Записки Ленинградского ордена Ленина Горного института
Том XVII—XVIII, 1948

II. Горное дело

Применение эксплоатационных кривых к расчету воздушного подъемника для жидкостей

Академик *А. П. Герман*

Общие замечания

Воздушный подъемник для жидкостей, или так называемый эрлифт, получил в технике весьма широкое распространение.

Применение его в основном обусловливается положением уровня поднимаемой жидкости и возникает, в противовес обычным насосам, в тех случаях, когда для возможности всасывания требуется опускание насоса ниже уровня дневной поверхности.

Обычная область применения эрлифта представлена глубокими артезианскими колодцами и нефтяными скважинами (газлифт).

Важная роль принадлежит также эрлифту в технике откачки воды из затопленных рудников, что придает ему особую актуальность в свете задач восстановления разрушенного войной народного хозяйства нашего Союза.

Эффективная работа воздушного подъемника должна быть обеспечена правильным выбором основных его элементов; в настоящее время, однако, такой выбор на основе расчета представляет значительные трудности и зачастую производится наудачу, без гарантии надежности. Причина этого кроется в несовершенстве существующей теории действия эрлифта. Вернее говоря, единой теории этого, столь простого по конструкции, устройства до сих пор не существует: речь может итти лишь о различных теоретических изысканиях, исходящих из неодинаковых принципов.

Все эти изыскания в бо́льшей или меньшей степени страдают необоснованностью, нечеткостью и даже ошибочностью основных

своих положений и допущений, а также экспериментальной непроверенностью.

Среди этих исследований должно быть отмечено три основных направления, лежащих в основе рассмотрения явлений, происходящих при подъеме жидкости с помощью сжатого воздуха, вводимого в подъемную трубу: одно из них, базирующееся на принципе всплывания газовых пузырей, нашло выражение в исследовании Перения;[1] другое, принятое Г Лоренцом,[2] исходит из раздельного рассмотрения работы расширения воздуха и давления жидкого столба зоны погружения; наконец, третье, проводимое В. Меликовым,[3] рассматривает смесь жидкости и газа, так называемую эмульсию, как однородную, способную к расширению, упругую жидкость.

Задача настоящей работы состоит в выявлении неприемлемых положений указанных теорий, и в новом построении теории эрлифта на принципе расширения упругой эмульсии, с устранением ошибок, присущих предыдущим работам.

Необходимо указать, что критический обзор теорий Перения и Лоренца был дан еще в 1923 г. проф. Л. С. Лейбензоном,[4] рассматривающим их как «предельные случаи» работы эрлифта. Однако мы не будем базироваться на этой статье и рассмотрим интересующие нас дефекты указанных теорий в ином аспекте, отведя им особые пункты в настоящей работе.

Неприемлемые положения теории Меликова будут рассмотрены попутно, при изложении приводимой ниже, разработанной мною, теории эрлифта.

Что же касается других теорий, не основанных на указанных выше принципах, то мы их касаться не будем.

Относительно разработанной мною теории необходимо заметить, что она еще не дает исчерпывающего решения вопроса о расчете эрлифта и может служить вехой для дальнейших исследований; практическое же применение предлагаемого мною метода расчета с помощью эксплоатационных кривых, по моему мнению, уже сейчас имеет определенную значимость, что и показано на численных примерах.

I. По поводу теорий Перения и Лоренца

1. Основные ошибки теории Перения

Исходным моментом этой теории, определяющим развитие дальнейших ее этапов, является рассмотрение пьезометрического напора при погружении в жидкость воздушного пузырька и опре-

---

[1] Perényi. Rationelle Konstruction und Wirkungsweise des Druckluftwasserhebers für Tiefbrunnen.

[2] H. Lorenz. Technische Hydromechanik, 1910. стр. 101.

[3] В. Меликов. Воздушный подъемник жидкости. Азерб. Нефт. Хоз., 1923, № 10.

[4] К теории эрлифта, Азерб. Нефт. Хоз., 1923, № 2—3.

деление увлекаемого им объема жидкости при восхождении в подъемной трубе.

В этом рассмотрении, однако, кроется ошибка, коренным образом влияющая на дальнейшие выводы и лишающая их конкретного физического смысла, почему она и заслуживает особого внимания.

Сущность этой ошибки состоит в совершенно ложном принятии различного пьезометрического напора при погружении несвободного и свободного пузырька, причем под несвободным погружением Перений разумеет такое, при котором подъемная сила, действующая на пузырек со стороны жидкости, является уравновешенной какой-либо внешней удерживающей силой.

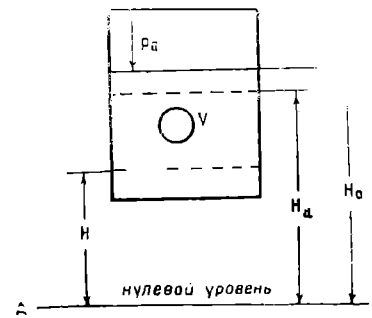


Рис.

Для выявления ложности рассуждений Перения рассмотрим истинное выражение пьезометрического напора при погружении в жидкость какого-либо постороннего тела. Пусть в сосуде поперечного сечения F_1 (рис. 1) содержится жидкость удельного веса γ_0, в которую погружено некоторое тело объема V и удельного веса γ.

Если уровень жидкости до погружения тела находился на высоте H_a от условного нулевого уровня А—А, то после погружения он поднимается до высоты H_0, определяемой вытесненным объемом жидкости, который равен объему погруженного тела; таким образом, поднятие уровня вследствие погружения будет

$$H_0 - H_a = \frac{V}{F_1}. \qquad (1)$$

На каком-либо уровне H до погружения тела удельное давление равно

$$p = p_a + (H_a - H)\gamma_0, \qquad (2)$$

где p_a означает удельное давление атмосферы на поверхность жидкости, пьезометрический же напор на этом уровне до погружения есть

$$h = \frac{p - p_a}{\gamma_0} = H \quad H. \qquad (2')$$

После погружения удельное давление на высоте H возрастет за счет поднятия уровня жидкости, согласно (1) на величину

$$(H_0 - H_a)\gamma_0 = \frac{V}{F_1}\cdot\gamma_0$$

и будет равно

$$p' = p + (H_0 - H_a)\gamma_0 = p_a + \left[(H_a - H) + \frac{V}{F_1}\right]\gamma_0, \qquad (3)$$

пьезометрический же напор будет

$$h' = \frac{p' - p_a}{\gamma_0} = (H_a - H) + \frac{V}{F_1} = h - \frac{V}{F_1}, \qquad (3')$$

и таким образом разность пьезометрических напоров представит поднятие уровня

$$h' - h = \frac{V}{F_1} = H_0 - H_a. \qquad (4)$$

Формула (3′) является истинным выражением пьезометрического напора в наиболее общей форме, причем напор этот не зависит от веса погруженного тела и выражается одинаково как для горизонтов, лежащих ниже погруженного тела, так и для горизонтов, лежащих выше его.

Выражению (3′) может быть придана еще другая форма, введя вместо объема V тела весего в жидкости Q: именно, по закону Архимеда

$$Q = V(\gamma - \gamma_0) = V \cdot \gamma_0 (\gamma/\gamma_0 - 1) \qquad (5)$$

и, стало быть, вместо (3′) можно написать:

$$h' = \frac{p' - p_a}{\gamma_0} = H_a - H + \frac{Q}{F_1 \cdot \gamma_0 \left(\frac{\gamma}{\gamma_0} - 1\right)} = h + \frac{Q}{F_1 \cdot \gamma_0 \left(\frac{\gamma}{\gamma_0} - 1\right)} \qquad (6)$$

В случае $\gamma < \gamma_0$, например, при погружении в воду воздушного пузырька, вес Q будет отрицателен; тогда, вводя величину

$$P = -Q, \qquad (5')$$

представляющую так называемую подъемную силу, вместо (6) получим также

$$h' = \frac{p' - p_a}{\gamma_0} = H_a - H + \frac{P}{F_1 \gamma_0 \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_0}\right)} = h - \frac{P}{F_1 \cdot \gamma_0 \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_0}\right)} \qquad (6')$$

Выведенные нами формулы (3), (3′), (6), (6′) отвечают основным законам гидростатики, причем величины Q или P имеют лишь формальное значение и не являются факторами, обусловливающими пьезометрическое давление.

В ложной трактовке роли этих величин и состоит основная ошибка Перения, проистекающая от того, что он в гидростатику переносит законы давления твердых тел.

Это становится очевидным, если преобразовать формулу (3), положив в ней

$$\gamma_0 = \gamma + \gamma_0 - \gamma;$$

тогда найдем

$$p' = p - \frac{V \cdot \gamma}{F_1} + \frac{V(\gamma_0 - \gamma)}{F_1},$$

или в силу (5) и (5′)

$$p' = p - \frac{V \cdot \gamma}{F_1} + \frac{P}{F_1} \qquad (7)$$

Последней формулой и пользуется Перений для определения давления на горизонте, лежащем ниже погруженного пузырька, при уравновешении его удерживающей силою P, равной и противоположной подъемной силе.

При этом приращение давления $(p' - p)$, вызванное погружением, он рассматривает как результат действия двух сил, именно веса пузырька $V\gamma$ и его нагрузки удерживающею силой P

Такая точка зрения представляет явное извращение смысла формулы (7), эквивалентной формуле (3), по которой приращение давления определяется лишь вытесненным объемом жидкости.

Это извращение приводит Перения к дальнейшей ошибке в выражении давления при погружении свободного пузырька. Последнее он обосновывает следующим образом: поскольку формула (7), полученная непосредственно из формулы (3), может быть заменена также формулой (6′), в которой величина P представляет нагрузку несвободного пузырька, то для свободного пузырька эта нагрузка, в представлении Перения, должна быть заменена сопротивлением E, испытываемым пузырьком при его восхождении; таким образом, формула (6′) для несвободного пузырька переходит у Перения в следующую формулу для свободного пузырька:

$$h'' = \frac{p' - p_a}{\gamma_0} = h - \frac{E}{F_1(\gamma_0 - \gamma)}, \qquad (7')$$

где h'' означает пьезометрический напор при свободном погружении.

Последнее выражение по существу является неверным, так как независимо от того, будет ли пузырек свободным или несвободным, пьезометрический напор выражается одной и той же формулой (3′), или формулой (6′), в которую в обоих случаях входит подъемная сила P.

Ложность формулы (7′) наглядно вытекает непосредственно из того, что разность пьезометрических напоров до и после погру-

жения представляет поднятие уровня, которое при свободном и несвободном погружении одинаково и выражается формулой (4).

$$h' - h = \frac{V}{F_1} = \frac{P}{F_1(\gamma_0 - \gamma)},$$

тогда как по Перению для несвободного пузырька поднятие уровня равно

$$h' \quad h = \frac{P}{F_1(\gamma_0 - \gamma)}^{1}, \tag{6''}$$

а для свободного

$$h'' - h = \frac{E}{F_1(\gamma_0 - \gamma)}, \tag{7''}$$

то есть менее на величину

$$h' - h'' = \frac{P - E}{F_1(\gamma_0 - \gamma)}, \tag{8}$$

что представляет явный абсурд.

На ложной трактовке величины P в выражении пьезометрического напора основаны и последующие заблуждения Перения, которые в первую очередь выразились в определении увлекаемого свободным пузырьком объема жидкости на основе формулы (8). При этом, как видно будет из дальнейшего, весьма характерным является то обстоятельство, что применение формулы (8) в итоге приводит к отрицанию самой этой формулы, чем фактически создается «порочный круг», которого Перений не замечает.

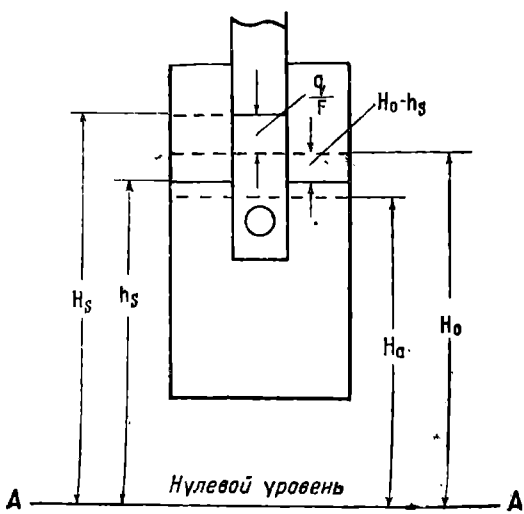


Рис. 2.

Сущность этого «порочного круга» сводится к следующему. Снижение поднятия уровня, выражаемое формулою (8), Перений связывает с увлечением определенного объема жидкости при восхождении свободного пузырька в подъемной трубе; при этом, согласно Перению, устанавливается следующее соотношение уровней (рис. 2):

[1] У Перения принято $\gamma_0 - \gamma = \rho$ во всех дальнейших формулах.

H_a есть общий уровень в сосуде и в трубе до погружения пузырька;

H_0 — общий уровень при несвободном погружении пузырька;

h_s — уровень в сосуде при свободном погружении;

H_s — уровень в трубе при свободном погружении.

При свободном восхождении пузырька, по Перению, имеет место снижение поднятия уровня в сосуде $H_0 - h_s$ (рис. 2), выражаемое формулой (8), т. е. равное

$$H_0 - h_s = \frac{P - E}{F_1(\gamma_0 - \gamma)};$$

с другой стороны, Перений приравнивает это снижение в высоте, отвечающей увлекаемому пузырьком объему жидкости q, для кальцевого пространства между стенками сосуда и трубы, с поперечными сечениями E_1 и F, эта высота равна

$$\frac{q}{F_1 - F} = H_0 - h_s = \frac{P - E}{F_1(\gamma_0 - \gamma)},$$

откуда увлекаемый объем

$$q = \frac{F_1 - F}{F_1} \cdot \frac{P - E}{\gamma_0 - \gamma}. \qquad (9)$$

Поднятие уровня в трубе $(H_s - H_a)$ равно сумме высот $(H_0 - H_a)$ и $\frac{q}{F}$ (см. рис. 2),

то есть

$$H_s - H_a \quad H_0 - H_a \quad \frac{q}{F},$$

где по предыдущему, на основании (6″)

$$H_0 - H_a = \frac{P}{F_1(\gamma_0 - \gamma)},$$

и q выражается формулой (9), откуда

$$H_s - H_a = \frac{1}{F(\gamma_0 - \gamma)}\left[P \quad \left(1 - \frac{F}{F_1}\right)E\right] \qquad (10)$$

Из выражений (9) и (10) следует, что при $F = F_1$, то-есть при отсутствии подъемной трубы, $q = 0$ и поднятие уровня в сосуде равно

$$H_s - H_a = \frac{P}{F_1(\gamma_0 - \gamma)}$$

то есть не зависит от сопротивления E и выражается одинаково как при свободном, так и при несвободном пузырьке формулою (6″), вопреки формуле (7″) для свободного пузырька, в чем и состоит упомянутый выше «пороч-ный круг».

Выясненное выше ложное понимание роли подъемной силы, приведшее к неверным по существу выражениям (9) и (10) для единичного пузырька, Перений распространяет и на случай непрерывной воздушной струи.

Именно, в этом случае он принимает

$$H_s \quad H_a = -\frac{1}{F(\gamma_0 - \gamma)}\left[P_s - \left(1 - \frac{F}{F_1}\right)E_s\right],$$

где P_s означает подъемную силу для всего объема воздуха в трубе, а E_s — суммарное сопротивление движению воздушной струи.

$$\text{Полагая } P_s = W(\gamma_0 - \gamma) \text{ и } E_s = J(\gamma_0 - \gamma),$$

где W есть объем воздуха в трубе (при $\gamma = \text{пост.}$), а J некоторый условный объем, Перений предыдущую формулу для поднятия уровня в трубе представляет в следующем виде:

$$H_s - H_a = \frac{W}{F} - \left(1 - \frac{F}{F_1}\right)\frac{J}{F}, \qquad (10')$$

в соответствии с чем увлекаемое объемом воздуха W количество жидкости должно представиться так:

$$q = \frac{F_1 - F}{F_1}(W - J). \qquad (9')$$

Что касается объема W, то Перений принимает для него следующее выражение:

$$W = \int_0^{ts} Q_{\text{сек}}\, dt, \qquad (11)$$

в котором $Q_{\text{сек}}$ означает объемный расход воздуха во входном сечении трубы, а t_s время восхождения какого-либо пузырька в трубе, так что формула (9′) представляет объемную производительность подъема за время t

Не говоря уже о том, что формула (11) основана на неприемлемом допущении постоянства объемного расхода воздуха во всех сечениях подъемной трубы, формулы (9′) и (10′), подобно (9) и (10), являются ложными по существу, а поскольку они служат исходными в теории Перения, мы ограничиваемся сделанными выше замечаниями, не подвергая эту теорию дальнейшему разбору, и переходим к рассмотрению теории Лоренца.

2. Теория Лоренца и ее недостатки

Во всех дальнейших рассмотрениях мы будем исходить из схемы подъемника, представленной на рис. 3. Здесь S— подъем-

ная труба, погруженная в жидкость ниже динамического уровня АА скважины и снабженная на нижнем своем конце башмаком D, в который по трубке t подается сжатый воздух.

Если q означает секундный объем поднимаемой жидкости удельного веса γ_0, а $G_{сек}$ — секундный весовой расход воздуха переменного удельного веса γ', то при переменном удельном объеме смеси $v = \frac{1}{\gamma}$ где γ означает удельный вес ее, элементарная секундная работа подъема смеси в трубе будет

$$dL = -(q_0\ \gamma_0 + G_{сек})\, v\ \ dp,$$

причем знак минус отвечает отрицательному приращению dp давления при подъеме.

Работа эта совершается как за счет расширения воздуха, так и за счет напора столба жидкости в скважине, высота коего h равна глубине погружения башмака подъемной трубы под уровнем жидкости АА.

Работа расширения воздуха (секундная) равна

$$dL' = \quad G_{сек} \cdot \frac{dp}{\gamma'}$$

работа же подъема жидкости за счет напора внешнего столба есть

$$dL'' = -\, q_0 \cdot \gamma_0 \cdot \frac{dp}{\gamma_0}.$$

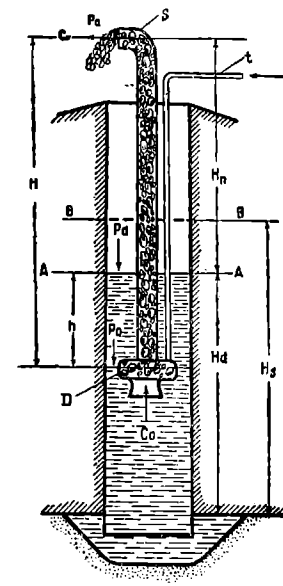


Рис. 3.

Таким образом элементарная секундная работа подъема смеси равна

$$dL = -(q_0 \cdot \gamma_0 + G_{сек.})v \cdot dp = -\, G_{сек.} \cdot \frac{dp}{\gamma'} - q_0 \cdot dp,$$

а отнесенная к единице веса смеси удельная работа есть

$$dL_1 = -\, v \cdot dp = -\, \frac{G_{сек}}{p_0 \cdot \gamma_0 + G_{сек}} \cdot \frac{dp}{\gamma'} - \frac{q_0}{q_0 \cdot \gamma_0 + G_{сек}} dp. \qquad (12)$$

С другой стороны, при установившемся движении

$$dL_1 = -\, v dp = dH + d\left(\frac{c^2}{2g}\right) + dR_1, \qquad (13)$$

причем c представляет скорость смеси в каком-либо сечении трубы, а dH и dR_1 соответственно суть элементарные работы повышения уровня и трения в трубе.

Выражая закон расширения воздуха уравнением

$$p \cdot V^m = \text{пост.},$$

где V есть удельный объем воздуха, и обозначая через V_k уд. объем его при выходе из подъемной трубы, где давление p_a равно атмосферному, можем в уравнение (12) ввести

$$\frac{1}{\gamma'} \quad V = V_k \left(\frac{p_a}{p}\right)^{\frac{1}{m}}$$

и, переходя к конечной удельной работе по всему пути подъема, из (12) имеем

$$L_1 = -\int_{p_0}^{p_a} v \cdot dp = \int_{p_a}^{p_0} v \cdot dp = \frac{G_{сек}}{q_0 \cdot \gamma_0 + G_{сек}} p_a^{\frac{1}{m}} V_k \int_{p_a}^{p_0} \frac{dp}{p} + \frac{q_0}{q_0 \cdot \gamma_0 + G_{сек}} \left(p_0 - p_a\right),$$

или, полагая по Лоренцу $m = 1$, то есть считая расширение воздуха изотермическим, получим

$$L_1 = \int_{p_a}^{p_0} v dp = \frac{G_{сек.}}{q_0 \cdot \gamma_0 + G_{сек}} \; p_a \quad V_k \quad \lg \frac{p_0}{p_a} \quad \frac{q_0}{q_0 \cdot \gamma_0 + G_{сек}} \left(p_0 - p_a\right). \quad (14)$$

Точно также из (13) для всего пути подъема найдем

$$L_1 = \int_{p_a}^{p_0} v \;\; dp = H \quad \frac{c_k - c_0^2}{2g} + R_1, \quad (15)$$

где c_k и c_0 суть конечная и начальная скорости смеси, соответственно при выходе из подъемной трубы и при входе в башмак. При этом, для простоты Лоренц принимает, что скорости воды и воздуха в башмаке одинаковы и равны скорости смеси c_0.

Работу трения R_1 в уравнении (15) Лоренц представляет в такой форме:

$$R_1 = \zeta \cdot \frac{c_k^2}{2g}$$

и, пренебрегая в знаменателе обоих членов левой части уравнения (14) величиною $G_{сек}$, с помощью (15) приходит к следующему выражению:

$$\frac{G_{сек}}{q_0 \gamma_0} \cdot p_a \quad V_k \cdot \lg \frac{p_0}{p_a} + \frac{p_0 - p_a}{\gamma_0} = H + (1 + \zeta) \frac{c_k^2}{2g} - \frac{c_0^2}{2g}. \quad (16)$$

Наконец, применяя для входа жидкости в башмак уравнение Д. Бернулли, именно полагая

$$\frac{p_a}{\gamma_0} \cdot \; h = \frac{p_0}{\gamma_0} + \frac{c_0^2}{2g} + \zeta_0 \frac{c_0^2}{2g},$$

где ζ_0 есть коэфициент потерь при входе и, вводя в (16) разность

$$\frac{p_0 - p_a}{\gamma_0} = h - (1 + \zeta_0) \frac{c_0^2}{2g}, \quad (17)$$

Лоренц окончательно получает:

$$\frac{G_{сек}}{q_0\gamma_0}\cdot p_a \quad V_k\cdot \lg\frac{p_0}{p_a} = H_n + (1 \quad \zeta)\,\frac{c^2_k}{2\cdot g} + \zeta_0\,\frac{c_0^2}{2\,g}. \qquad (1$$

Последнее уравнение может быть представлено еще иначе, ее ввести

$$Q = G_{сек} \quad V_k; \qquad c_k = \frac{q_0 + Q}{F} \text{ и } c_0 = \frac{q_0}{F}$$

где F есть сечение подъемной трубы; тогда

$$\frac{Q}{q_0}\cdot\frac{p_a}{\gamma_0}\cdot\lg\frac{p_0}{p_a} = H_n \quad \frac{1+\zeta}{2gF^2}(q_0 \quad Q)^2 + \frac{\zeta_0}{2gF^2} \quad q_0^2, \qquad (1$$

причем H_n означает полезную высоту подъема, согласно рис.

$$H_n = H - h.$$

При постоянных значениях H_n, F, ζ, ζ_0 и p_0 уравнение (1 выражает зависимость между q_0 и Q, которая может быть пр ставлена кривою 3-й степени, рис. 4, с максимумом q_0, удовлетворяющим условию:

$$\frac{1}{q_0}\cdot\frac{p_a}{\gamma_0}\lg\frac{p_0}{p_a} = \frac{1+\zeta}{gF^2}(Q + q_0). \qquad (18)$$

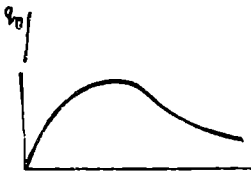


Рис. 4.

Заметим, что в уравнении (16b) давление p_0 можно считать постоянным лишь при условии пренебрежения в уравнении (17) членом $(1+\zeta_0)\frac{c_0^2}{2g}$, что допустимо ввиду его малости сравнитель с h. Однако тогда изменится и правая часть уравнения (16a), в к тором вместо члена $+\zeta_0 \quad \frac{c_0^2}{2g}$ войдет $\left(-\frac{c_0^2}{2g}\right)$, и соответствен в уравнении (16b) вместо $+\frac{\zeta_0}{2gF^2} \quad q_0^2$ войдет $\left(-\frac{1}{2gF^2} \quad q_0^2\right)$, ч впрочем не повлияет на условие максимума (18).

Если с принципиальной стороны выводы Лоренца не выз вают возражений, то все же его теории присущи и определе ные недостатки.

Прежде всего необходимо отметить сложность основн зависимостей (16a) и 16b), по которым определение произво тельности q_0 при данном расходе воздуха Q представляет знач тельные трудности.

Основным недостатком, однако, следует признать представ ние сопротивления трения в форме

$$R_1 = \zeta \quad \frac{c_k^2}{2g},$$

где коэфициент ζ имеет обычное в гидравлике выражение в за симости от длины трубы H и ее диаметра d, именно

$$\zeta = \lambda\cdot\frac{H}{d},$$

ричем множителю λ присваивается определенная постоянная еличина, не зависящая от других параметров подъема.

В действительности же это неверно, в чем нетрудно убеиться, выразив коэфициент ζ с помощью уравнения (16в) и прозведя численную проверку множителя λ при посредстве данных, полученных из наблюдений.

Из уравнения (16b) следует

$$\lambda \frac{H}{d} = 2g \frac{\frac{Q}{q_0}\left(\frac{p_a}{\gamma_0} \lg \frac{p_0}{p_a} H_n\right)}{c_0^2 \left(1+\frac{Q}{q_0}\right)^2} - \frac{\zeta_0}{\left(1+\frac{Q}{q_0}\right)^2} - 1,$$

ем и воспользуемся для численной проверки λ.

Данные для этой проверки заимствуем из статьи А. Н. Весеова, помещенной в Трудах I Горного Научно-Технического ьезда, стр. 251. Указанные данные относятся к испытаниям двух сосов „Маммут", установленных в артезианских колодцах Шарлоттенбурге.

Для 1-й установки приводятся следующие данные:

$H = 36{,}5$ м; $H_n = 15{,}41$ м; $d = 70$ мм; $Q = 537{,}5$ л/мин; $= 216$ л/мин; $p_0 = 3{,}14$ ат.

Отсюда следует:

$$c_0 = 0{,}95 \text{ м/сек}; \quad \frac{Q}{q_0} = 2{,}49; \quad \frac{p_0}{p_a} = 3{,}05, \text{ и}$$

и $\frac{p_a}{\gamma_0} = 10{,}3$ м и $\zeta_0 = 2$ (по Лоренцу) будет

$$\zeta = \lambda \cdot \frac{H}{d} = 2g \cdot \frac{2{,}49 \cdot 10{,}3 \cdot 1{,}1 - 15{,}41}{(0{,}95)^2 \cdot (3{,}49)^2} - \frac{2}{(3{,}49^2)} - 1 = 21{,}7$$

$$\lambda = \zeta \frac{d}{H} = 21{,}7 \frac{0{,}07}{36{,}5} = 0{,}041.$$

ля 2-й установки:

$= 36{,}5$ м; $H_n = 15{,}72$ м; $d = 70$ мм; $Q = 1294$ л/мин; $q_0 = 342{,}5$ л/мин; $= 3{,}11$ ат; $c_0 = 1{,}5$ м/сек; $\frac{Q}{q_0} = 3{,}78$; $\frac{p_0}{p_a} = 3{,}02$

соответственно

$$\zeta = \lambda \cdot \frac{H}{d} = 2g \cdot \frac{3{,}78 \cdot 10{,}3 \cdot 1{,}1 - 15{,}72}{(1{,}5)^2 \cdot (4{,}78)^2} - \frac{2}{(4{,}78)^2} - 1 = 9{,}26$$

куда

$$\lambda = 9{,}26 \cdot \frac{0{,}07}{36{,}5} = 0{,}018.$$

Из приведенной поверки вытекает, что коэфициенту λ нельзя иписывать постоянного значения, как это делает Лоренц, приимая его равным 0,02. В данном расчете λ сильно изменяется зависимости от отношения $\frac{Q}{q_0}$, при почти одинаковых остальых параметрах, причем падает с возрастанием этого гношения, то есть с возрастанием разбавления смеси оздухом.

Кроме того, нельзя по существу признать правильным выражение потери R_1 через посредство выходной скорости c_k.

В дальнейших параграфах настоящего исследования содержится предлагаемая мною теория эрлифта, которая, с одной стороны, упрощает основное уравнение работы подъемника, с другой — устанавливает более обоснованное выражение потери R_1, что в итоге приводит к необходимости применения эксплоатационных кривых.

II. Предлагаемая автором теория эрлифта

3. Основное уравнение работы подъемника

Для элементарной удельной работы подъема смеси воспользуемся выражением (13), принятым Лоренцом:

$$dL_1 = -v\ dp = dH + d\left(\frac{c^2}{2g}\right) + dR_1,$$

где v означает переменный удельный объем смеси.

Удельная работа по всей высоте H подъемной трубы равна:

$$L_1 = -\int_{p_0}^{p_a} v\,dp = \int_{p_a}^{p_0} v\,dp = H \int_{c_0}^{c_k} d\left(\frac{c^2}{2g}\right) + R_1. \qquad (19)$$

Однако в отличие от теории Лоренца, левую часть уравнения (14) мы представим в ином, более простом виде.

Вместо рассмотрения работы L_1, как суммы работ расширения воздуха и подъема жидкости давлением столба высотою h в скважине, мы будем рассматривать ее как непосредственно производимую расширением однородной упругой жидкости (эмульсии), как это впервые было предложено Меликовым.[1]

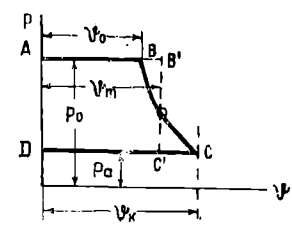


Рис. 5.

Тогда работа L_1 графически может быть представлена площадью фигуры $ABCD$ (рис. 5), где линия BC представляет кривую расширения смеси. Площадь эта может быть заменена площадью равновеликого прямоугольника $AB'C'D$, сторона коего $AB' = DC' = v_m$, причем v_m представляет средний по работе удельный объем смеси.

Таким образом

$$L_1 = -\int_{p_0}^{p_a} v\,dp = v_m(p_0 - p_a).$$

[1] Азерб. Нефт. Хоз., 1923, № 10

Что касается разности $(p_0 - p_a)$, то на основании (17), пренебрегая вторым членом правой части, то есть скоростным напором $\frac{c_0^2}{2g}$, можем положить

$$p_0 - p_a = h\gamma_0 \tag{20}$$

и замечая, что

$$v_m = \frac{1}{\gamma_m},$$

где γ_m есть средний по работе удельный вес смеси, получаем

$$L_1 = h \frac{\gamma_0}{\gamma_m}.$$

Вводя далее коэфициент

$$x = \frac{\gamma_m}{\gamma_0}, \tag{21}$$

представляющий отношение среднего удельного веса смеси к удельному весу натуральной жидкости, или так называемую „степень разбавления смеси", окончательно находим:

$$L_1 = \frac{h}{x} \tag{22}$$

Последнее уравнение заменяет собою уравнение (14) Лоренца и имеет перед ним преимущество чрезвычайной простоты.

Переходя ко второй части уравнения (19), в первую очередь преобразуем интеграл $\int_{c_0}^{c_k} d\left(\frac{c^2}{2g}\right)$. Если q_0 обозначает секундную объемную производительность натуральной жидкости, а q есть объемная производительность смеси, то, приближенно приравнивая друг другу весовые производительности натуральной жидкости и смеси, так как последняя превышает первую не более, чем на 0,5%, можем приблизительно принять

$$q_0 \cdot \gamma_0 = \sim q \cdot \gamma$$

и

$$c = \frac{q}{F} = \sim \frac{q_0 \cdot \gamma_0}{F} \quad v. \tag{23}$$

Тогда

$$\int_{c_0}^{c_k} d\left(\frac{c^2}{2g}\right) = \left(\frac{q_0}{F}\frac{\gamma_0}{}\right)^2 \int_{v_0}^{v_k} d\left(\frac{v^2}{2g}\right) = \left(\frac{q_0 \cdot \gamma_0}{F}\right)^2 \cdot \frac{v_k^2 - v_0^2}{2g} =$$

$$= \left(\frac{q_0 \cdot \gamma_0}{F}\right)^2 \frac{1}{2g} \; 2 \; \frac{v_k + v_0}{2} \; (v_k - v_0),$$

и полагая

$$\frac{v_k + v_0}{2} = v_{ср},$$

а также вводя коэфициент ψ, можем написать:

$$2\ v_{ср}(v_k - v_0) = \psi\ v_{ср}^2, \tag{24}$$

откуда находим

$$\int_{c_0}^{c_k} d\left(\frac{c^2}{2g}\right) = \left(\frac{q_0 \cdot \gamma_0}{F}\right)^2\ \psi\ \frac{v_{ср}^2}{2g},$$

или

$$\int_{c_0}^{c_k} d\left(\frac{c^2}{2g}\right) = \psi\ \frac{c_{ср}^2}{2g} \tag{25}$$

где

$$c_{ср} = \frac{q_0 \cdot \gamma_0}{F} \cdot v_{ср}.$$

С помощью (24) нетрудно найти приближенное выражение коэфициента ψ в функции степени разбавления x, именно:

$$2(v_k - v_0) = \psi\ \frac{v_k + v_0}{2}$$

откуда

$$\frac{v_k}{v_0} = \frac{4 + \psi}{4 - \psi}$$

и

$$v_{ср} = \frac{v_k + v_0}{2} = \frac{1 + \frac{v_k}{v_0}}{2} \cdot v_0,$$

или

$$\frac{v_{ср}}{v_0} = \frac{1 + \frac{4 + \psi}{4 - \psi}}{2} = \frac{4}{4 - \psi},$$

то есть

$$\psi = 4\left(1 - \frac{v_0}{v_{ср}}\right). \tag{26}$$

Далее, принимая фигуру $ABCD$ (рис. 5) приближенно за трапецию, можем положить

$$v_{ср} = \sim v_m,$$

и из (26) находим

$$\psi = \sim 4\left(1 - \frac{\gamma_m}{\gamma_0}\right) = 4(1 - x). \tag{26'}$$

Что касается потери от трения R_1 в правой части уравнения (19), то этой величине может быть придана следующая форма:

$$R_1 = \int_0^H dR_1 = \frac{\lambda}{d} \int_0^H dH \frac{c^2}{2g} \tag{27}$$

Вычисление этого интеграла требует знания закона изменения скорости c, или удельного объема v, по высоте трубы. Однако этого можно избежать, введя среднее подинтегральное значение функции $\frac{c^2}{2g}$ в интеграле (27) и форме $\psi' \frac{c_{ср}^2}{2g}$, где $c_{ср}$ имеет то же значение, что и в интеграле (25), коэфициент же ψ', вообще не равный ψ, остается пока неизвестным.

Тогда получим

$$R_1 = \psi' \lambda \cdot \frac{H}{d} \frac{c_{ср}^2}{2g}, \tag{27'}$$

и пользуясь (22), (25) и (27'), находим

$$\frac{h}{x} - H = \psi \left(1 + \frac{\psi'}{\psi} \lambda \frac{H}{d}\right) \frac{c_{ср}^2}{2g};$$

далее, обозначая

$$\lambda' = \frac{\psi'}{\psi} \lambda \tag{28}$$

и вводя коэфициент

$$a = \frac{h}{H} \tag{29}$$

характеризующий „степень погружения подъемной трубы", окончательно представим уравнение работы эрлифта в следующем виде:

$$H \frac{a-x}{x} = \psi \left(1 + \lambda' \frac{H}{d}\right) \frac{c_{ср}^2}{2g}. \tag{30'}$$

Полученная формула относится к боковому расположению воздушной трубки, вне подъемной трубы, согласно рисунку 3-му.

Нетрудно видеть, что в случае центрального внутреннего расположения воздушной трубки внешнего диаметра δ, вместо (27') будет

$$R_1 = \psi' \lambda \frac{H}{d-\delta} \frac{c_{ср}^2}{2g} \tag{27''}$$

и уравнение работы примет такой вид:

$$H \frac{a-x}{x} = \psi \left(1 + \lambda' \frac{H}{d-\delta}\right) \frac{c_{ср}^2}{2g} \tag{30''}$$

Что касается коэфициента λ', выражаемого формулою (28 то необходимо иметь в виду, что он не является величино постоянной и, как будет показано в дальнейшем, зависит с параметров x и a.

Кроме того, отношение $\frac{\psi'}{\psi}$ не может быть равно единиц и следовательно λ' не $=\lambda$.

В этом отношении полученные мною формулы (30′) и (30 существенно отличаются от выражения работы, выведенно Меликовым в цитированной выше статье,[1] которое имеет сл дующую форму:

$$\frac{h}{x} - H = \left(1 + \frac{\lambda \cdot H}{d}\right) \cdot \frac{c_{ср}^2}{2g}$$

При сравнении этой формулы с моими формулами (30′) и (30 наглядно выявляется неприемлемость формулы Меликова, т как последняя равносильна допущению $\frac{\psi'}{\psi} = 1$ и $\lambda' = \lambda$, что не м жет быть принято; кроме того, в формуле Меликова положе $\psi = 1$, что согласно нашей формуле (26′) отвечает частному случа

$$x = \frac{\gamma_m}{\gamma_0} = \frac{3}{4}$$

Заметим здесь, что неправильная структура формулы Мел кова была отмечена еще в 1924 г. проф. Есьманом,[2] котор указал на несоответствие введения в правой части указанно уравнения среднего скоростного напора $\frac{c_{ср}^2}{2g}$ основной форму (15); полагая в последней $c_0 = 0$, он предложил для уравнен работы следующее выражение:

$$\frac{h}{x} - H = \frac{c_k^2}{2g} + R_1,$$

оставив, однако, вопрос о виде R_1 открытым.

Наши уравнения (30′) и (30″) полностью базируются на фо муле (15) и вводят средний напор $\frac{c_{ср}^2}{2g}$ при посредстве коэф циентов ψ и ψ', чем устраняется какое-либо несоответствие.

Все дальнейшие выводы будут исходить из формул (30′) и (30″

В настоящем пункте остановимся еще на случае установ подъемной трубы в наклонной шахте под углом α к горизонт

Тогда, понимая под h и H попрежнему вертикальну глубину погружения и вертикальную высоту подъемн трубы, мы должны будем в формулах (27′) и (27″) для сопр тивлений R_1 в правой части вместо H ввести наклонную дли

---

[1] Воздушный подъемник жидкости, Азерб. Нефт. Хоз., 1923, № 10

[2] Азерб. Нефт. Хоз., 1924, № 5—6.

трубы $\frac{H}{\sin\alpha}$, в соответствии с чем формулы (30′) и (30″) примут следующий вид:

$$H\frac{a-x}{x}=\psi\left(1+\frac{\lambda'}{\sin\alpha}\cdot\frac{H}{d}\right)\frac{c_{ср}^2}{2g}$$

и

$$H\frac{a-x}{x}=\psi\left(1+\frac{\lambda'}{\sin\alpha}\cdot\frac{H}{d-\delta}\right)\frac{c_{ср}^2}{2g}.$$

При $\alpha=90°$ будет $\sin\alpha=1$ и последние формулы непосредственно переходят в формулы (30′) и (30″) для вертикального подъема.

Ввиду столь простого соотношения между вертикальным и наклонным подъемами в дальнейшем все рассуждения будут касаться исключительно вертикальных подъемов.

4. Производительность подъемника

Секундная объемная производительность натуральной жидкости равна $q_0=F\ c_0$;

на основании (23) имеем $\frac{c_0}{c_{ср}}=\frac{v_0}{v_{ср}}=\frac{\gamma_m}{\gamma_0}=x$,

следовательно

$$q_0=F\ x\ c_{ср}. \tag{31}$$

Уравнение (30′) для $c_{ср}$ дает

$$c_{ср}=\sqrt{\frac{2gH}{\psi\left(1+\lambda'\frac{H}{d}\right)}}\sqrt{\frac{a-x}{x}}$$

и из (31) следует:

$$q_0=F\sqrt{\frac{2gH}{\psi\cdot\left(1+\lambda'\cdot\frac{H}{d}\right)}}\sqrt{(a-x)x}$$

Внося в последнюю формулу вместо ψ его выражение из (26′), для бокового расположения воздушной трубки получаем

$$q_0\ F\sqrt{\frac{gH}{2\left(1+\lambda'\cdot\frac{H}{d}\right)}}\sqrt{\frac{(a-x)x}{1-x}} \tag{32′}$$

Для центрального расположения воздушной трубки будет

$$q_0=F\sqrt{\frac{gH}{2\left(1+\lambda'\cdot\frac{H}{d-\delta}\right)}}\sqrt{\frac{(a-x)\ x}{1-x}} \tag{32″}$$

Формулы (32′) и (32″) можно объединить, введя следующие обозначения:

$$A = F \sqrt{\frac{g\ H}{2\left(1+\lambda'\frac{H}{d}\right)}} \quad \text{или} \quad A = F\sqrt{\frac{g\cdot H}{2\left(1+\lambda'\cdot\frac{H}{d-\delta}\right)}} \tag{33}$$

и

$$y \sqrt{\frac{(a-x)x}{1-x}} \tag{34}$$

Тогда

$$q_0 = A \quad y \tag{35}$$

Здесь, в соответствии с предыдущим, также укажем на существенное отличие нашей формулы (32′) от формулы Меликова (см. указанную работу).

$$q_0 = F\sqrt{\frac{2gH}{1+\lambda\cdot\frac{H}{d}}} \quad \sqrt{(a-x)x}$$

которая равносильна неприемлемому допущению $\lambda' = \lambda$ и значению $\psi = 1$.

Из выражения (34) следует, что для вещественности q_0 должно быть соблюдено условие

$$x \leqslant a. \tag{36}$$

Поскольку параметр λ' не является величиной постоянной, нельзя безоговорочно принимать, что максимум q_0 при a=пост. определяется максимумом функции y согласно (34).

Однако, как будет выяснено далее в п. 9, из рассмотрения эксплоатационных кривых вытекает правильность такого допущения, а поэтому выяснение условий максимума y имеет существенное значение. При a=пост. максимум подкоренной величины выражения y отвечает условию

$$\frac{d}{dx}\left(\frac{ax-x^2}{1-x}\right) = \frac{(a-2x)\ \ (1-x)+ax-x^2}{(1-x)^2} = 0,$$

или, так как по существу $x < 1$, уравнению

$$x^2 - 2x \quad a = 0,$$

откуда определяется значение x, обращающее y в максимум, именно

$$x = 1 \quad \sqrt{1-a}$$

и так как

$$x < 1,$$

то

$$x = 1 - \sqrt{1-a} \tag{37}$$

С геометрической точки зрения уравнение (34) представляет поверхность 3-го порядка. Сечения этой поверхности плоскостями a=пост. дают семейство парабол третьего порядка, которое может

быть построено раз навсегда в форме номограммы (рис. 6), используемой при расчетах.

При $x=0$ и $x=a$ будет $y=0$; значение x, определяемое (37) и обращающее y в максимум, при $a=\frac{1}{10}$ равно $x=0{,}05=\frac{a}{2}$, при $a>\frac{1}{10}$ будет $x>\frac{a}{2}$.

Что касается коэфициента погружения a, то его величина ограничивается условием $h<H_d$,

где H_d есть высота динамического уровня (рис. 3), и так как

$$a \quad \frac{h}{H} \quad \frac{h}{H_n+h},$$

то

$$h=\frac{a}{1-a} \quad H_n$$

и

$$\frac{a}{1-a}<\frac{H_d}{H_n}=\beta, \tag{38}$$

откуда находится общее условие

$$a<\frac{\beta}{1+\beta} \tag{39}$$

С возрастанием β предел для a возрастает: так, при $\beta<1$, например, $\beta=\frac{3}{4}$, будет $a<\frac{3}{7}$

$\beta=1$, $\qquad a<\frac{1}{2}$

$\beta>1$, например, $\beta=1{,}5$, будет $a<\frac{3}{5}$.

Необходимая производительность подъемника, как вытекает из предыдущего, обусловливается надлежащим выбором параметров a и x; этими же параметрами определяется к. п. д. подъемника, к рассмотрению которого мы и перейдем.

5. Коэфициент полезного действия подъемника

Удельная работа, затрачиваемая на подъем смеси в подъемной трубе на всю высоту ее H, от нижнего сечения до верхнего, как мы видели, определяется выражением (19), в котором (рис. 3)

$$H=H_n+h.$$

Часть этой работы покрывается столбом жидкости в скважине высотою h; таким образом, за счет расширения воздуха затрачивается лишь работа

$$L_1'=L_1-h=H_n \int_{c_0}^{c_k} d\left(\frac{c}{2\cdot g}\right)+R_1,$$

которая, согласно (22), равна

$$L_1'=\frac{h}{x}-h=h\,\frac{1-x}{x}.$$

Полезная удельная работа L_n, однако, определяется высотой подъема H_n натуральной жидкости с динамического уровня ее в скважине.

Но $$H_n = H - h = h\left(\frac{H}{h} - 1\right) = h\left(\frac{1}{a} - 1\right) = h\ \frac{1-a}{a},$$

и к. п. д. подъемника, при равенстве весовых производительностей смеси и натуральной жидкости, как приближенно принято в пункте 3, будет

$$\eta' \quad \frac{1-a}{a} \cdot \frac{x}{1-x} \tag{40}$$

Таким образом, при данном a величина η' есть функция x то есть $\eta' = f(x)$.

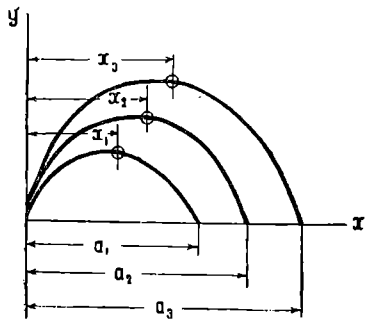


Рис. 6.

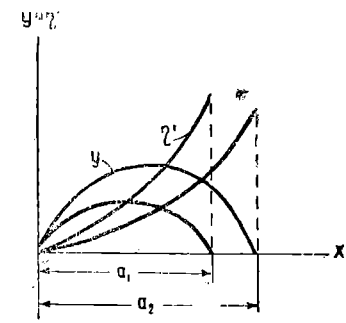


Рис. 7.

Кривые η' при различных значениях a могут быть построены раз навсегда, совместно с кривыми y, как показано на рис. 7. Кривая η' максимума не имеет. При $x=0$ будет $\eta'=0$, при $x=a$ — $\eta'=1$. При данном a к. п. д. η' возрастает по мере приближения x к a; при одном и том же x величина η' возрастает с уменьшением a.

Следовательно, с точки зрения величины η' выгодно иметь малые значения a при близких к ним значениях x, то есть малые погружения при больших расходах воздуха.

Для суждения о возможных значениях коэфициента η' приведем нижеследующие примеры:

при $a=0{,}3$ и $x=0{,}2$ будет $\eta'=0{,}6$;
„ $a=0{,}4$ „ $x=0{,}3$ $\eta'=0{,}64$;
$a=0{,}5$ „ $x=0{,}4$ $\eta'=0{,}67$;
$a=0{,}6$ $x=0{,}5$ $\eta'=0{,}67$;
$a=0{,}7$ „ $x=0{,}6$ $\eta'=0{,}64$.

Определяемый выражением (40) коэфициент η' представляет отношение полезной работы подъема к работе затраченной, с учетом в последней гидравлических потерь на приращение скоростного напора и на трение в трубе, и по существу является гидравлическим к. п. д.

Помимо этого к. п. д. необходимо учесть еще отдачу воздушного цикла η'', представляющую отношение удельной работы расширения воздуха L_1' к работе L_1'', затраченной на его сжатие в компрессоре, то есть отношение

$$\eta'' = \frac{L_1'}{L_1''}, \tag{41}$$

которое по существу может быть названо пневматическим к. п. д.

Таким образом, общий к. п. д. эрлифта η равен произведению

$$\eta = \eta' \ \eta'' \tag{42}$$

Если V_a означает начальный удельный объем воздуха в компрессоре, V_0'' — конечный объем сжатия, V_0' — начальный удельный объем воздуха при входе его в башмак эрлифта и V_k — конечный объем при расширении в подъемной трубе, то работа L_1' представляется площадью $AB'C'D$ (рис. 8), работа же L_1'' — площадью $AB''C''D$, и пневматический к. п. д. равен отношению

$$\eta'' = \frac{\text{пл. } AB'C'D}{\text{пл. } AB''C''D}$$

которое в аналитической форме может быть представлено в следующем виде:

$$\eta'' = \frac{m'}{m''} \cdot \frac{m''-1}{m'-1} \cdot \frac{V_k}{V_a} \cdot \frac{\left(\frac{p_0}{p_a}\right)^{\frac{m'-1}{m'}} - 1}{\left(\frac{p_0}{p_a}\right)^{\frac{m''-1}{m''}} - 1}$$

где m' и m'' суть показатели политроп $B'C'$ и $B''C''$

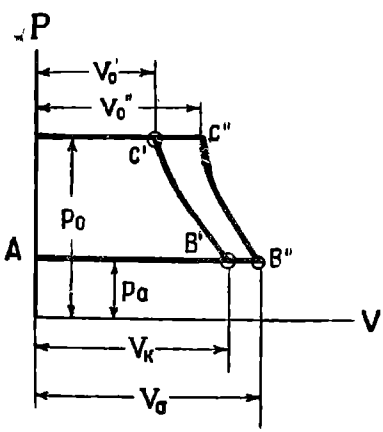


Рис. 8.

Для суждения о возможных значениях η'' примем следующие данные. Показатель $m' = 1{,}04$, показатель $m'' = 1{,}35$; температура воздуха, засасываемого в компрессор, $t_a = 15°$ С; температура сжатого воздуха при входе в башмак $t_0' = 27°$ С; $p_0 = 7$ ат. абс.; $p_a = 1$ ат. абс. Тогда

$$V_0' = \frac{R(273 + t_0')}{p_0} = \frac{29{,}27 \cdot 300}{70000} = 0{,}1254 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$V_k = V_0'\left(\frac{p_0}{p_a}\right)^{\frac{1}{m'}} = 0{,}1254 \quad 7^{\ \frac{1}{1{,}04}} = 0{,}8108 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$\frac{V_k}{V_a} = 0{,}96$$

и согласно (43)

$$\eta'' = \frac{1{,}04}{1{,}35} \cdot \frac{0{,}35}{0{,}04} \quad 0{,}96 \cdot \frac{7^{\frac{0{,}04}{1{,}04}} - 1}{7^{\frac{0{,}35}{1{,}35}} - 1} = 0{,}73.$$

При $\eta' = 0{,}65$ общий к. п. д. будет

$$\eta = 0{,}65 \quad 0{,}73 = 0{,}47.$$

Этот результат интересно сравнить с общим к. п. д. при откачке подвесным центробежным насосом с электроприводом: если гидравлический к. п. д. насоса есть 0,7, отдача двигателя — 0,8 и механический к. п. д. агрегата — 0,9, то общий к. п. д. агрегата будет

$$\eta = 0{,}7 \cdot 0{,}8 \quad 0{,}9 = 0{,}50.$$

Таким образом, общий к. п. д. эрлифта хотя и ниже, чем у насосного агрегата, однако не столь значительно, как это обычно принимается.

6. Расход воздуха

В настоящем пункте рассмотрим вопрос о необходимом весовом количестве воздуха G кг для подъема весовой единицы натуральной жидкости.

Если среднему удельнему объему v_m смеси отвечает средний удельный объем воздуха V_m, то смеси весом $(1 + G)$ кг отвечает средний объем

$$(1 + G) v_m = v_0 + G V_m,$$

откуда относительный весовой расход воздуха будет:

$$G = \frac{v_m - v_0}{V_m - v_m} \tag{44}$$

Выражая средний объем V_m в виде отношения

$$V_m = \frac{L_1'}{p_0 - p_a}$$

и замечая, что по (20)

$$p_0 \quad p_a = \frac{h}{v_0}$$

и по (21)

$$\frac{v_m}{v_0} = \frac{1}{x},$$

из (44) получаем

$$G = (1-x)\frac{h}{L_1' x - h} \tag{45}$$

Что касается работы L_1', то при ее вычислении можно исходить из политропического расширения воздуха, близкого к изотермическому, с показателем близким к единице, например — 1,05.

7. Начальное и рабочее давление воздуха в башмаке

При начале откачки жидкость в скважине (шахте) стоит на статическом уровне ВВ (рис. 3), на высоте H_s от забоя; во время работы уровень жидкости понижается до АА и держится на высоте H_d от забоя.

Начальное давление в башмаке P_0 отвечает статическому уровню и слагается из давления атмосферы p_a и давления столба, высота которого равна расстоянию между статическим уровнем и нижним сечением подъемной трубы.

Согласно рис. 3, расстояние это равно понижению горизонта $(H_s - H_d)$ плюс погружение h подъемной трубы под динамическим уровнем; таким образом, начальное давление есть

$$P_0 = p_a + [(H_s - H_d) + h]\gamma_0. \tag{46}$$

Понижение уровня $(H_s - H_d)$ может быть найдено из выражения давления в забое скважины (шахты), которое одинаково при обоих уровнях и равно

$$p_a + H_s\ \gamma_0 = p_a + H_d \cdot \gamma_0 + \left(\frac{c_d^2}{2g} + h_r\right)\gamma_0,$$

где c_d есть скорость притекания жидкости к динамическому уровню, а h_r — вредные сопротивления в скважине (шахте) на пути от забоя до динамического уровня. Отсюда получаем понижение горизонта

$$H_s - H_d = \frac{c_d^2}{2g} + h_r, \tag{47}$$

и начальное давление воздуха из (46) будет

$$P_0 = (p_a + h \cdot \gamma_0) + \left(\frac{c_d^2}{2g} + h_r\right) \tag{46'}$$

Здесь сумма

$$p_a + h \cdot \gamma_0 = p_0 \tag{20'}$$

согласно (20) представляет статическое давление в нижнем сеч нии подъемной трубы при откачке жидкости; оно являет рабочим давлением при вступлении воздуха в подъемну трубу.

Что касается вредных сопротивлений h_r в скважине (шахт то последние могут быть представлены суммой

$$h_r = h'_r + h''_r,$$

причем величина h'_r отвечает участку $H_d - h$, а величи h''_r — участку h.

Обозначив скорость течения на участке $H_d - h$ через $c'_{тр}$, име

$$h'_r \quad \gamma_0 = \rho \cdot \frac{U'}{F'} (H_d - h) \frac{c'^{\,2}_{тр}}{2g} \gamma_0,$$

где U' и F' означают периметр и площадь сечения скважины.

Для участка h в выражении h''_r соответственно должны бы введены величины U'', F'' и $c''_{тр}$, то есть

$$h''_r \quad \gamma_0 = \rho \quad \frac{U''}{F''} \cdot h \cdot \frac{c''^{\,2}_{тр}}{2g} \quad \gamma_0$$

Суммируя эти выражения, получаем

$$h_r \, \gamma_0 = \rho \quad \frac{U'}{F'} \quad \frac{c'^{\,2}_{тр}}{2g} \quad \gamma_0 \left[(H_d - h) + \frac{U''}{U'} \cdot \frac{F'}{F''} \quad \left(\frac{c''^{\,2}_{тр}}{c'^{\,2}_{тр}} \right)^2 \quad h \right].$$

Обозначив внутренний диаметр скважины через D и нару ный диаметр подъемной трубы через d_0, найдем

$$\frac{U''}{U'} = 1 + \frac{d_0}{D} = 1 + \nu_0,$$

где

$$\nu_0 = \frac{d_0}{D}$$

далее

$$\frac{c''_{тр}}{c'_{тр}} = \frac{F'}{F''} = \frac{D^2}{D^2 - d_0^2} = \frac{1}{1 - \nu_0^2}$$

$$\frac{U'}{F'} = \frac{4}{D} \quad \text{и} \quad 4\rho = \lambda.$$

Тогда

$$h_r \quad \gamma_0 = \frac{\lambda}{D} \quad \left[H_d - \left\{ 1 - \frac{1 + \nu_0}{(1 - \nu_0^2)^3} \right\} h \right] \frac{c'^{\,2}_{тр}}{2g} \quad \gamma_0.$$

Кроме того, в выражении (46′) скорость $c_d = c''_{тр}$, и следователь

$$\frac{c_d^2}{2g} = \frac{c''^{\,2}_{тр}}{2g} = \frac{1}{(1 - \nu_0^2)^2} \cdot \frac{c'^{\,2}_{тр}}{2g};$$

таким образом, вместо (46′) для рабочего давления окончательно имеем

$$P_0 = p_0 + \left[\frac{1}{(1-\nu_0^2)^2} + \frac{\lambda}{D}\left[H_d - \left\{1 - \frac{1+\nu_0}{(1-\nu_0^2)^3}\right\} h\right]\right] \frac{c'^2_{\text{тр}}}{2 \cdot g} \cdot \gamma_0. \quad (46'')$$

При достаточно больших диаметрах D, малых ν_0 и небольших $c'_{\text{тр}}$ разность $(P_0 - p_0)$ незначительна, и ею можно пренебрегать, что вполне отвечает условиям откачки затопленных шахт. При этом совершенно неощутительным является при работе и понижение статического уровня.

8. Диаметр подъемной трубы

При боковом расположении воздушной трубки диаметр подъемной трубы d находится с помощью (33) из уравнения

$$A = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{g}{2}}\, d^2 \sqrt{\frac{H}{1+\lambda' \frac{H}{d}}},$$

в котором величины A, H и λ' должны быть известны. Уравнение это для практических целей неудобно, так как содержит неизвестное d в первой и в пятой степени.

Однако в определенных случаях практики оно может быть упрощено, для чего представим предыдущее выражение в следующей форме:

$$A = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{g}{2}} \sqrt{\frac{d^5}{\lambda'\left(1 + \frac{d}{\lambda' H}\right)}},$$

или

$$A = 1{,}74 \sqrt{\frac{d^5}{\lambda'\left(1 + \frac{d}{\lambda' H}\right)}},$$

вводя числовое значение

$$\frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{g}{2}} = 1{,}74.$$

В обычных условиях практики степень погружения a заключается в пределах от 0,4 до 0,75, причем для таких значений погружения, по данным эксплоатации, величина дроби

$$\frac{d}{\lambda' H} \leqslant 0{,}2.$$

Вводя в выражение для A величину

$$\frac{d}{\lambda' H} = 0{,}2,$$

получим

$$A = 1{,}74 \sqrt{\frac{d^5}{1{,}2\lambda'}} = 1{,}74 \cdot 0{,}9 \sqrt{\frac{d^5}{\lambda'}}$$

откуда, замечая, что $1{,}74^2 = \backsim 3$, находим

$$d = 1{,}05 \left(\frac{\lambda'}{3}\right)^{0{,}2} A^{0{,}4}$$

Таким образом, для нормальных условий работы может быть принято

$$d = \left(\frac{\lambda'}{3}\right)^{0{,}2} A^{0{,}4}, \tag{48'}$$

причем вычисленное по этой формуле d вообще будет менее действительного, но с погрешностью не свыше 5%.

Для компенсации этой погрешности могут быть принимаемы несколько увеличенные значения коэфициента λ'.

Приближенной формуле (48') соответствует следующее выражение для A:

$$A = 1{,}74 \sqrt{\frac{d^5}{\lambda'}} \tag{49'}$$

которое более действительно, причем погрешность не превосходит 10%; последняя также компенсируется увеличенным значением λ'

Для центрального расположения воздушной трубки, согласно (33), пренебрегая единицей в знаменателе под корнем квадратным, получаем

$$A = 1{,}74 \ (d^2 - \delta^2) \sqrt{\frac{d-\delta}{\lambda'}}$$

или, с помощью обозначения

$$\nu = \frac{\delta}{d},$$

также

$$A = 1{,}74\,(1+\nu)(1-\nu)^{3/2} \sqrt{\frac{d^5}{\lambda'}},$$

и соответственно

$$d = \left[\frac{\lambda'}{3(1+\nu)^2(1-\nu)^3}\right]^{0{,}2} A^{0{,}4}$$

Если обозначить

$$(1+\nu)(1-\nu)^{3/2} = \alpha, \tag{50}$$

то

$$d = \left(\frac{\lambda'}{3\alpha^2}\right)^{0{,}2} A^{0{,}4} \tag{48''}$$

и

$$A = 1{,}74\alpha \sqrt{\frac{d^5}{\lambda'}} \tag{49''}$$

При отсутствии центральной воздушной трубки, очевидно, $\nu=0$, $\alpha=1$ и формулы (48″), (49″) непосредственно переходят в формулы (48′) и (49′) для бокового расположения.

При употребительном значении $\nu=0{,}25$ будет $\alpha=\backsim 0{,}8$.

9. Коэфициент λ' и эксплоатационные кривые

В пунктах 3-м и 4-м уже было указано, что коэфициент λ' не является величиной постоянной, а зависит от параметров a и x.

Различные численные значения этого коэфициента могут быть получены пересчетом по данным практики, пользуясь формулами, ранее выведенными и легко преобразуемыми.

Так, на основании (32′) и (34) имеем

$$c_0=\sqrt{\frac{g}{2}\cdot\frac{H}{1+\lambda'\ \frac{H}{d}}}\ y,$$

откуда

$$=\frac{g}{2}\cdot y^2\ \ \frac{d}{c_0^2}-\frac{d}{H},$$

и вводя обозначения

$$\frac{g}{2}=\kappa,\ \frac{d}{c_0^2}=z,$$

при боковом расположении воздушной трубки находим

$$\lambda'=\kappa\ \ y^2\cdot z-\frac{d}{H}. \qquad (51')$$

При центральном расположении подводящей воздух трубки из (32″) и (34) вытекает

$$c_0=\sqrt{\frac{g}{2}\cdot\frac{H}{1+\lambda'\ \frac{H}{d-\delta}}}\ \ y$$

и

$$\frac{g}{2}\ \ y\cdot\frac{d-\delta}{c^2}-\frac{d-\delta}{H}$$

или

$$\lambda'=\kappa\ \ y^2\ \ z-\frac{d-\delta}{H} \qquad (51'')$$

где

$$z=\frac{d-\delta}{c_0^2}=(1-\nu)\ \frac{d}{c_0^2}$$

Для вычисления λ' по формулам (51′) и (52″) должны быть известны по данным опыта величины

$$c_0=\frac{q_0}{F}\ \text{ и }\ a=\frac{h}{H},$$

находимые непосредственно, и коэфициент x, вычисляемый с помощью (45) при посредстве относительного весового расхода воздуха G, именно

$$x = \frac{(1+G)h}{G \cdot L'_1 + h} \qquad (52$$

Формулы (51′), (51″) и (52) применимы к данным, относящимся к ряду воздушных подъемников для воды, приведенным в статье А. Н. Веселова „Откачка сжатым воздухом рудников Сойма новской долины".[1]

В этих данных указываются производительности подъемников, расходы свободного воздуха, погружение, полезная высота подъема и диаметры подъемных труб.

Указанные данные сгруппированы в таблице 1, в которой все единицы измерений нами приведены к метрической системе а производительности и расходы отнесены к одной секунде.

Таблица

№ по пор.	Производ. q_0 м³/сек.	Расход свободного воздуха Q м³/сек.	Погружение h м	Полезная высота подъема H_n	$H = h + H_n$	Диаметр подъемной трубы d м	Внутренний диаметр центральной воздушной трубы δ м	Место установки	Ссылка на источник
1	0,025	0,374	15	70	85	0,152		Карпинский рудник	Рудники Сойманов-ской долины
2	0,066	0,155	19,25	23,55	42,83	0,254	0,0635	Мемфис	Стр. 249, т.
3	0,073	0,157	19,9	22,5	42 4	0,254	0,0635		Тоже
4	0,045	0,162	19,3	23,8	43,1	0,254	0,0635		
5	0,052	0,141	20,2	21,0	41,2	0,254	0,0635		
6	0,045	0,223	45	40	85	0,152	—	„ Карпинский рудник	„ Рудники Сойманов-ской долины
7	0,0057	0,022	20,78	15,72	36,5	0,070		Шарлот-тенбург	Стр. 251
8	0,0036	0,090	21,09	15,41	36,5	0,070		Шарлот-тенбург	Стр. 251
9	0,0028	0,013	92	61,6	153,6	0,051		Бростово	Стр. 254
10	0,006	0,021	21,7	14,8	36,5	0,070	—	Шарлот-тенбург	Стр. 251
11	0,0039	0,0094	22,24	14,26	36,5	0,070		Шарлот-тенбург	Стр. 251
12	0,0045	0,0213	123	70	93	0,062		Сааральбен	Стр. 254
13	0,0064	0,0381	74,1	39,3	113,4	0,089		Канделярия	Стр. 250
14	0,050	0,202	28,92	13,08	42	0,160		Глогау	Стр. 254
15	0,054	0,128	65	20	85	0,152		Карпинский рудник	Рудники Сойманов-ской долины

[1] Труды I Горного Научно-технического Съезда, . IV, 1928 г. стр. 24 и след.

Для вычисления x должна быть известна температура свободного воздуха, которой определяется удельный вес его γ и секундный весовой расход $Q\gamma$. В таблице температура эта не дана; имея в виду, что она, конечно, не выше 0° С, мы примем удельный вес $\gamma = 1{,}25$ кг/м³.

Точно также не дана температура сжатого воздуха t_0' при входе в подъемную трубу, необходимая для вычисления работы расширения L_1; мы примем эту температуру $t_0' = 27°$ С или $T_0' = 300°$абс. В качестве иллюстрации проведем расчеты для установки на руднике *Memphis Tenn*, данные для которой помещены в предыдущей таблице под № 3.

По этим данным относительный весовой расход воздуха

$$G = \frac{Q\gamma}{q_0\gamma_0} = \frac{0{,}157 \quad 1{,}25}{0{,}073 \quad 1000} = 0{,}0027,$$

давление его в башмаке

$$p_0 = p \quad - h\gamma_0 = 10333 + 19{,}9 \quad 1000 = 30233 \text{ кг/м}^2$$

и отношение

$$\frac{p_0}{p_a} = \frac{30233}{10333} = 2{,}93$$

Степень разбавления x найдем по формуле (52), полагая расширение изотермическим:

$$x = \frac{1{,}0027 \quad 19{,}9}{0{,}0027 \quad 29{,}27 \cdot 300 \cdot \lg 2{,}93 + 19{,}9} = 0{,}44.$$

Степень погружения

$$a = \frac{h}{H} = \frac{19{,}9}{42{,}4} = 0{,}47$$

и

$$y^2 = \frac{(a - x) \cdot x}{1 - x} = \frac{(0{,}47 - 0{,}44) \quad 0{,}44}{1 - 0{,}44} = 0{,}0235.$$

При внутреннем диаметре воздушной трубки $\delta_0 = 0{,}0635$ м внешний ее диаметр может быть принят $\delta = 0{,}068$ м и

$$\nu = \frac{0{,}068}{0{,}254} = \sim 0{,}27$$

Тогда площадь живого сечения подъемной трубы

$$F = \frac{\pi}{4}(1 \quad \nu)^2 d^2 = \frac{\pi}{4}(1 - 0{,}27^2)\, 0{,}254^2 = 0{,}046 \text{ м}^2$$

и скорость

$$c_0 = \frac{q_0}{F} = \frac{0{,}073}{0{,}046} = 1{,}6 \frac{\text{м}}{\text{сек}};$$

далее

$$z = (1 - \nu)\,\frac{d}{c_0^2} = (1 - 0{,}27)\,\frac{0{,}254}{1{,}6^2} = 0{,}0724 \text{ м}^{-1}\text{сек}^2,$$

$$\kappa = \frac{g}{2} = 4{,}9 \text{ мсек}^{-2}$$

$$\frac{d - \delta}{H} = \frac{0{,}254 - 0{,}068}{42{,}4} = 0{,}0043$$

и согласно (51″)

$$\lambda' = \kappa z y^2 - \frac{d - \delta}{H} = 0{,}0083 - 0{,}0043 = 0{,}0040.$$

Аналогичным образом находятся численные значения λ' для всех остальных установок таблицы 1-й Результаты вычислений, с включением промежуточных величин, сгруппированы в таблице 2-й.

Из этой таблицы могут быть сделаны существенные выводы, именно следующие.

1) Для всех установок, с № 4 по № 15 включительно, при погружениях от $a = 0{,}45$ до $a = 0{,}76$ и отношениях $\frac{x}{a}$ в пределах $0{,}30 - 0{,}72$, величины $\frac{d}{H}$ и $\frac{d - \delta}{H}$ незначительны по сравнению с произведением $\kappa\ z\ y^2$ и мало влияют на величину λ

Таблица 2

№ по пор.	G	a	x	y^2	z	$\kappa y^2 z$	d/H	$\frac{d-\delta}{H}$		x/a
1	0,0187	0,18	0,09	0,009	0,08	0,0036	0,0018		0,0018	0,50
2	0,0029	0,45	0,42	0,0217	0,09	0,0095	—	0,0043	0,0052	0,93
3	0,0027	0,47	0,44	0,0235	0,0724	0,0083		0,0043	0,0040	0,94
4	0,0045	0,45	0,32	0,0612	0,193	0,0567		0,0043	0,0524	0,71
5	0,0034	0,50	0,38	0,0735	0,1426	0,0515		0,0043	0,0470	0,76
6	0,0060	0,53	0,34	0,098	0,0247	0,0118	0,0018		0,010	0,64
7	0,0046	0,57	0,32	0,118	0,031	0,018	0,0020	—	0,016	0,56
8	0,0031	0,58	0,41	0,118	0,078	0,045	0,0020		0,043	0,70
9	0,0060	0,60	0,43	0,128	0,026	0,0163	0,0003		0,016	0,71
10	0,0043	0,60	0,34	0,134	0,028	0,0184	0,0020	—	0,0164	0,57
11	0,0030	0,61	0,42	0,1376	0,068	0,0458	0,0020		0,0438	0,70
12	0,0064	0,637	0,46	0,1507	0,032	0,0236	0,0003		0,0233	0,72
13	0,016	0,65	0,20	0,112	0,089	0,0491	0,0008		0,0483	0,30
14	0,005	0,69	0,33	0,1774	0,025	0,0217	0,0040		0,0177	0,48
15	0,003	0,764	0,55	0,2615	0,017	0,0218	0,0018	—	0,020	0,72

Это те, именно, случаи, о коих шла речь в предыдущем пункте, для которых вообще $\frac{d}{\lambda' H} \leqslant 0{,}2$; наибольшее значение эта дробь имеет для установки № 14 и равна 0,23.

Во всех этих случаях применимы формулы (48′) и (49′), а также приближенно можно положить

$$\lambda' = \sim \kappa z y^2.$$

При этом необходимо обратить внимание на то обстоятельство, что в рассматриваемых случаях не только степень погружения a лежит в пределах от 0,45 до 0,76, но еще и отношение $\frac{x}{a} = 0{,}30 \quad 0{,}72$.

2) С увеличением этого отношения, при нормальном значении степени погружения, величина λ' значительно отличается от произведения $\kappa z y^2$, что видно из табл. 2 для установок № 2 и 3, у которых при $a = 0{,}45 - 0{,}47$ отношение $\frac{x}{a}$ имеет весьма большую величину $0{,}93 - 0{,}94$.

3) С падением коэфициента a, даже при нормальном значении отношения $\frac{x}{a}$, коэфициент λ' сильно отличается от $\kappa z y^2$, как это видно на примере установки № 1, где $a = 0{,}18$ при $\frac{x}{a} = 0{,}50$.

4) Если нанести в прямоугольных координатах по оси ординат значения z из табл. 2, а по оси абсцисс — соответственные величины y^2, то для установок с № 4 по № 13 включительно получатся точки, которые могут быть сгруппированы относительно определенных кривых, отвечающих мало отличающимся значениям степени погружения a.

Такие группировки представлены на прилагаемой $z - y^2$ диаграмме.

На этой диаграмме точки, соответствующие установкам 4, 5 и 6, группируются около кривой AB, которая будет отвечать среднему значению погружения $a = \sim 0{,}49$.

Точно также точки, соответствующие установкам 7, 9 и 10, группируются около кривой CD, с средней величиной погружения $a = \sim 0{,}59$, точки установок 8, 11, 12, 13 — около кривой EF с средним значением $a = \sim 0{,}62$. Точки установок 1, 14 и 25 являются изолированными (единичными); из них на диаграмме отмечены лишь 1-я и 14-я, причем через них пунктиром ориентировочно нанесены кривые y^2 для погружения $a = 0{,}18$ и $a = 0{,}76$.

Для установок 2-й и 3-й, соответствующих, как выше было указано, ненормальным отношениям $\frac{x}{a} = 0{,}93 - 0{,}94$ при $a = 0{,}45 - 0{,}47$, также нанесена пунктирная кривая, сильно сдвинутая влево от кривой AB, с $a = \sim 0{,}49$.

5) Оставляя в стороне установки 2-ю и 3-ю, мы видим, что кривые AB, CD и EF, а также ориентировочные кривые для

установок 1-й и 14-й проявляют определенную закономерность: именно, они все подобны друг другу и отступают вправо по мере возрастания погружения a.

По существу указанные кривые являются эксплоатационными характеристиками пневматических водоподъемных установок, представляющими некоторое уравнение вида

$$z = f(y^2, a),$$

и заменяющими безразмерные характеристики $\kappa z - y^2$, так как постоянный коэфициент $\kappa = \frac{g}{2}$ имеет измерение ускорения, а переменная z — измерение величины, обратной ускорению, параметр же y измерений не имеет.

6) Так как значению $y^2 = 0$, согласно уравнению (35), отвечает производительность $q_0 = 0$, или скорость $c_0 = 0$, то соответственная величина параметра z будет равна

$$z = (1 - \nu)\frac{d}{c_0^2} = \infty,$$

т. е. ось ординат является ассимптотой кривой $z - y^2$.

Далее из рассмотрения полученных кривых вытекает, что в силу падения ординат z с возрастанием y^2, кривые $z - y^2$ должны прерываться в точках, отвечающих значениям y^2_{max}, т. е. ось абсцисс не является ассимптотой данных кривых.

Так, для $a = 0{,}53$ кривая z должна прерваться в точке, для которой y^2_{max} согласно (37) определяется значением

$$x = 1 - \sqrt{1 - 0{,}53} = \sim 0{,}31,$$

то есть

$$y^2_{max} = \frac{(a - x)\,x}{1 - x} = \frac{(0{,}53 - 0{,}31) \cdot 0{,}31}{0{,}69} = \sim 0{,}099,$$

при $z = \sim 0{,}020$, что несколько ниже точки 6 на диаграмме $z - y^2$. Минимальным значениям z вообще отвечают максимальные величины скорости c_0, откуда следует, что максимальная производительность подъема определяется максимумом параметра y, на что предварительно было уже указано в пункте 4-м.

7) Так как одному и тому же значению y соответствует вообще два различных значения x, то, при данном погружении и диаметре трубы, одной и той же производительности q_0 отвечают два разных значения удельного весового расхода воздуха G и два значения объемного расхода свободного воздуха Q, которые сливаются в одно для максимума q_0, определяемого величиною

$$x = 1 - \sqrt{1 - a}.$$

Таким образом, зависимость

$$q_0 = F(Q)$$

графически должна представляться кривою, аналогичной рис. 4, приведенному в пункте 2-м при рассмотрении теории Лоренца.

8) Значение эксплоатационных кривых $z-y^2$ состоит в их применении к расчету, причем не в отношении коэфициента λ', определяемого уравнением $\lambda' = \sim kzy^2$, а в непосредственном их использовании, минуя коэфициент λ' и величину A, определяющую вместе с y производительность подъемника

$$q_0 = A\ y.$$

В дальнейшем мы рассмотрим методику расчета, основанную на применении эксплоатационных кривых.

10. Методика расчета на основе эксплоатационных кривых

При расчете водоподъемных воздушных установок следует различать два случая, именно: а) установки стационарные, с постоянным уровнем поднимаемой жидкости и б) установки с переменным уровнем.

Первые имеют место при эксплоатации скважин; постоянство уровня *в них обусловлено равенством между производительностью* подъемника *и дебитом* скважины.

Вторые служат для откачки затопленных шахт; вследствие того что производительность установки при этом превосходит приток шахтных вод, уровень жидкости в шахте постепенно падает.

Этими различиями в условиях работы установок определяются и различия в их расчете. Мы рассмотрим те и другие установки раздельно.

а) Стационарные установки

В данном случае известными являются полезная высота подъема H_n и расстояние от динамического уровня до забоя скважины H_d. Заданной величиной является производительность q_0, равная дебиту скважины; последняя должна быть обеспечена соответственным выбором элементов установки и режима работы.

В первую очередь выбирается коэфициент погружения a, ориентируясь на неравенство (39) и учитывая то, что хотя с уменьшением a возрастает гидравлический к. п. д. η', но в то же время увеличивается расход воздуха и необходимый диаметр подъемной трубы. По возможности, следует a брать не ниже 0,6.

Выбранным значением a определяется высота подъемной трубы

$$H = \frac{H_n}{1-a}$$

и погружение

$$h = aH.$$

Далее выбирается степень разбавления x, возможно ближе к a — для обеспечения более высокого к. п. д. η', и по формуле (40) находится последний. Согласно предыдущему, однако, следует ориентироваться на условие $x \leqslant 0{,}75\ a$.

С помощью коэфициентов a и x определяется величина

$$y^2 = \frac{(a-x)\,x}{1-x}$$

и находится соответственное значение z по эксплоатационной кривой, отвечающей погружению a.

Пользуясь найденным z, получаем необходимый диаметр подъемной трубы d, исходя из того, что

$$z = \frac{d}{c_0^2}, \qquad c_0 = \frac{q_0}{F} \qquad \text{и} \qquad F = \frac{\pi}{4} d^2 = 0{,}785\ d^2$$

откуда

$$d = \left(\frac{q_0}{0{,}785}\right)^{0{,}4} \cdot z^{0{,}2} \tag{53}$$

Наконец, определяем рабочее давление воздуха

$$p_0 = p_a + \gamma_0 h,$$

удельный весовой расход его G по формуле (45) и объемный расход свободного воздуха

$$Q = G q_0 \gamma_0 v,$$

где v есть его удельный объем.

Для иллюстрации изложенного метода приведем численный пример.

Требуется рассчитать воздушный подъемник для артезианской скважины с производительностью $q_0 = 0{,}032$ м³/сек, при $H_n = 50$ м и $H_d = 125$ м, т. е. $\beta = \frac{H_d}{H_n} = 2{,}5$.

Коэфициент погружения должен удовлетворять условию

$$a < \frac{\beta}{1+\beta} = \frac{2{,}5}{3{,}5} = 0{,}71,$$

примем его

$$a = 0{,}62.$$

Тогда

$$H = \frac{H_n}{1-a} = \frac{50}{0{,}38} = 132 \text{ м}$$

и

$$h = a\ H = 0{,}62 \cdot 132 = 81{,}8 \text{ м}.$$

Степень разбавления примем

$$x = 0{,}75 \cdot a = 0{,}46$$

и по формуле (40) находим гидравлический к. п. д.

$$\eta' = \frac{1}{\frac{a}{a}} \quad \frac{x}{1-x} = \frac{0{,}38}{0{,}62} \quad \frac{0{,}46}{0{,}54} = 0{,}52.$$

Далее

$$y^2 = \frac{(a-x)\,x}{-x} = \frac{0{,}16 \quad 0{,}46}{0{,}54} = 0{,}136,$$

и соответственная величина z по кривой EF для $a = 0{,}62$ будет $z = 0{,}046$.

Необходимый диаметр трубы, стало быть, равен

$$d = \left(\frac{q_0}{0{,}785}\right)^{0,4} z^{0,2} = (0{,}0407)^{0,4} \cdot (0{,}046)^{0,2} = 0{,}278 \cdot 0{,}54 = 0{,}150 \text{ м}.$$

Давление воздуха в башмаке

$$p_0 = p_a + \gamma_0 \quad h = 10333 + 81800 = 92133 \text{ кг/м}^2,$$

или

$$p_0 = 9{,}2 \text{ ат. абс. и } \frac{p_0}{p_a} = \sim 9.$$

При абсолютной температуре воздуха при входе в башмак $T_0' = 300°$ абс. удельный весовой расход его по формуле (45):

$$G = \frac{(1-x)\,h}{L_1' \quad x - h} = \frac{0{,}54 \cdot 81{,}8}{29{,}27 \cdot 300 \lg 9 \cdot 0{,}46 - 81{,}8} = 0{,}005$$

и объемный расход свободного воздуха

$$Q = G q_0 \gamma_0 v = 0{,}005 \quad 0{,}032 \quad 1000 \cdot 0{,}8 = 0{,}128 \text{ м}^3/\text{сек}$$

или 7,68 м³/мин.

Отношение

$$\frac{Q}{q_0} = \frac{0{,}128}{0{,}032} = 4.$$

Заметим, что для определения диаметра d мы могли бы воспользоваться также формулой (48′), в которой

$$A = \frac{q_0}{y} = \frac{0{,}032}{\sqrt{0{,}136}} = 0{,}0875$$

и приближенно

$$\lambda' = k \cdot z \quad y^2 = 4{,}9 \quad 0{,}046 \quad 0{,}136 = 0{,}0206,$$

стало быть получили бы

$$d = \left(\frac{\lambda'}{3}\right)^{0,2} \quad A^{0,4} = (0{,}007)^{0,2} \quad (0{,}0875)^{0,4} = 0{,}37 \quad 0{,}377 = \sim 0{,}140 \text{ м}.$$

Как и было указано в пункте 8-м, полученное значение менее действительного; если бы погрешность была оценена в 5%, то нужно было бы принять

$$d = 0{,}14 \quad 1{,}05 = 0{,}147 \sim 0{,}150 \text{ м}.$$

Таким образом, применение формулы (48′) дало бы тот же результат; однако для определения λ' пришлось бы воспользоваться эксплоатационной кривой, почему непосредственному определению диаметра по формуле (53) должно быть отдано предпочтение.

в) Установки для откачки

Так как в этих установках уровень шахтных вод постепенно падает, то убывает и значение коэфициента погружения a. Для нормальной работы эрлифта необходимо не допускать убывания этого коэфициента ниже $a = 0{,}45$ от начального его значения $a = \sim 0{,}75$. Так как указанным диапазоном значений a обычно не исчерпываются потребности откачки, то необходимо бывает применять периодическое наращивание подъемной трубы, соблюдая в каждом периоде те же пределы изменения степени погружения.

В шахтах, имеющих несколько затопленных водоотливных горизонтов, целесообразно применять комбинированную откачку с помощью эрлифта и стационарных насосов — несколькими этапами.

В первом этапе откачка ведется только с помощью эрлифта, до осушения первого водоотливного горизонта; после того во втором этапе выдача эрлифта переводится на этот горизонт, откуда откачивается на поверхность специально для сего устанавливаемыми в камере насосами, работающими на прежние ставы водоотливных труб.

Таких этапов может быть несколько, причем стационарные насосы последовательно переносятся на нижележащие горизонты.

Конечным этапом должна служить выдача эрлифта на предпоследний водоотливный горизонт, с погружением подъемной трубы в зумпф шахты, допуская при этом падение коэфициента a ниже 0,2.

На последнем горизонте устанавливаются уже насосы для нормального водоотлива, отвечающего притоку шахтных вод, а не те, которые служили для откачки вышележащих горизонтов. Для ускорения откачки в одном стволе может быть установлено два воздушных подъемника. В конце последнего этапа в таких случаях достаточно работы одного эрлифта, действующего с перерывами.

Для иллюстрации хода расчета приведем два численных примера: первый из них приурочен к первому этапу откачки, второй к концу последнего этапа.

Первый этап откачки. Этот этап должен обслуживать откачку до первого водоотливного горизонта, глубину которого под уровнем поверхности примем ~ 120 Выбор величин a и x для различных периодов рассматриваемого этапа должен удовлетворять ряду условий, из которых основными являются нижеследующие:

1) средняя производительность подъемника для всего этапа не должна быть ниже определенной заданной величины;

2) колебания производительности в пределах каждого периода не должны превышать отношения максимума к минимуму, равного 0,5;

3) давление и расход воздуха по возможности должны быть лимитированы;

4) число наращиваний подъемной трубы на протяжении этапа должно быть по возможности сокращено.

Исходя из этих условий, нами произведен расчет всех периодов первого этапа на заданную среднюю производительность откачки = 25 м³/мин, то-есть 1500 м³ в час на один подъемник, что при двух подъемниках составит 3000 м³ в час.

Результаты расчета сведены в таблицу 3.

На протяжении этапа предусмотрено пять периодов, то есть четыре наращивания подъемной трубы; расход свободного воздуха лимитирован объемом 150 м³/мин, при максимальном давлении 15 ат. абс.

Средняя производительность каждого из трех первых периодов составляет $0{,}5(36{,}0+18{,}6)=27{,}3$ м³/мин, четвертого — $0{,}5\,(27{,}36+17{,}94)=22{,}65$ м³/мин, пятого — $0{,}5\ (21{,}75+16{,}80)=19{,}27$ м³/мин, а для всего этапа в среднем

$$q_0=\frac{3\cdot27{,}3+22{,}65+19{,}27}{5}=24{,}76\sim25\ \text{м}^3/\text{мин}.$$

Самый порядок расчета мы изложим здесь лишь для начала и конца первого периода.

Для начала периода, задаваясь производительностью 36 м³/мин, или $q_0=0{,}6$ м³/сек, и высотой подъема $H_п=15$ м, принимаем $a=0{,}75$ и $x=0{,}67a=\sim0{,}5$; тогда находим высоту подъемной трубы

$$H\quad\frac{H_п}{1-a}=\frac{15}{0{,}25}=60\ \text{м}$$

и погружение

$$h=aH=0{,}75\quad60=45\ \text{м}.$$

Далее имеем

$$y^2=\frac{(a-x)\,x}{1-x}=\frac{0{,}25\quad0{,}5}{0{,}5}=0{,}25$$

и в соответствии с данными табл. 2, для точки 15, принимаем $z=\sim0{,}017$, откуда получаем необходимый диаметр подъемной трубы:

$$d=\left(\frac{q_0}{0{,}785}\right)^{0.4}z^{0.2}=\left(\frac{0{,}6}{0{,}785}\right)^{0,4}\cdot(0{,}017)^{0,2}$$

или

$$d=0{,}898\quad0{,}443=0{,}398\sim0{,}4\ \text{м}.$$

Давление воздуха

$$p_0=p_a+h\gamma_0=10333+45000=55333\ \text{кг/м}^2$$

Таблица 3

Наименование величины	1-й период		2-й период		3-й период		4-й период		5-й период	
	Начало	Конец	Начало	Конец	Начало	Конец	Начало	Конец	Начало	Конец
$H_п$ м	15	30	30	60	60	85,7	85,7	107	107	124,5
H м	60	60	120	120	171,4	171,4	214	214	249	249
a	0,75	0,5	0,75	0,5	0,65	0,5	0,6	0,5	0,57	0,5
h	45	30	90	60	111,4	85,7	128,4	107	141,9	124,5
x	0,5	0,3	0,5	0,3	0,5	0,3	0,45	0,33	0,41	0,33
y^2	0,25	0,085	0,25	0,085	0,155	0,085	0,123	0,083	0,111	0,083
z	0,117	0,064	0,017	0,064	0,017	0,064	0,030	0,070	0,048	0,070
$q_0 \frac{м^3}{мин}$	36,0	18,6	36,0	18,6	36,0	18,6	27,36	17,94	21,75	16,8
p_0 ат. абс	5,53	4,03	10,03	7,03	12,17	9,6	13,87	11,73	15,2	11,73
P_0/p_a	5,35	3,9	9,7	6,8	11,8	9,3	13,4	11,35	14,7	11,35
G	0,003	0,006	0,0045	0,0084	0,0052	0,010	0,007	0,0103	0,0088	0,01116
$Q \frac{м^3}{мин}$	86,4	89,3	130	125	150	148,8	153,2	147,3	152,25	157
	0,33	0,43	0,33	0,43	0,52	0,43	0,55	0,50	0,52	0,50

или

$$p_0 = 5{,}53 \text{ ат. абс.}$$

и

$$p_0/p_a = 5{,}35.$$

Удельный весовой расход воздуха,

$$G = \frac{(1-x)\,h}{xL_1' - h} = \frac{0{,}5 \cdot 45}{0{,}5 \cdot 29{,}27 \cdot 300 \lg 5{,}35 - 45} = 0{,}003$$

и объемный расход свободного воздуха

$$Q = 0{,}003 \quad 36 \cdot 1000 \quad 0{,}8 = 86{,}4 \text{ м}^3/\text{мин}.$$

Гидравлический к. п. д.

$$\eta' = \frac{1-a}{a} \cdot \frac{x}{1-x} = \frac{0{,}25}{0{,}75} \quad \frac{0{,}5}{0{,}5} = 0{,}33.$$

Для конца периода принимаем $a = 0{,}5$ и $x = 0{,}3$, находим

$$y^2 = \frac{0{,}2 \cdot 0{,}3}{0{,}7} = 0{,}085$$

и на основе кривой AB диаграммы $z - y^2$ имеем

$$z = 0{,}064,$$

откуда при данном диаметре трубы $d = 0{,}4$ м получаем производительность

$$q_0 = Fc_0 = F\sqrt{\frac{d}{z}}$$

или, так как

$$F = 0{,}785 \quad (0{,}4)^2 = 0{,}125 \text{ м}^2,$$

то

$$q_0 = 0{,}125\sqrt{\frac{0{,}4}{0{,}064}} = 0{,}31 \text{ м}^3/\text{сек},$$

то есть 18,6 м³/мин.
Далее находим

$$H_n = (1-a)\,H = 0{,}5 \quad 60 = 30 \text{ м},$$

$$h = aH = 0{,}5 \quad 60 = 30 \text{ м}$$

и аналогично предыдущему величины p_0, G, Q и η' Подобным же образом определяются элементы всех остальных периодов.

Конец последнего этапа. Разность высот между предпоследним и последним водоотливными горизонтами предположим равной 118 м, а погружение трубы в зумпф пусть будет 25 м; тогда высота подъемной трубы окажется равной

$$H = 118 + 25 = 143 \text{ м}$$

и коэфициент погружения

$$a = \frac{25}{143} = 0{,}175 \sim 0{,}18.$$

Степень разбавления возьмем

$$x = 0{,}7 \quad a = 0{,}7 \quad 0{,}18 = 0{,}126,$$

откуда

$$y^2 = \frac{(a-x)x}{1-x} = \frac{0{,}054 \cdot 0{,}126}{0{,}874} = 0{,}0078,$$

и в соответствии с пунктирной кривой точки 1 на диаграмме $z-y^2$ можем принять $z = 0{,}09$.

Заметим здесь кстати, что точка 1 на диаграмме является предельной, так как ее абсцисса $y^2 = 0{,}009$, определяемая значением $x = 0{,}09$, как раз отвечает максимуму параметра y^2, который имеет место при

$$x = 1 - \sqrt{1-a} = 1 - \sqrt{0{,}82} = 0{,}09.$$

Производительность при $z = 0{,}09$ будет

$$q_0 = 0{,}125 \sqrt{\frac{0{,}4}{0{,}09}} = 0{,}26 \text{ м}^3/\text{сек},$$

или 15,6 м³/мин.

Давление воздуха

$$p_0 = 10333 + 25000 = 35333 \text{ кг/м}^2$$

или 3,53 ат. абс. и

$$\frac{p_0}{p_a} = \frac{3{,}53}{1{,}03} = 3{,}43.$$

Удельный весовой расход воздуха

$$G = \frac{0{,}874 \cdot 25}{0{,}126 \cdot 29{,}27 \cdot 300 \lg 3{,}43 - 25} = 0{,}016,$$

объемный расход свободного воздуха

$$Q = 0{,}016 \quad 15{,}6 \quad 1000 \cdot 0{,}8 = 199{,}7 \sim 200 \text{ м}^3/\text{мин}.$$

При установке в одном стволе двух эрлифтов, в конце последнего этапа откачку пришлось бы вести с помощью одного лишь подъемника, так как производительность установки должна ограничиться нормальным притоком воды в шахте.

Из предыдущих расчетов вытекает, что при наличии двух подъемников может быть достигнута средняя производительность откачки в количестве 3000 т/час, при максимальном расходе свободного воздуха 300 м³/мин, для чего достаточно трех компрессоров с производительностью по 100 м³/мин; в конце откачки потребовалась бы работа лишь двух таких компрессоров.

III. Заключение

Изложенная в предыдущем теория, впервые приведшая к рассмотрению параметра λ' и к установлению безразмерных $kz - y^2$ характеристик, требует дальнейших исследований, как экспериментальных, так и теоретических.

В первую очередь возникает необходимость постановки специальных опытов для проверки самого факта существования безразмерных эксплоатационных характеристик эрлифта, так как использованный нами опытный материал для этого несомненно недостаточен.

Попутно подлежит экспериментальной проверке, вытекающий из нашей теории, вывод, что при разбавлении, равном погружению, производительность подъемника равна нулю; использованный нами опытный материал не дает прямого ответа на этот вопрос, косвенное подтверждение этого вывода можно видеть в том, что во всех рассмотренных нами установках мы имеем $x < a$.

Далее, детально должна быть изучена природа коэфициента λ' определяющих его параметров ψ', ψ и λ.

В частности, необходимо экспериментальным путем установить закон изменения скорости смеси при ее восхождении в подъемной трубе и дать аналитическое выражение как параметра ψ', так и всего коэфициента λ' Этим будет открыт путь к теоретическому обоснованию безразмерных характеристик и к окончательному построению теории эрлифта.

На современном этапе, однако, уже может быть допущено применение к расчету эрлифта эксплоатационных кривых, как это нами и сделано в настоящей работе.

Диаграмма $Z-y^2$

