

УДК 627.74

ГИДРОДИНАМИКА

С. Е. Сирадегян, член-корреспондент АН Армянской ССР А. М. Гаспарян,
 Р. Е. Акопян

Краткое описание работы эрлифта и его расчет

(Представлено 9/VII 1973)

Количественное определение L_c и L_T , входящих в уравнение энергетического баланса (1)

$$L_b = L_n + L_k + L_c + L_T \quad (1)$$

открыло возможность более полного понимания работы эрлифта и сравнительно точного его расчета.

1. Основные уравнения. Отдельные составляющие уравнения (1) могут быть представлены так.

1. Работа изотермического расширения воздуха:

$$L_b = P_1 Q_1 \ln P_1 / P_2, \quad (2)$$

где P_1 и Q_1 — давление и объем уже вошедшего в воду воздуха в сечении 1—1, а P_2 — давление на выходе в сечении 2—2 (рис. 1.).

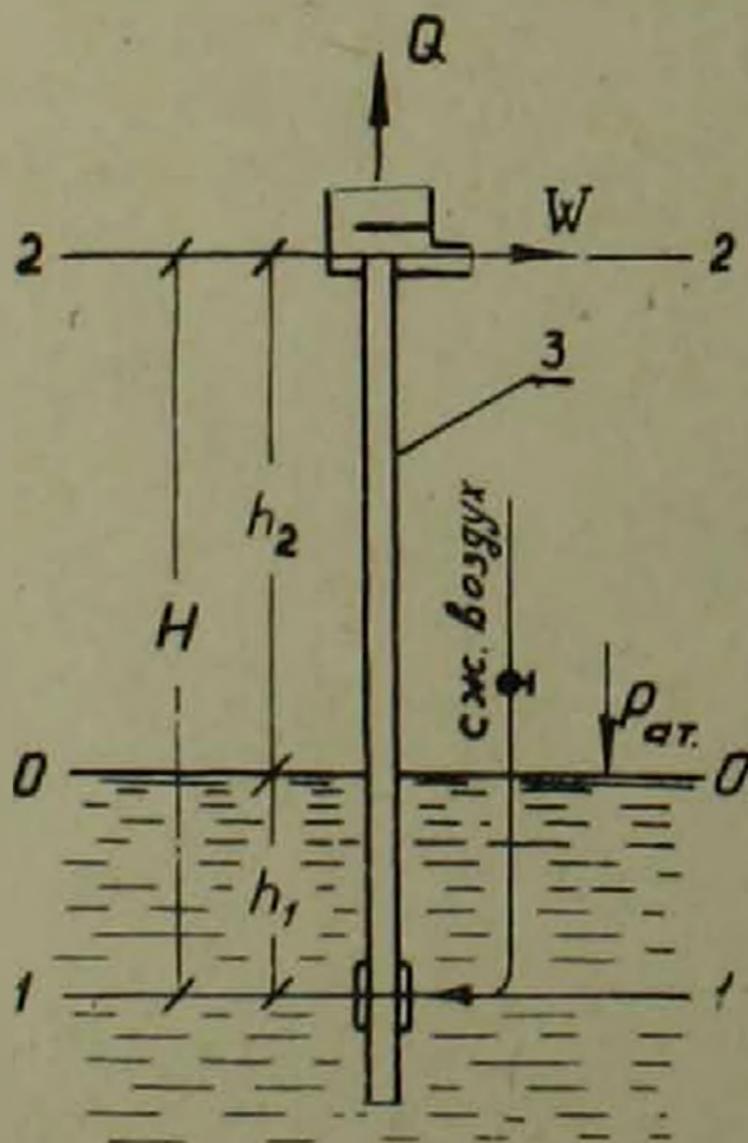


Рис. 1. Схема эрлифта

2. Работа, затраченная на подъем воды в объеме W' на высоту h_2 :

$$L_n = h_2 W' \gamma_{11}. \quad (3)$$

3. Работа, затраченная на сообщение кинетической энергии воде в сечении 2—2:

$$L_k = \frac{V_k^2}{2g} W' \gamma_{11}. \quad (4)$$

Здесь V_k — конечная скорость смеси на выходе, в сечении 2—2, определяемая:

$$V_k = (Q_k + W') : F, \quad (5)$$

$$Q_k = Q_1 P_1 : P_2, \quad (6)$$

где F — поперечное сечение трубы 3.

В таком определении L_k допущены две неточности, не учтена кинетическая энергия воздуха и V_k принята равной скорости смеси. В действительности она будет несколько меньше. Эти неточности практически пренебрежимы.

4. Работа, затраченная на поддержание воды во взвешенном состоянии (¹):

$$L_c = HF \varphi \gamma_{11} c, \quad (7)$$

где: HF — объем взвеси, φ — средняя объемная концентрация воды во взвеси, а c — средняя скорость падения этой взвеси.

5. Работа, затраченная на преодоление Дарси—Вейсбахских сопротивлений:

$$L_r = \lambda_0 \frac{H}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \cdot \varphi \gamma_{11} (Q + W'). \quad (8)$$

$$\text{где: } \lambda_0 = 0,3164 : Re^{0,25}, \quad Re = \frac{VD \gamma_{11}}{\mu_1 g}, \quad (9, 10)$$

V — средняя скорость взвеси,

$$V = (Q + W') : F, \quad (11)$$

а средний объем воздуха:

$$Q = 2Q_1 P_1 : (P_1 + P_2). \quad (12)$$

В приведенных выражениях μ_1 и γ_{11} являются вязкостью и удельным весом чистой воды.

6. Кроме этих соотношений, нами эмпирически установлено, для диаметров до 0,1 м и $0,3 \leq \varphi \leq 0,7$:

$$c = (4,8D - 1,49\varphi + 0,98) \lg \frac{\pi}{2} (1 - \varphi). \quad (13)$$

7. И, наконец, известно (¹), что:

$$\bar{z} = \frac{V_2}{V-c}, \quad \varepsilon = W : (W+Q), \quad (14, 15)$$

где ε — объемная концентрация воды в расходе смеси. Из вышеприведенных соотношений получается следующая система уравнений:

$$P_1 Q_1 \ln \frac{P_1}{P_2} = h_2 W \gamma_{11} + \left(\frac{P_1 Q_1}{P_2 F} + \frac{W}{F} \right)^2 \cdot \frac{W}{2g} \gamma_{11} + HF z c \gamma_{11} +$$

$$+ i_0 \frac{H}{D} \left(\frac{2P_1 Q_1}{P_1 + P_2} + W \right)^3 \cdot \frac{\varphi \gamma_{11}}{2gF^2}$$

$$\varphi = \frac{W}{\frac{2P_1 Q_1}{P_1 + P_2} + W - cF}$$

$$i_0 = 0,3164 : \left[\left(\frac{2P_1 Q_1}{P_1 + P_2} + W \right) \frac{D_{11}}{P_1 g F} \right]^{0,25}$$

$$c = (4,8D - 1,49\bar{z} + 0,98) 1g \frac{\pi}{2} (1 - \varphi). \quad (16)$$

II. *Некоторые особенности эрлифта.* Главная и отрицательная особенность эрлифта по сравнению с насосами, предназначенными для перекачки жидкостей, заключается в наличии L_c — затрат энергии на поддержание воздуховодяной смеси во взвешенном состоянии. Следующая (также отрицательная) особенность эрлифта заключается в сравнительно большой скорости движения взвеси, приводящей к возникновению больших L_s и L_r . Этими особенностями и обусловлен сравнительно низкий КПД этого способа перекачки жидкостей, в особенности при неправильном выборе режима работы. Положительные особенности эрлифта общеизвестны, поэтому на них нет нужды останавливаться.

III. *О давлениях P_1 и P_2 .* Давление P_1 равно $P_2 + h_1 \gamma_{11}$ только тогда, когда производительность W равна нулю, например, в точке

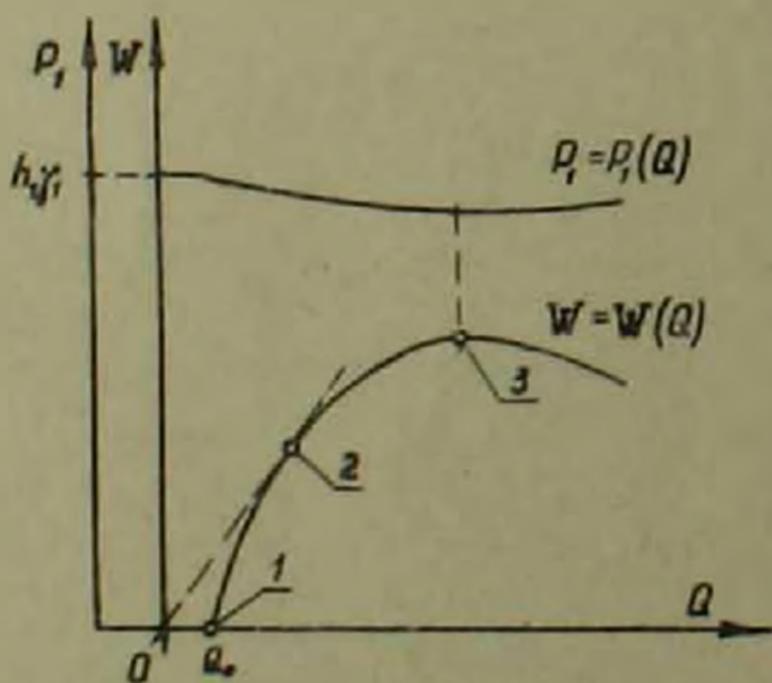


Рис. 2. Зависимость объемного расхода воды и давления P_1 от расхода воздуха

1 рис. 2. Когда же $W > 0$, то $P_1 = (P_2 + h_1 \gamma_{11}) - \Delta p_1$. Это Δp_1 представляет собой затраты давления, необходимые для сообщения воде скорости и преодоления трения и местных сопротивлений на всасе, до входа воды в сечение 1—1. Эти потери растут с ростом W и достигают максимума в точке 3 рис. 2. Δp_1 тратится в счет h_1 и приводит к уменьшению z .

При малых расходах воздуха давление P_2 (рис. 1) практически не отличается от $P_{ат}$, но при больших значениях Q и наличии сопро-

противлений на выходе в атмосферу, могут возникать потери давления $\Delta p_2 = P_2 - P_{ат}$. Как Δp_1 , так и Δp_2 являются вредными, но при конструировании эрлифта можно Δp_1 довести до такого минимума, которым можно пренебречь (в особенности при больших h_1), и Δp_2 вообще можно практически довести до нуля.

В дальнейшем изложении Δp_1 и Δp_2 не учитываются и допускается, что всегда $P_2 = h_1 \gamma_1 + P_2$ и $P_2 = P_{ат}$.

IV. *Три основных режима эрлифта.* Производительность эрлифта W , как показано экспериментами многих авторов, в том числе и нами, колеблется от нуля до некоторого максимума, в зависимости от скорости Q подачи воздуха. На рис. 2 представлена типичная зависимость $W = W(Q)$. На левой ветви этой кривой важными являются точки 1, 2 и 3. Правая ветвь кривой, где с ростом Q происходит уменьшение W и КПД (рис. 3), не представляет интереса. Указанным трем точкам на кривой $W = W(Q)$ соответствуют три режима действия эрлифта.

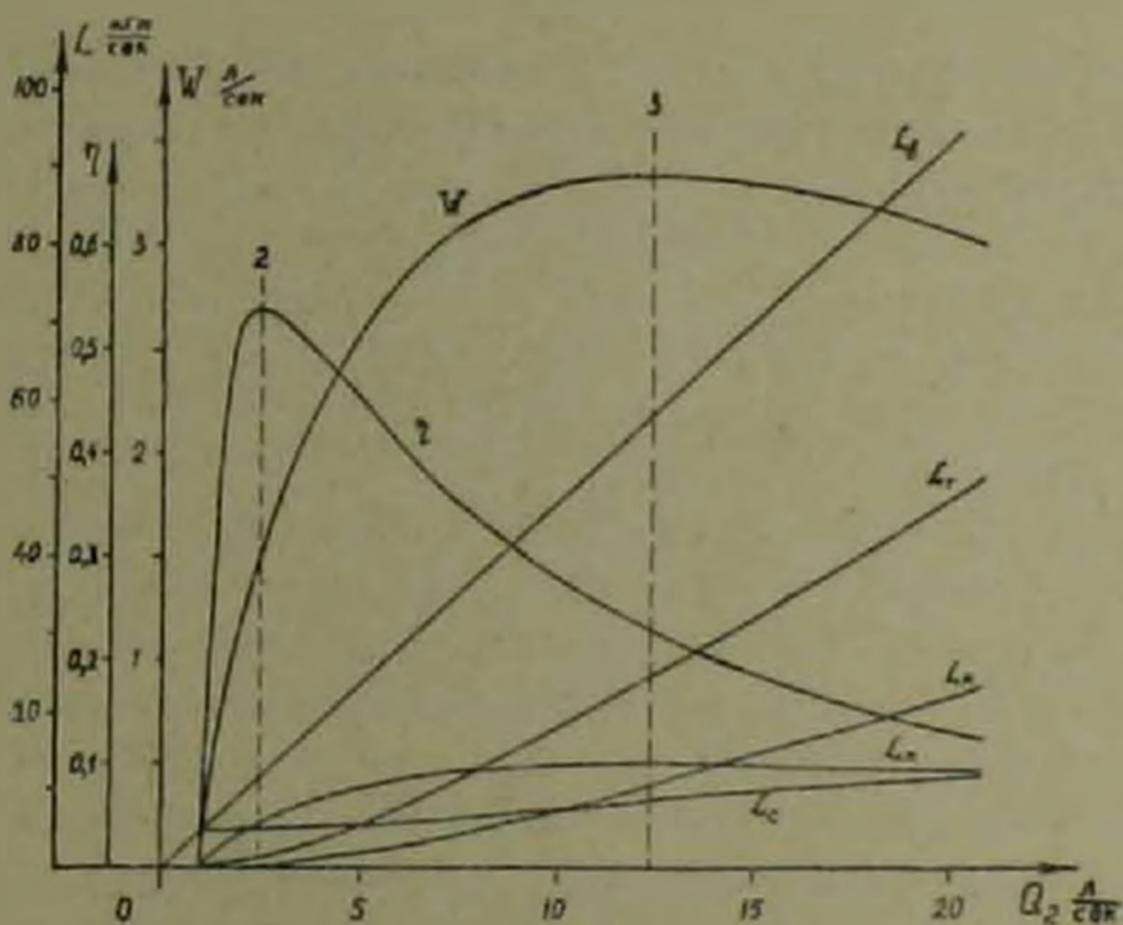


Рис. 3. Картина действия эрлифта

Точке 1 соответствует такое состояние, когда скорость подачи воздуха Q_0 приводит к заполнению трубы 3 (рис. 1) воздушноводяной взвесью до сечения 2—2, но производительность $W=0$, еще нет перелива воды из трубы 3.

Точка 2, представляющая собой точку касания прямой, проведенной из начала координат, с кривой $W = W(Q)$, определяет режим работы, когда КПД имеет максимальное значение.

Точка 3, перегиб кривой $W = W(Q)$, представляет режим, когда производительность W имеет максимальное значение.

V. *О состоянии 1.* Если в эрлифтную трубу 3 (рис. 1) подается воздух со скоростью $Q < Q_0$ (рис. 2), то транспорт воды не имеет места.

уровень возникающей воздушно-водяной смеси (взвеси) не доходит до сечения 2—2 (рис. 1.). При $Q=Q_0$ вся труба 3 оказывается заполненной взвесью, однако транспорта воды еще нет и вся работа воздуха тратится только на поддержание взвеси, заполняющей всю трубу 3, то есть:

$$L_b = L_c = P_2 Q_0 \ln \frac{P_1}{P_2} = HF \varphi_0 \gamma_1 c_0. \quad (17)$$

При Q_0 давление взвеси в сечении 1—1 равно гидростатическому давлению столба h_1 воды, то есть:

$$h_1 \gamma_1 = H \varphi_0 \gamma_1 \quad \text{или} \quad \varphi_0 = \frac{h_1}{H} = \alpha. \quad (18)$$

Следовательно:

$$\frac{Q_0}{F} = q_0 = \gamma_1 h_1 c_0 / P_2 \ln \frac{P_1}{P_2} = \frac{c_0}{P_2} \cdot \frac{P_1 - P_2}{\ln P_1 / P_2}. \quad (19)$$

Таким образом, расход воздуха на единицу поперечного сечения эрлифтной трубы, q_0 , необходимый для заполнения всей трубы, зависит от скорости падения взвеси c_0 и давления P_1 . Скорость c_0 в свою очередь зависит от D и α , а P_1 , при постоянстве P_2 , зависит от глубины погружения h_1 . В итоге $q_0 = q_0(\alpha, h_1, D)$. Например, если $H=20$ м, $D=0,05$ м, то при $\alpha=0,2$ и $0,5$ соответственно $q_0=0,4$ и $0,075$ л/сек.см². Если $\alpha=0,5$, $H=20$ м, то при $D=0,05$ и $0,1$ м, соответственно $q_0=0,075$ и $0,107$ л/сек.см².

VI. *Распределение расхода энергии.* В системе уравнений (16) имеется девять переменных: $P_1, P_2, H, D, Q_1, W, \varphi, c$ и λ_0 , с учетом, что $h_1 \gamma_1 = P_1 - P_2$. Для решения примера четырех из них выбирается, например P_1, P_2, H и D . Тогда в четырех уравнениях системы (16) останутся пять неизвестных. Задаваясь значением одного из них, например $Q_1 > Q_0$, можно определить остальные четыре — W, φ, c и λ_0 .

При помощи ЭВМ был решен ряд цифровых задач. Допускалось, что воздух и вода имеют температуру 20°C. На основании полученных данных были построены серии кривых $W = W(Q)$ для различных D, α, H и одновременно определены значения всех величин, входящих в уравнение (1).

На рис. 3 показана картина действия эрлифта при $D=0,05$ м, $h_1=6$ м, $H=10$ м. Рисунок составлен с соблюдением масштаба и дает реальную картину работы. Линии, выражающие L_b, L_n, L_k, L_c и L_t объясняют вид кривых $W = W(Q)$ и $\eta = L_n / L_b = \eta(Q)$.

На вертикали 2, энергия воздуха расходуется, главным образом на подъем воды L_n и на поддержание взвеси L_c . Остальные две величины L_t и L_k еще незначительны. Здесь имеется наибольшее значение КПД. Дальнейшее увеличение подачи воздуха Q приводит к возрастанию производительности W , однако при этом более быстрый

рост L_r и L_k приводит к уменьшению КПД. На вертикали 3 достигается максимум производительности W и полезной работы L_n , однако здесь КПД намного меньше, чем на вертикали 2. Правее вертикали 3 несмотря на рост L_b (или Q), бес.слезные затраты работы L_c , L_r и L_k достигают таких значений, что $L_n = L_b - (L_c + L_r + L_k)$ начинает уменьшаться, вследствие чего имеет место падение W .

VII. Режимы η_{max} и W_{max} . Обработкой полученных при помощи ЭВМ результатов были найдены эмпирические уравнения для двух режимов работы эрлифта: 1) когда КПД имеет максимальное значение η_{max} и 2) когда производительность является максимальной W_{max} .

Значение максимального коэффициента полезного действия эрлифта:

$$\eta_{max} = 0,926 \alpha H^{0,15} D^{0,15} \quad (20)$$

Очевидно:

$$\eta = \frac{L_n}{L_b} = \frac{\eta_1 h_2 W}{P_2 Q_2 \ln P_1 / P_2} \quad (21)$$

Производительность W_{η} при η_{max} :

$$W_{\eta} = 3,865 \alpha^{0,96} H^{0,17} D^{2,57}, \text{ м}^3/\text{сек.} \quad (22)$$

При известных α , H , h_2 , P_2 и заданной производительности W , с помощью уравнений (20, 21, 22) определяются Q_2 и D , соответствующие наиболее экономичному режиму работы эрлифта (при этом D имеет максимальное значение).

Значение максимальной производительности:

$$W_{max} = 8,28 \alpha^{1,52} H^{0,27} D^{2,57}, \text{ м}^3/\text{сек.} \quad (23)$$

Величина КПД при W_{max} :

$$\eta_{W} = 0,442 \alpha^{0,53} H^{0,1} D^{0,18}. \quad (24)$$

С помощью уравнений (21, 23, 24) определяются Q_2 и D , соответствующие режиму работы эрлифта при максимальной его производительности (когда заданная производительность W обеспечивается минимальным диаметром D).

Следует отметить, что уравнения (20, 22, 23, 24) могут быть применены с достаточной точностью в диапазоне: α от 0,3 до 0,7, h_1 до 10 м, D от 25 до 100 мм.

VIII. Расчет эрлифта. Обычно заранее известны необходимая производительность W , глубина погружения h_1 , высота подъема h_2 и давление P_2 . Расчет эрлифта сводится к определению диаметра эрлифтной трубы, ожидаемого КПД, расхода воздуха и его давления P_1 . Вышеприведенные уравнения позволяют с приемлемой точностью выполнить такой расчет. Для иллюстрации приводим пример.

Пример. Производительность эрлифта должна быть $36 \text{ м}^3/\text{час}$ воды. Глубина погружения $h_1 = 10 \text{ м}$, высота подъема $h_2 = 9 \text{ м}$, $P_2 = 1 \text{ атм}$, температура воды 20 С . Рассчитать эрлифт.

Очевидно, что наиболее экономичная работа эрлифта будет при максимальном значении КПД. Учитывая, что $W = 0,01 \text{ м}^3/\text{сек}$, $H = 19 \text{ м}$, $\alpha = 0,526$, принимая $W' = W_{\tau}$, из уравнения (22) получаем значение диаметра соответствующего $\tau_{\text{опт}}$. $D_{\tau} = 0,103 \text{ м}$. Из уравнения (20) получаем $\tau_{\text{опт}} = 0,5385$.

Давление в условиях примера будет $P_1 = 2 \text{ атм}$. Далее, согласно (21) находим $Q_{\tau} = 0,0242 \text{ м}^3/\text{сек}$ в условиях $P_2 = 1 \text{ атм}$. Максимальная производительность такого эрлифта с диаметром 103 мм , согласно (23) будет $0,0193 \text{ м}^3/\text{сек}$ или $69,4 \text{ м}^3/\text{час}$. При этом, согласно (24) его КПД снизится до $0,28$, а расход воздуха под давлением P_2 составит:

$$Q_{\text{в}} = \frac{0,0242}{0,01} \cdot 0,0193 \cdot \frac{0,5385}{0,28} = 0,0896 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Таким образом, если в условиях примера, эрлифтную трубу установить с диаметром 103 мм , то она обеспечит заданную производительность при наиболее экономичном режиме работы. При необходимости производительность эрлифта можно почти удвоить, в счет снижения КПД почти в два раза.

Этим можно считать расчет законченным. Однако представляет интерес также следующее дополнение.

Этим расчетами определялись координаты точек 2 и 3 (рис. 2). Они составляют $W_{\tau} = 0,01$ и $Q_{\tau} = 0,0242$ для точки 2 и $W_{\text{max}} = 0,0193$ и $Q_{\text{в}} = 0,0896$ для точки 3. Представляет интерес также

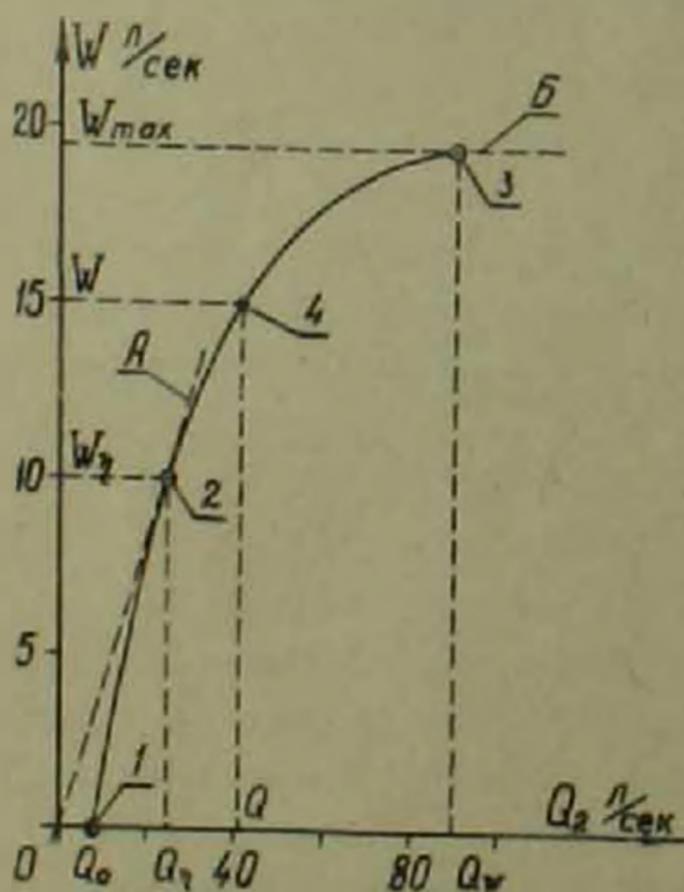


Рис. 4. Примерный расчет эрлифта

абсциссы точки 1, ордината которой $W' = 0$. Имея в виду, что в точке 1 $\epsilon_0 = \alpha = 0,526$ и $D = 0,103 \text{ м}$, из (13) находим $c_0 = c = 0,64 \text{ м/сек}$, а по (19) находим расход воздуха Q_0 в токе 1, равный $0,0077 \text{ м}^3/\text{сек}$.

Накладывая эти точки на диаграмме $W - Q$, проводят прямые А и Б (рис. 4). Учитывая, что А и Б являются касательными, по точкам 1, 2 и 3 проводят кривую, с приемлемой точностью описывающей связь $W' = W(Q)$ между точками 1 и 3. С помощью этой кривой можно, например, для произвольной точки 4 найти расход воздуха Q , если нужно иметь производительность W .

Если же необходимо иметь более точную кривую $W = W(Q)$, то нужно ее вычислить с помощью системы уравнений (16) на ЭВМ.

Институт органической химии
Академии наук Армянской ССР

Ո. Ե. ՍԻՐԱԿԵՂՅԱՆ, Հավակոն ՍՍՀ ԳԱ բզրակից անդամ Ա. Մ. ԿՈՍՊՈՒՐՅԱՆ, Ռ. Ե. ՀԼԿՈՐՅԱՆ:

Էրլիֆտի աշխատանքի եկադրությունը և ճաշվարկը

Նախորդ հետազոտությունները ⁽¹⁾ վերաբերվում էին էրլիֆտի աշխատանքի որակական և քանակական բնորոշմանը: Իրանք թույլատրեցին մանրամասն ուսումնասիրել էրլիֆտի աշխատանքը և ստանալ այդ սարքավորումների հաշվման հղանակ, որոնք և ներկայացվում են այս հաղորդման մեջ:

Ունենալով էրլիֆտում ծախսվող էներգիայի հաշվեկշիռը, բանաձև (1) և նրա բոլոր հինգ անդամների մաթեմատիկական բնորոշումը (տես բանաձև 2, 3, 4, 7, 8, օգտագործելով փորձնականորեն որոշված $c = c(\tau, D)$ և

հատնի $\tau = \frac{zV}{V - c}$ կապերը, ստանում ենք նրա աշխատանքը լիովին բնութագրող (16) հավասարումների ամբողջականությունը:

ԷՇՄ-ի օգնությամբ (16)-ը ենթարկված է թվային հետազոտման: Օգտվելով հետազոտման արդյունքներից, էրլիֆտի աշխատանքի էկոնոմիկ (ըստ արտաքինից ծախսվող էներգիայի) և ամենամեծ արտադրողականության ուժեղների համար դուրս են բերվում առնչություններ (բանաձև 20, 22, 23, 24):

Էրլիֆտի գործողության սկզբնական վիճակի տեսական և փորձնական հետազոտությունը (վիճակ, որի պայմաններում խառնուրդով լցված Յ խողովակից, տես նկ. 1, հեղուկի արտահոսում տեղի չի ունենում) հաստատում է մի կարևոր հանդամանք: Տվյալ վիճակում, կախված խողովակի հարաբերական — α , բացարձակ — h_1 ընկղմվածությունից և l) տրամագծից, էրլիֆտում ստեղծվում է հրկֆազ խառնուրդի որոշակի τ_{00} սկզբնական բաղադրություն:

Այսպիսով, հնարավոր է լինում որոշել տվյալ սարքավորման աշխատանքի սկզբնական վիճակին համապատասխանող օդի ծախսը (19, 13):

Կատարված հետազոտությունները թույլ են տալիս նախօրոք հայտնի արժեքների համար տեխնիկական հաշվարկներին բավարարող ճշտությամբ նախադժեկ պահանջվող արտադրողականությունը ապահովող էրլիֆտային սարքավորում: Առավել ճշգրիտ նախազմման անհրաժեշտության դեպքում այն կատարվում է (16) հավասարումների ամբողջականությունը լուծելով էՇՄ-ի օգնությամբ:

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

¹ А. М. Гаспарян, С. Е. Сирадегян, Р. Е. Акопян, ДАН Арм. ССР, т. LV, № 5,