VELOCIDAD DE BOMBAS MECANICAS DE VACIO

E. J. Bertomeu

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Resumen.— *Se consideran las fórmulas conocidas para el cálculo de la Velocidad de Bombeo de bombas mecánicas y se deducen dos nuevas expresiones válidas una para presiones altas y la otra para presiones bajas explicándose mediante ellas las curvas empíricas de las bombas mecánicas.*

I. INTRODUCCION

El cálculo de la velocidad de bombeo suele mencionarse en la literatura con referencia al caudal volumétrico de una bomba mecánica, independientemente de la presión y en muy pocas ocasiones en cuanto a su dependencia con esta variable. El propósito de este trabajo es el de considerar la fórmula de la velocidad en función de la presión mínima mencionada por R. Witty (1) e intentar aproximarla a las curvas reales en base a las diversas condiciones del flujo gaseoso con que opera una bomba mecánica.

II. CAUDAL VOLUMETRICO

Siendo f la frecuencia de rotación de una bomba mecánica, n el número de paletas y V_b el volumen máximo de la cámara de admisión de aire, la velocidad de bombeo S o caudal volumétrico estará dada por:

$$S = n f V_b \tag{1}$$

y si indicamos con V_e y V_r los volúmenes del estator y del rotor, respectivamente, será:

$$V_b = (V_e - V_r)/n \tag{2}$$

que puede expresarse en función de los radios del estator y rotor, R_e, y R_r respectivamente:

$$V_b = \pi e(R_e^2 - R_r^2)/n \tag{2'}$$

siendo e el ancho del estator.

Generalmente el volumen V_b es algo menor que la diferencia (2) debido al volumen propio de la o las paletas. Esto debe tenerse en cuenta al sustituir el radio R_r aumentándolo en el coeficiente a tal que sea:

$$a = \left[1 + \text{Volumen de las paletas}/(\pi R_r^2 e)\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (3)$$

Teniendo en cuenta las expresiones (1), (2') y (3) puede escribirse que:

$$S = \pi fe(R_e^2 - R_r^2 a^2)$$

y, todavía, haciendo $k = R_c/R_r$:

$$S = \pi fc R_r^2(k^2 - a^2) \qquad (4)$$

En general, para bombas medianas y grandes es:

$$a \cong 1$$

y para todas las bombas mecánicas:

$$1{,}1 \leqq k \leqq 1{,}5$$

La expresión obtenida así proporciona solamente la información relativa al caudal volumétrico de la bomba mecánica independientemente de la presión del recinto que evacua, de la descarga y de la mínima presión alcanzable.

III. VELOCIDAD DE BOMBEO EN FUNCION DE LA PRESION MINIMA Y DE LA PRESION EN LA DESCARGA

Estudiaremos ahora el proceso de descarga que se produce en cada ciclo de compresión en el que ocurre lo siguiente:

A) el gas ingresó a la cámara de aspiración a la presión P que tenía en el recinto que se evacua (supondremos que el volumen de dicho recinto es mucho mayor que V_b). Si el volumen mínimo de la cámara de descarga es V_c, la presión que alcanzará el gas al ser comprimido será:

$$P' = \frac{PV_b}{V_c} = \rho P$$

siendo ρ la razón de compresión.

B) el gas que quedó en la cámara de compresión del ciclo anterior se encontrará a la presión P_c que puede ser mayor que la presión P_d existente en la parte exterior de la descarga. En efecto esto es posible porque a medida que la presión P de los gases a evacuar disminuye, la descarga que se produce a través de la válvula respectiva irá retardándose porque el excéntrico tendrá que alcanzar posiciones cada vez más próximas al final del ciclo para que los gases descarguen (2). Este retardo dependerá de V_c y su razón con V_b puesto que cuanto mayor sea ρ tanto más tardará en propagarse la cresta de compresión hasta la válvula de descarga y por tanto P_c deberá depender inversamente de ρ. También la frecuencia del ciclo, nf, tendrá importancia haciendo crecer P_c directamente porque a mayor frecuencia será menor el intervalo disponible en el proceso de descarga. Podrá ponerse entonces:

$$P_c = P_d + (P_d - P)k_1 nf/\rho \qquad (5)$$

siendo k_1 una constante de proporcionalidad.

Se advierte que la expresión da para P_c el mismo valor que P_d cuando la bomba trabaja a la misma presión P que en la descarga porque en tal caso todo el ciclo de compresión es de descarga. Siendo P_c el valor final de la presión residual en la cámara de descarga una vez terminado el ciclo de evacuación, la variación total de la presión en la cámara será:

$$\Delta P \leqq \rho P + (P_d - P)\, k_1 nf/\rho \qquad (6)$$

El caudal de gas descargado deberá ser en el mejor de los casos:

$$Q = nf\, V_c\, \Delta P$$

es decir:

$$Q = nf\, V_c[\rho P + k_1 nf\,(P_d - P)/\rho] \qquad (7)$$

La velocidad de bombeo a la presión P del recinto que se evacua será igual a Q/P y por tanto indicándola con S_1 se tendrá:

$$S_1 = S[1 + (P_d/P - 1)\, k_1 nf/\rho^2] \qquad (8)$$

en la cual S está dado por la (4).

Ahora bien, como en todas las bombas mecánicas la presión tiene un valor mínimo P_0 para la cual la velocidad se hace cero, teniendo en cuenta esta condición y sustituyendo P_0 en la (8) puede determinarse el valor de k_1:

$$k_1 = [P_0/(P_0 - P_d)]\, \rho^2/nf$$

que reemplazada en la (8) da:

$$S_2 = S[1 + (P_d/P - 1)/(1 - P_d/P_0)] \tag{9}$$

que es la expresión dada por R. Witty en el trabajo citado.

Esta expresión que es útil para adecuar la velocidad de bombeo a las condiciones límites de trabajo de toda bomba no resulta eficaz sin embargo para representar las curvas empíricas.

IV. VELOCIDAD DE BOMBEO EN FUNCION DE LAS CONDICIONES DE ADMISION

Nos proponemos ahora estudiar la dependencia entre la velocidad y otras variables características de las bombas que evidentemente han de condicionar el régimen de operación de las mismas. Tales son la conductancia de admisión y la forma en que varía el volumen de admisión en función del tiempo.

Para el caso de una bomba de dos paletas con rotor excéntrico en el estator se puede demostrar que con bastante aproximación el volumen de la cámara de admisión de la bomba aumenta linealmente con el tiempo, siendo el coeficiente el valor S, es decir:

$$V_b(t) \cong St \tag{10}$$

La expresión (10) tiene importancia si se la considera en relación con la presión máxima P que alcanza el gas que ingresa a la cámara de admisión durante el ciclo de aspiración. En efecto, el gas que ingresa a la cámara V_b cuando la presión P es elevada lo hace en condiciones de flujo turbillonario y cuando P es baja en condiciones de flujo viscoso.

Para decidir cuáles son las condiciones del flujo gaseoso debe tenerse en cuenta el número de Reynolds el que en definitiva depende de la velocidad de la bomba y de las dimensiones de la lumbrera de admisión. El estudio de diversas bombas permite llegar a la conclusión de que el flujo puede ser turbillonario hasta presiones P del orden del milímetro cosa que evidentemente no puede especificarse definitivamente por anticipado para todas las bombas mecánicas porque depende de la forma y dimensiones de la lumbrera de entrada.

Estudiaremos ahora el proceso de aspiración en la cámara V_b en la cual habíamos supuesto que el gas alcanzaba en cada ciclo de aspiración la misma presión P que existe en el recinto que se evacua.

Si indicamos con P_b la presión instantánea en V_b durante la aspiración, en condiciones turbillonarias el caudal de gas aspirado estará expresado por (3):

$$Q = c_t\,(P - P_b)^{\frac{1}{2}} \qquad (11)$$

siendo c_t un coeficiente cuyo subíndice t caracteriza la condición del flujo turbillonario. Este coeficiente ha de depender de la forma, sección y pulimento de la lumbrera de admisión.

Teniendo en cuenta la (10) puede ponerse

$$Q = d\,(P_b V_b)/dt = S\,P_b + S\,t\,dP_b/dt \qquad (12)$$

que con la (11) puede integrarse:

$$\int_0^{1/nf} dt/t = \int_{P_0}^{\overline{P}} dP_b/[c_t(P - P_b)^{\frac{1}{2}}/S - P_b]$$

en la cual los límites de integración son P_0 para el instante inicial $t = 0$ y $\overline{P}$ para el instante en que termina el ciclo es decir $t = 1/nf$.

La integral da para $\overline{P}$ el valor:

$$\overline{P} = c_t[(P + c_t^2/4S^2)^{\frac{1}{2}} - c_t/2S]/S \qquad (13)$$

y reemplazando este valor de $\overline{P}$ en la (9) quedará:

$$S_{3t} = S\left\{1 + \frac{\dfrac{P_d}{\dfrac{c_t}{S}\left[\left(P + \dfrac{c_t^2}{4S^2}\right)^{\frac{1}{2}} - \dfrac{c_t}{2S}\right]} - 1}{1 - \dfrac{P_d}{P_0}}\right\} \qquad (14)$$

reemplazable por la expresión:

$$S_{3t} = S\left\{1 - \frac{P_0}{\dfrac{c_t}{S}\left[\left(P + \dfrac{c_t^2}{4S^2}\right)^{\frac{1}{2}} - \dfrac{c_t}{2S}\right]}\right\} \qquad (15)$$

puesto que es $P_d \gg P_0$.

Si indicamos:

$$S_{3t} = (S - S_{3t})/S \qquad (16)$$

la diferencia relativa entre la velocidad de bombeo en condiciones turbillonarias y el caudal volumétrico, será:

$$\delta S_{3t} = 2S^2P_0/\{[(4S^2P + c_t^2)^{1/2} - c_t]\, c_t\} \qquad (17)$$

expresión en la cual puede verse:

A) que el aumento de la frecuencia de rotación aumenta δS_{3t} y por consiguiente empeora el comportamiento relativo de la velocidad de bombeo,

B) el aumento del volumen V_b de la cámara de admisión produce un efecto análogo al del aumento de la frecuencia,

C) es conveniente para un dado valor de S disminuir la frecuencia y aumentar V_b agrandando el ancho e del estator en cuyo caso será posible agrandar c_t disminuyendo por consiguiente δS_{3t}.

Al descender la presión P el flujo evoluciona hacia condiciones de régimen viscoso en cuyo caso el caudal Q de gas que ingresa a la bomba dependerá de un coeficiente c_v que caracteriza esta condición, el cual en general es de la forma (4):

$$c_v = c(P + P_b)/2 + c' \qquad (18)$$

Resultará entonces el caudal aspirado:

$$Q_a = c_v(P - P_b) = [c(P + P_b) + c']\,(P - P_b)$$

Es necesario ahora tener en cuenta que en razón de la presión mínima alcanzable P_0 este caudal debe tender a anularse. Para lograr tal condición consideramos que el caudal aspirado Q_a disminuirá en la cantidad Q_r debido a los gases que retornan a la cámara de aspiración, de modo que será:

$$Q = Q_a - Q_r$$

el caudal neto extraído. Puede ponerse entonces:

$$Q_r = \alpha P_0 \qquad (19)$$

donde α es un coeficiente a determinar y con ello tendremos

$$Q = [c(P + P_b)/2 + c']\,(P - P_b) - \alpha P_0 = SP_b + St\,dP_b/dt \qquad (20)$$

ecuación que integrada ahora entre los instantes 0 y $1/nf$ y las presiones P_0 y $\overline{P}$ conduce al resultado:

$$\overline{P} = [(c' + S)^2/c^2 + 2c'P/c + p^2 - \alpha P_0]^{1/2} - (c' + S)/c \qquad (21)$$

en la cual la condición de que, para $P = P_J$ deberá ser $\overline{P} = P_0$ conduce a que:

$$\alpha = -2S/c$$

Ahora bien, teniendo en cuenta que el término $-\alpha P_0$ de la ecuación (20) ha sido agregado para satisfacer la condición empírica respecto a la presión final P_0 para la cual deberá anularse Q y comparando los valores teóricos con los experimentales se advierte la conveniencia de que el término $2SP_0/c$ que correspondería reemplazar en la (21) en lugar de $-\alpha P_0$ tenga a altas presiones poco valor, lo que conduce a adoptar:

$$\alpha = -(2S/c)\, e^{-(P - P_0)\, 10^{-3}} \tag{22}$$

Sustituyendo este valor en la (21) y ésta en la (9) resulta:

$$S_{3v} = S \left\{ 1 + \frac{\dfrac{P_d}{\left[\left(\dfrac{c' + S}{c} \right)^2 + \dfrac{2S}{c}\, e^{-(P - P_0)\, 10^{-3}} + \dfrac{2c'}{c} P + P^2 \right]^{1/2} - \dfrac{c' + S}{c}} - 1}{1 - \dfrac{P_d}{P_0}} \right\} \tag{23}$$

que para presiones P_d elevadas (bombas de una sola etapa) puede ponerse:

$$S_{3v} = S \left\{ 1 + \frac{P_0}{\left[\left(\dfrac{c' + S}{c} \right)^2 + \dfrac{2S}{c}\, e^{-(P - P_0)\, 10^{-3}} + \dfrac{2c'}{c} P + P^2 \right]^{1/2} - \dfrac{c' + S}{c}} - 1 \right\} \tag{24}$$

Las expresiones (15) y (24) que proponemos ajustan relativamente bien las curvas empíricas de bombas mecánicas y naturalmente, mucho mejor que la (9).

La decisión respecto a la presión para la cual la primera fracasa y la presión para la cual comienza a ser aplicable la segunda está vinculada al número de Reynolds que caracteriza las condiciones de operación de la bomba. Queda una zona intermedia en la cual es posible promediar valores de ambas curvas o extrapolar la primera curva hasta la segunda. Al respecto queda todavía trabajo por hacer para tomar una decisión definitiva.

REFERENCIAS

(1) R. WITTY: *Journal of Scientific Instruments.* 22, 201 (1945).

(2) B. CHAMPEIX: *Physique et Technique des Tubes Electroniques,* t. I; *Elements de Tech-du Vide.* Ed. Dunod (1958).

(3 y 4) S. DUSHMAN: *Scientific Foundations of Vacum Technique.* Ed. J. Wiley and Sons (1949).

Entregado a la Comisión de Publicaciones, el 15/VI/61.