

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА НА ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ЭРЛИФТА

Кононенко А.П., доц., канд. техн. наук, Козыряцкий Л.Н.,
доц., канд. техн. наук, Мизерный В.И., инженер,
Донецкий национальный технический университет

Определен целесообразный вид процесса изменения состояния рабочего тела в подъемной трубе эрлифта.

Expedient type of modification process of working medium in airlift stand-pipe is identified.

Газообразное рабочее тело, используемое в эрлифте, изменяет свое состояние по длине подъемной трубы.

Исходное состояние газообразного рабочего тела определяется давлением в смесителе

$$p_{см} = \rho gh + p_a \quad (1)$$

где ρ - плотность транспортируемой жидкости;

g - ускорение свободного падения;

h - геометрическое погружение смесителя;

p_a - атмосферное давление

и начальной температурой газа $T_{см}$. На выходе из подъемной трубы состояние рабочего тела определяется температурой $T_{вых}$ и давлением

$$p_{вых} = \Delta p_v + p_a, \quad (2)$$

где Δp_v - сопротивление газового тракта воздухоотделителя.

Величина совершаемой в подъемной трубе газообразным рабочим телом термодинамической и гидравлической работы зависит от вида процесса изменения его состояния при переходе из смесителя в воздухоотделитель. Гидравлические потери энергии при движении газожидкостной смеси в эрлифте также в большой степени являются функцией процесса изменения состояния газа, так как зависят от скорости аэрогидросмеси.

При высоте подъема H и глубине геометрического погружения h подача эрлифта Q_2 обеспечивается объемным расходом газообразного рабочего тела Q_2 плотностью ρ_2 при начальных условиях $p_{см}$ и

$T_{см}$. Плотность транспортируемой жидкости равна ρ , средняя плотность газожидкостного потока в подъемной трубе - $\rho_{гжк}$. Принимаем, что рабочим телом является идеальный газ.

В качестве критерия при определении оптимального процесса изменения состояния рабочего тела принимаем минимально возможную энергоемкость эрлифта.

Разница в значениях плотностей среды в подводящей и подъемной трубах создает движущий напор, величина которого определяется из соотношения

$$\Delta p_{дв} = \rho g h - \rho_{гжк} g (h + H) = g (h + H) (\rho \alpha - \rho_{гжк}),$$

где $\alpha = h / (H + h)$ - относительное погружение эрлифта.

Движущий напор в эрлифте расходуется на преодоление гидравлических потерь

$$\Delta p_{дв} = \sum \Delta p_{zn}, \quad (4)$$

которые можно представить как

$$\sum \Delta p_{zn} = \Delta p_{mn} + \Delta p_{под} + \Delta p_{тр} + \Delta p_{уск}, \quad (5)$$

где Δp_{mn} - потери на трение по длине подводящей трубы;

$\Delta p_{под}$ - гидравлические потери на входе, выходе и по длине подающей трубы;

$\Delta p_{тр}$ - потери напора в подъемной трубе;

$\Delta p_{уск}$ - потери на ускорение газожидкостного потока в подъемной трубе.

Потери по длине подводящей трубы, за счет увеличения ее диаметра или организации зумпфа, всегда возможно уменьшить до величины, которой можно пренебречь. Поэтому полагаем $\Delta p_{mn} = 0$.

Гидравлические потери напора в подающей трубе определяются выражением

$$\Delta p_{под} = a_{под} \rho g Q_z^2, \quad (6)$$

где $a_{под}$ - сопротивление подающей трубы.

Потери напора в подъемной трубе

$$\Delta p_{тр} = a_{тр} \rho_{гжк} g Q_{гжк}^2, \quad (7)$$

где $a_{тр}$ - сопротивление подъемной трубы;

$Q_{гжк}$ - средний объемный расход газожидкостной смеси в подъемной трубе.

Объемный расход газожидкостной смеси можно представить суммой

$$Q_{гжс} = Q_г + Q_{г.ср}, \quad (8)$$

где $Q_{г.ср}$ - средний объемный расход газообразного рабочего тела в подъемной трубе.

Величина $Q_{г.ср}$ определяется видом процесса изменения состояния рабочего тела в подъемной трубе эрлифта.

Средний расход газовой фазы в эрлифте равен

$$Q_{г.ср} = \frac{1}{P_{см} - P_{вых}} \int_{P_{вых}}^{P_{см}} Q_г dp. \quad (9)$$

При изотермическом ($n=1$, где n - показатель политропы) процессе расширения рабочего тела предыдущее выражение примет вид:

$$Q_{г.ср}^{из} = \frac{1}{P_{см} - P_{вых}} \int_{P_{вых}}^{P_{см}} \frac{Q_г P_{см}}{P} dp = \frac{Q_г P_{см}}{P_{см} - P_{вых}} \ln \frac{P_{см}}{P_{вых}}. \quad (10)$$

Для политропного процесса

$$\begin{aligned} Q_{г.ср}^{пол} &= \frac{1}{P_{см} - P_{вых}} \int_{P_{вых}}^{P_{см}} Q_г \left(\frac{P_{см}}{P} \right)^{\frac{1}{n}} dp = \\ &= \frac{n}{n-1} \frac{Q_г P_{см}}{P_{см} - P_{вых}} \left[1 - \left(\frac{P_{вых}}{P_{см}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

Соответственно для адиабатного процесса при $n = \kappa$ (κ - показатель адиабаты)

$$Q_{г.ср}^{ад} = \frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{Q_г P_{см}}{P_{см} - P_{вых}} \left[1 - \left(\frac{P_{вых}}{P_{см}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]. \quad (12)$$

При изохорном процессе $n = \pm\infty$ и

$$Q_{г.ср}^{изх} = \frac{1}{P_{см} - P_{вых}} \int_{P_{вых}}^{P_{см}} Q_г dp = Q_г = const. \quad (13)$$

Среднюю плотность газожидкостной смеси в подъемной трубе можно определить из выражения

$$\rho_{гжс} = \frac{Q_г \rho + Q_г \rho_г}{Q_г + Q_г}. \quad (14)$$

С учетом изложенного выражение для определения Δp_{mp} примет вид

$$\Delta p_{mp} = a_{mp} g (Q_3 \rho + Q_2 \rho_2) (Q_3 + Q_{2,cp}). \quad (15)$$

Потери напора на ускорение газожидкостного потока в подъемной трубе

$$\Delta p_{уск} = (Q_3 \rho + Q_2 \rho_2) (v_{вых} - v_{вх}) \frac{4}{\pi D^2}, \quad (16)$$

где $v_{вх}$ - скорость потока на входе в трубу;

$v_{вых}$ - скорость потока на выходе из трубы;

D - диаметр подъемной трубы.

Скорости потока на входе и выходе из подъемной трубы соответственно равны:

$$v_{вх} = \frac{4(Q_3 + Q_2)}{\pi D^2}, \quad (17)$$

$$v_{вых} = \frac{4(Q_3 + Q_{2,вых})}{\pi D^2}. \quad (18)$$

Выражение (16) с учетом (17) и (18) примет вид

$$\Delta p_{уск} = (Q_3 \rho + Q_2 \rho_2) (Q_{2,вых} - Q_2) \frac{16}{\pi^2 D^4}, \quad (19)$$

где

$$Q_{2,вых} = Q_2 \left(\frac{P_{см}}{P_{вых}} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (20)$$

Подставив в уравнение (4) выражения (3), (6), (15) и (19) с учетом (14), получим

$$g(h + H) \left(\rho \alpha - \frac{Q_3 \rho + Q_2 \rho_2}{Q_3 + Q_{2,cp}} \right) = a_{под} \rho g Q_3^2 + (Q_3 \rho + Q_2 \rho_2) x \left[a_{mp} g (Q_3 + Q_{2,cp}) + (Q_{2,вых} - Q_2) \frac{16}{\pi^2 D^4} \right]. \quad (21)$$

Баланс энергии при прочих равных условиях является функцией вида процесса изменения состояния рабочего тела в подъемной трубе. К анализу принимаем варианты изменения состояния рабочего тела в эрлифте с показателем политропы $1 \leq n \leq \infty$, как имеющими место в данных условиях.

Уравнение (21) решено численным методом для условий, близких к условиям промышленного использования эрлифтных установок в системах гидрозолошлакоудаления тепловых электростанций. Решение приведено в виде графической зависимости

$$\frac{Q_{эн}}{Q_{э[n=1]}} = f(n), \quad (22)$$

где $Q_{эн}$ - подача эрлифта при изменении состояния рабочего тела в подъемной трубе по политропному процессу с показателем политропы n ;

$Q_{э[n=1]}$ - подача эрлифта при изменении состояния рабочего тела в подъемной трубе по изотермическому процессу ($n = 1$).

Величина начального объемного расхода рабочего тела Q_2 , приведенная к условиям $p_{см}$ и $T_{см}$, принята постоянной для всех рассмотренных процессов изменения состояния газа в эрлифте в пределах каждой из анализируемых длин подъемной трубы $H + h$.

К анализу приняты решения при $H + h = 20-40$ м, так для более значительных длин подъемных труб обеспечить изохорный процесс изменения состояния рабочего тела по всей длине эрлифта приемлемыми способами не представляется возможным.

При значениях $A \leq \alpha \leq 0,5$ (где для $H + h = 40$ м $A = 0,175$, для $H + h = 30$ м $A = 0,185$, для $H + h = 20$ м $A = 0,190$) во всех принятых к рассмотрению случаях наиболее целесообразными по экономичности являются процессы с показателями политропы $n \rightarrow \infty$, т.е. когда вид изменения состояния рабочего тела в подъемной трубе стремится к изохорному процессу.

При $0,1 \leq \alpha < A$ наибольшая подача эрлифта, при прочих равных условиях, соответствует изотермическому процессу.

Физически это объясняется соотношением влияния степени расширения рабочего тела в подъемной трубе эрлифта на величины потерь энергии и движущего напора в эрлифте.

При $A \leq \alpha \leq 0,5$ преобладающим в энергетическом балансе оказывается влияние потерь энергии. Поэтому наиболее экономичными являются режимы при изменении состояния рабочего тела, близком к изохорному.

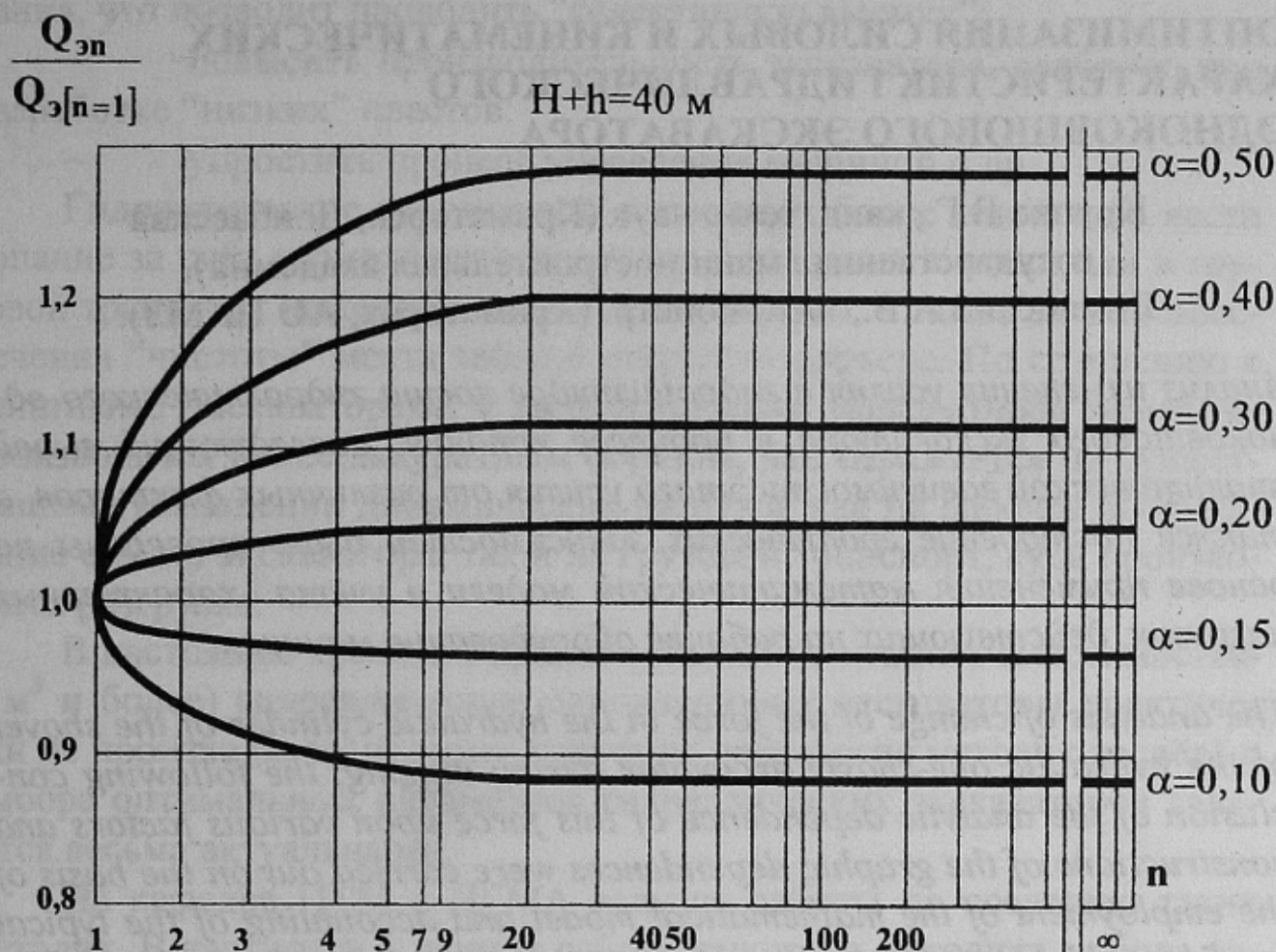


Рисунок - Влияние вида процесса изменения состояния рабочего тела в подъемной трубе на энергоемкость эрлифта

При $0,1 \leq \alpha < A$, вследствие меньших степеней изменения давления по длине подъемной трубы, определяющим фактором является движущий напор. А он, как известно, зависит от плотности газожидкостного потока, т.е. от среднего объемного расхода газовой фазы в эрлифте. Наибольший, в данных условиях, средний объемный расход по длине подъемной трубы обеспечивает изотермический закон изменения состояния рабочего тела, который и является при $0,1 \leq \alpha < A$ наиболее экономичным.

Исходя из опыта применения эрлифтных установок в гидротранспортных и водоотливных системах, практический интерес представляют установки с относительным погружением $\alpha = 0,2$. Для этих условий наиболее энергетически целесообразными процессами изменения состояния газовой фазы в эрлифте являются близкие к изохорным.