然后求出一阶导数 $d\eta/dm$, 使它等于零。

最佳的 m 值以下列方程表示,

$$m = 2(1+q)^2 - 2q^2 n \quad (29)$$

对于 $w_2 = 0$, $n = 0$ 的喷射器, 最佳值

$$m = 2(1+q)^2 \quad (30)$$

与分析喷射流气体动力学特性的方程(23)所得的值相同。联解方程(27)和(29)得

$$\frac{h_w}{h_1} = \frac{1}{1.3} \quad (31)$$

在使用计算方程时应注意, $m = F_3/F_1$ 和 $n = F_3/F_2$ 值, 根据气流连续性方程, 表示了工作气体和吸入气体速度与混合后气流速度的关系:

$$m = \frac{w_1}{w_3} (1+q); \quad (32)$$

$$\eta = \frac{w_2}{w_3} \left(1 + \frac{1}{q} \right) \quad (33)$$

在喷嘴出口处的工作气体速度总是超过截面Ⅲ-Ⅲ处的混合气体速度。即 $w_2 > w_3$ ，因而，在任何 q 值的情况下均 $\eta > 1$ 。 η 值在 $1 > \eta \geq 0$ 的范围内变动。

流 道 的 设 计

喷射器的喷嘴

喷嘴内喷射流的压力通常转变为动压头 h_1 。

图7, a为气体喷射器一种喷嘴的简图。根据实验数据算出这种喷嘴的流量系数为0.827,这与普通的圆筒形喷嘴是相符的。喷嘴末端带有筒形段的锥形喷嘴(图7, b)的效果更好。筒形部分的最佳长度为 $l_c = 0.25 D$ 。这种喷嘴的流量系数可增大到0.97-0.98。

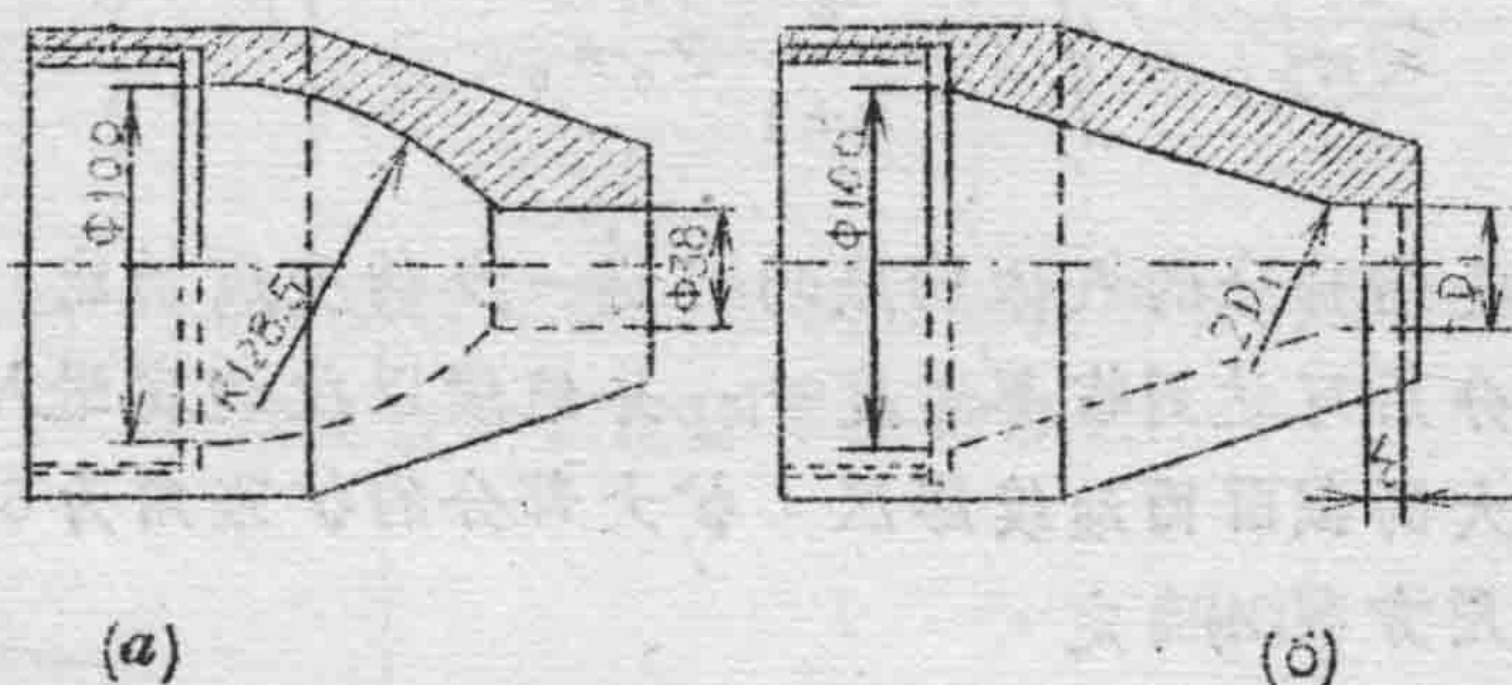


图 7 喷射器的喷嘴

如工作介质采用气体或水蒸汽，当流速低于临界速度，即压力比为 $\frac{P_1}{P_0} > \pi_{kp}$ 时，则可采用出口处具有筒形部分的锥形喷嘴。式中 P_1 —— 喷嘴出口处的压力，公斤力/米²； P_0 —— 喷嘴前的压力，公斤力/米²； π_{kp} —— 临界压力比；对于二原子气体， $\pi_{kp} = 0.528$ ；

对于过热蒸汽, $\pi_{kp}=0.546$; 对于饱和蒸汽, $\pi_{kp}=0.577$ 。

喷嘴出口处的气流速度

$$w_1 = \mu \sqrt{2g \frac{k}{k-1} P_0 v_0 \left(1 - \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)}; \quad (34)$$

式中 μ —— 流量系数;

v_0 —— 喷嘴前气体的比容, 米³/公斤;

k —— 绝热指数;

$k=1.41$ —— 用于正常条件下的二原子气体;

$k=1.035+0.1x$ —— 用于干燥度为 x 的饱和蒸汽;

$k=1.135$ —— 用于干饱和蒸汽;

$k=1.3$ —— 用于过热蒸汽。

喷嘴的压力比 $\frac{P_1}{P_0} < \pi_{kp}$ 时, 只有一部分膨胀功能变为动能。气

体膨胀到临界压力 $P_{kp} = \pi_{kp} P_0$ 时, 流速为

$$w_{kp} = \sqrt{2g \frac{k}{k+1} P_0 v_0} \quad (35)$$

进入喷嘴收缩部分的气体膨胀功将进一步转变成动能。气体或蒸汽通过收缩部分后可达到临界速度 w_{kp} 并继续以此速度进入扩大部分, 于前进中遇增大的截面而继续膨胀。扩大部分的扩张角为 $6-11^\circ$ 。膨胀末端的气速用方程(34)确定。

喷嘴狭窄部分的截面积用下列公式确定

$$F_{kp} = \frac{G_1}{\phi_{\max} \sqrt{P_0 / v_0}} \quad (36)$$

式中 G_1 —— 以公斤力/秒计;

$\phi_{\max}$ —— 系数 (用于二原子气体时 $\phi_{\max}=2.14$; 用于过热蒸汽和饱和水蒸汽时 $\phi_{\max}=2.03$)。

喷嘴出口的截面积