

А.П. Кононенко

ДАВЛЕНИЯ И МОЩНОСТИ КОЛЬЦЕВОГО ВОДОВОЗДУШНОГО ПОТОКА В ПОДЪЕМНОЙ ТРУБЕ ЭРЛИФТА

Приведено решение математической модели рабочего процесса эрлифта с кольцевой структурой водовоздушного потока, позволяющее определять, в том числе, давления и мощности газожидкостной смеси в вертикальной подъемной трубе. Рис. 4, Ист. 11.

1. Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Сокращение непроизводительных энергетических расходов в эрлифте является одной из приоритетных задач на пути их совершенствования и предполагает возможность количественной оценки распределения подведенной к аппарату мощности. Такой анализ необходимо иметь в широком диапазоне режимов работы эрлифта для каждой из структур газожидкостной смеси, имеющих место в вертикальных подъемных трубах. Одной из часто реализуемых в эрлифтах является кольцевая структура водовоздушной смеси.

Поэтому количественный анализ распределения давлений и мощностей кольцевого водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта является актуальной научной и практической задачей.

2. Анализ исследований и публикаций. Экспериментальный количественный анализ полного перепада давлений на участке вертикальной трубы и его составляющих, обусловленных трением, расширением газовой фазы и гидростатической составляющей газожидкостного потока приведен в [1] при условиях постоянных расходов воды для каждой серии опытов и изменении расходов воздуха в широких диапазонах.

Отличием характеристик водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта от рассмотренного в [1] является то, что в эрлифт принудительно подается один компонент – сжатый воздух. Расход лифтируемой жидкости в подъемной трубе при изменении расхода воздуха устанавливается в зависимости от конструктивных и технологических особенностей эрлифта – диаметра и длины трубы, погружения смесителя и др. Поэтому представление результатов анализа распределения давлений водовоздушного потока в виде, предложенном в [1], для условий газожидкостного подъемника не является приемлемым.

Анализ мощностей потоков в эрлифте в [2, 3] выполняется при рассмотрении внешней задачи – определении полезных и затрачиваемых составляющих как правило в одном, оптимальном, режиме работы подъемника без оценки изменения этих составляющих при изменении расхода воздуха. Такой подход ограничивает возможности количественного энергетического анализа эрлифта в широком диапазоне режимов его работы.

Выполненные исследования распределения энергетических параметров снородных и эмульсионных водовоздушных потоков в газожидкостных подъемниках [4, 5] также требуют дополнения аналогичными исследованиями для кольцевой структуры двухфазной смеси на основе математической модели рабочего процесса эрлифта [6].

3. Постановка задачи. На основе разработанной математической модели рабочего процесса эрлифта с кольцевой структурой газожидкостной смеси

выполнить количественный анализ распределения давлений и мощностей водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта в широком диапазоне изменений расходов сжатого воздуха.

4. Изложение материала и результаты. Уравнение движения кольцевого восходящего водовоздушного потока в вертикальной подъемной трубе эрлифта возможно преобразовать к выражению [6]

$$p_{cm} \frac{z_i}{H+h} = \frac{2\pi \cdot R}{\omega} \int_0^{z_i} \tau_w(z) \cdot dz + \frac{1}{\omega} \left\{ \rho_c(z) \cdot [w_c(z)]^2 \cdot \omega_c(z) + \rho' \cdot [w'_f(z)]^2 \cdot \omega_f(z) \right\} \Big|_0^{z_i} + \frac{g}{\omega} \left[\int_0^{z_i} \rho_c(z) \cdot \omega_c(z) \cdot dz + \rho' \int_0^{z_i} \omega_f(z) \cdot dz \right], \quad (1)$$

которое, в свою очередь, для участка подъемной трубы длиной z_i ($0 \leq z_i \leq H+h$) зачастую представляют в виде баланса давлений

$$p_{\Sigma i} = p_{mpi} + p_{yuki} + p_{gi}, \quad (2)$$

где p_{cm} – избыточное давление в смесителе; H – высота подъема эрлифта; h – геометрическое погружение смесителя; z_i – расстояние от смесителя до рассматриваемого сечения подъемной трубы; R – радиус подъемной трубы; ω , $\omega_c(z)$, $\omega_f(z)$ – площадь соответственно поперечного сечения подъемной трубы, гомогенного ядра газожидкостного потока и пристенной жидкостной пленки; $\tau_w(z)$ – касательное напряжение на стенке трубы; ρ' , $\rho_c(z)$ – плотность соответственно воды и гомогенного ядра газожидкостного потока; $w_c(z)$, $w'_f(z)$ – скорость соответственно гомогенного ядра газожидкостного потока и воды в пристенной пленке; g – ускорение свободного падения; $p_{\Sigma i}$ – суммарный перепад давления на участке подъемной трубы длиной z_i ; p_{mpi} , p_{yuki} , p_{gi} – перепады давления на участке подъемной трубы длиной z_i , обусловленные соответственно трением, ускорением и силой тяжести.

Средний объемный расход водовоздушной смеси на участке трубы длиной z_i [6]

$$Q_{cpi} = \frac{W_\theta + W_\vartheta}{z_i} \int_0^{z_i} \frac{dz}{\varphi^*(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \varphi^*(z)] \cdot \rho'}, \quad (3)$$

где W_θ , W_ϑ – массовый расход соответственно воздуха и воды (массовая подача эрлифта); $\varphi^*(z)$ – расчетное газосодержание водовоздушного потока в подъемной трубе; $\rho''(z)$ – плотность воздуха.

Суммарная мощность $N_{\Sigma i}$, а также ее составляющие – мощности, необходимые для компенсации потерь на трение N_{mpi} , ускорение N_{yuki} и гравитационную составляющую N_{gi} при движении водовоздушного потока по участку вертикальной подъемной трубы длиной z_i , определяются как произведение среднего объемного расхода Q_{cpi} на соответствующий перепад давлений $p_{\Sigma i}$, p_{mpi} , p_{yuki} и p_{gi} . Суммарная подведенная мощность N_{nodi} и мощности,

подведенные потоком воды N' и сжатого воздуха N_i'' , определяются по общеизвестным соотношениям [2, 3]. Мощность, необходимая для компенсации потерь на скольжение N_{cki} для кольцевой структуры потока определяется разностью $N_{nodi} - N_{\Sigma i}$.

Решение полученных уравнений численным методом на ПЭВМ при помощи разработанной программы позволяет определять, в том числе, изменение давлений – суммарного $p_{\Sigma i}$, обусловленного трением p_{mpi} , ускорением p_{ycki} и силой тяжести p_{gi} и мощностей – суммарной $N_{\Sigma i}$, компенсирующей затраты на трение N_{mpi} , ускорение N_{ycki} , скольжение N_{cki} , преодоление силы тяжести N_{gi} , а также подведенной потоком воды N' , сжатого воздуха N_i'' и суммарной подведенной N_{nodi} в зависимости от расхода воздуха Q_e и по высоте подъемной трубы.

Адекватность разработанной математической модели рабочего процесса эрлифта с кольцевой структурой водовоздушного потока подтверждается удовлетворительной сходимостью расчетных и экспериментальных расходных характеристик подъемников [7].

Анализ распределения давлений и мощностей водовоздушного потока с кольцевой структурой выполнен на примере эрлифта с подъемной трубой диаметром $D = 150$ мм, длиной $H+h = 11,7$ м, подающей трубой $d = 30$ мм и длиной $l = 460$ мм при геометрическом погружении смесителя $h = 2,4$ м (относительное геометрическое погружение смесителя $\alpha = 0,205$) [8]. Реализация устойчивой кольцевой структуры двухфазного потока в режиме максимальной подачи и прилегающих к нему режимах работы рассматриваемого эрлифта подтверждается картой кризисных состояний водовоздушного потока [7, 9].

Принято допущение правомерности использования математической модели рабочего процесса эрлифта с кольцевой структурой водовоздушного потока во всем рассматриваемом диапазоне изменения расходов воздуха, количественные расчеты произведены при постоянном давлении в смесителе « p -const», равном экспериментально измеренному $p_{cm} = 0,152$ кгс/см² (14,9 кПа) [8].

При построении безразмерной расчетной расходной характеристики газожидкостного подъемника в качестве базисных были приняты значения расходов воздуха и подачи эрлифта в режиме максимальной подачи $Q_{e, макс} = 19,2$ м³/мин (0,32 м³/с), $Q_{\Sigma, макс} = 7,20$ м³/ч (0,002 м³/с) (рис. 1).

Перепад давления на подъемной трубе (избыточное давление в смесителе) при принятой модели расчета « p -const» составляет $p_{\Sigma} = p_{cm} = 0,152$ кгс/см² (14,9 кПа), величина которого и была принята в качестве базисной для графика изменения относительных давлений водовоздушной смеси в эрлифте (рис. 2). Относительное давление, обусловленное силой тяжести, в режиме максимальной подачи составляет $\bar{p}_g \approx 0,965$ от суммарного перепада давления на подъемной трубе p_{Σ} , обусловленное трением – $\bar{p}_{mp} \approx 0,021$, обусловленное ускорением – $\bar{p}_{yck} \approx 0,014$.

Интенсивность изменения составляющих \bar{p}_g , \bar{p}_{mp} , \bar{p}_{yck} относительного суммарного перепада давления \bar{p}_{Σ} в рассматриваемом диапазоне изменения

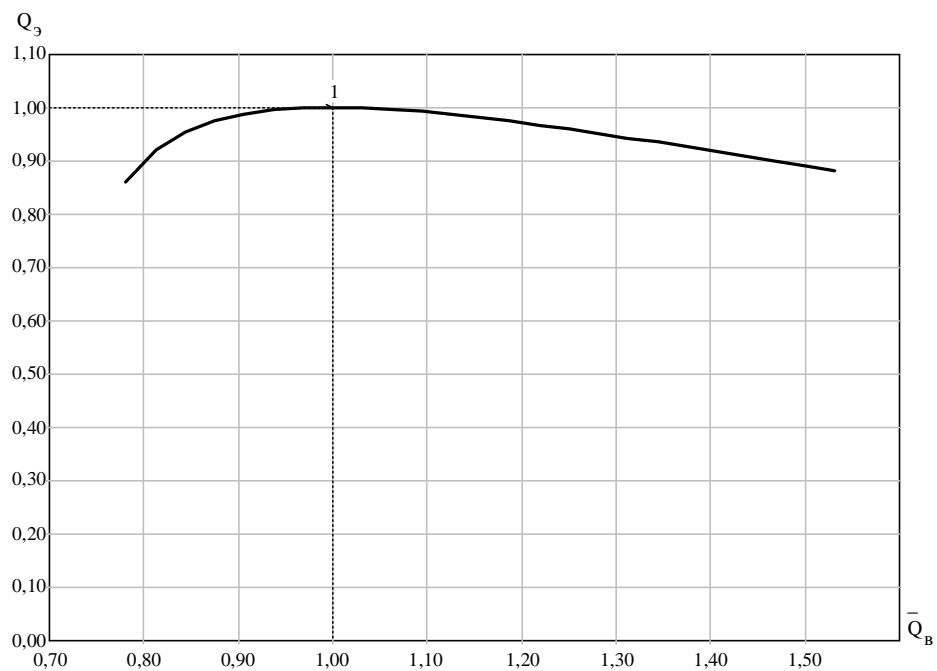


Рис. 1. Безразмерная расходная характеристика эрлифта $D = 150$ мм, $H+h = 11,7$ м, $d = 30$ мм, $l = 460$ мм, $h = 2,4$ м, $\alpha = 0,205$ [базисные значения $Q_e = 19,2$ м³/мин (0,32 м³/с), $Q_3 = 7,20$ м³/ч (0,002 м³/с)]

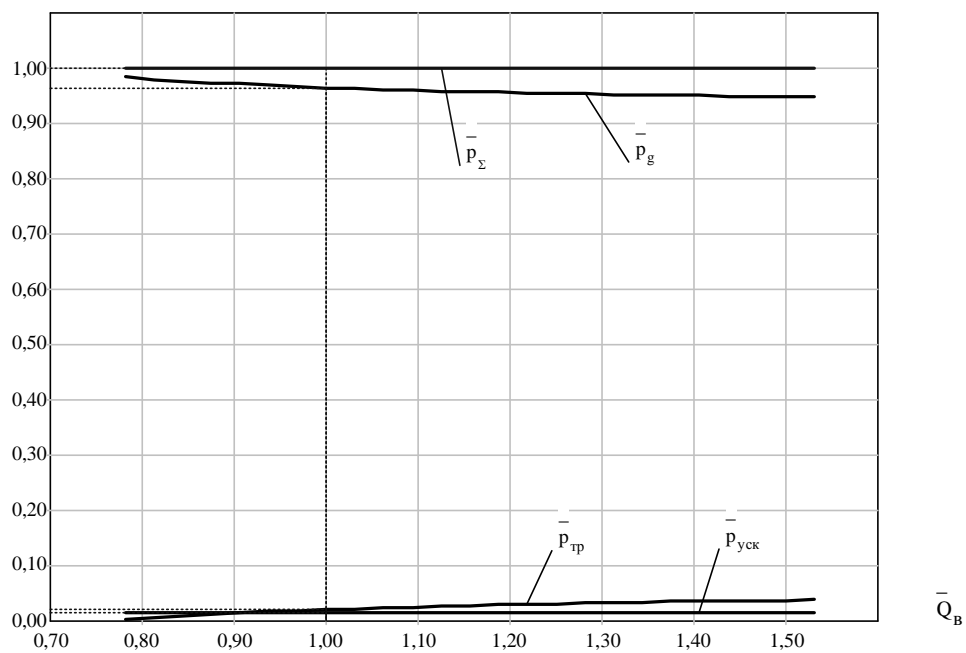


Рис. 2. Изменение относительных давлений в эрлифте $D = 150$ мм, $H+h = 11,7$ м, $d = 30$ мм, $l = 460$ мм, $h = 2,4$ м, $\alpha = 0,205$ [базисные значения $Q_e = 19,2$ м³/мин (0,32 м³/с), $p_с = 0,152$ кгс/см² (14,9 кПа)]

относительных расходов воздуха $\bar{Q}_g \approx 0,8 \div 1,5$ незначительная, что можно объяснить и достаточно постоянной, для данных условий, относительной подачей эрлифта $\bar{Q}_g \approx 0,9 \div 1,0$.

Мощность, подведенная к подъемной трубе в режиме максимальной подачи эрлифта [при расходе воздуха $Q_g = Q_{g, \text{макс}} = 19,2 \text{ м}^3/\text{мин}$ ($0,32 \text{ м}^3/\text{с}$)] составляет $N_{\text{под}} = 4,47 \text{ кВт}$. В свою очередь эта мощность складывается из мощности воздушного потока $N'' = 4,44 \text{ кВт}$ и мощности потока воды $N' = 0,03 \text{ кВт}$, что составляет $\bar{N}'' \approx 0,993$ и $\bar{N}' \approx 0,007$ от значения $N_{\text{под}} = 4,47 \text{ кВт}$, принятого в качестве базисного для графиков относительных мощностей (рис. 3, 4).

Подведенная мощность $N_{\text{под}} = 4,47 \text{ кВт}$, имеющая место при расходе воздуха $Q_{g, \text{макс}} = 19,2 \text{ м}^3/\text{мин}$ ($0,32 \text{ м}^3/\text{с}$), расходуется на:

- преодоление силы тяжести $N_g = 0,274 \text{ кВт}$, что составляет $\bar{N}_g \approx 0,061$ от подведенной мощности $N_{\text{под}}$ (рис. 4);

- компенсацию потерь на трение $N_{\text{тр}} = 0,006 \text{ кВт}$, $\bar{N}_{\text{тр}} \approx 0,0013$;

- компенсацию потерь на ускорение $N_{\text{уск}} = 0,004 \text{ кВт}$, $\bar{N}_{\text{уск}} \approx 0,0009$;

- компенсацию потерь на скольжение $N_{\text{ск}} = 4,19 \text{ кВт}$, $\bar{N}_{\text{ск}} \approx 0,937$.

Таким образом, в режиме максимальной подачи эрлифта относительные суммарные расходы мощности $\bar{N}_\Sigma = \bar{N}_g + \bar{N}_{\text{тр}} + \bar{N}_{\text{уск}}$ составляют около $\sim 6\%$, оставшиеся $\sim 94\%$ от относительной подведенной мощности $\bar{N}_{\text{под}}$ расходуются на компенсацию относительных потерь на скольжение $\bar{N}_{\text{ск}}$. Причем, примерно такое же соотношение в распределении мощностей сохраняется во всем рассматриваемом диапазоне изменения относительных расходов воздуха $\bar{Q}_g \approx 0,8 \div 1,5$.

Аналогичное выше приведенному распределение давлений и мощностей водовоздушных потоков в подъемных трубах получено и для других эрлифтов, работающих в режиме максимальной подачи с кольцевой структурой двухфазной смеси. Количественный анализ гидродинамических параметров водовоздушной смеси выполнен для эрлифтов с подъемными трубами диаметрами $D = 100 \div 250 \text{ мм}$, длинами $H+h = 11,7 \div 31,2 \text{ м}$ и геометрическими погружениями смесителей $h = 1,28 \div 4,32 \text{ м}$ (относительные геометрические погружения $\alpha = 0,070 \div 0,205$) [8, 10, 11].

Как следует из результатов расчетов для подъемных труб диаметрами $D = 100 \div 250 \text{ мм}$ в режиме максимальной подачи эрлифта при кольцевой структуре водовоздушного потока относительное давление, обусловленное ускорением, составляет $\bar{p}_{\text{уск}} < 3\%$. Остальное значение суммарного перепада давления на подъемной трубе p_Σ распределяется между составляющими давлений, обусловленными силами тяжести p_g и трения $p_{\text{тр}}$ в пропорциях, достоверно классифицировать которые сложно из-за ограниченного числа анализируемых примеров.

Соответственно относительная мощность, расходуемая на компенсацию потерь на скольжение для рассмотренных случаев находится в пределах $\bar{N}_{\text{ск}} = 75 \div 95\%$, а оставшаяся часть подведенной мощности расходуеться на преодоление силы тяжести \bar{N}_g , компенсацию потерь на трение $\bar{N}_{\text{тр}}$ и компенсацию потерь на ускорение $\bar{N}_{\text{уск}}$.

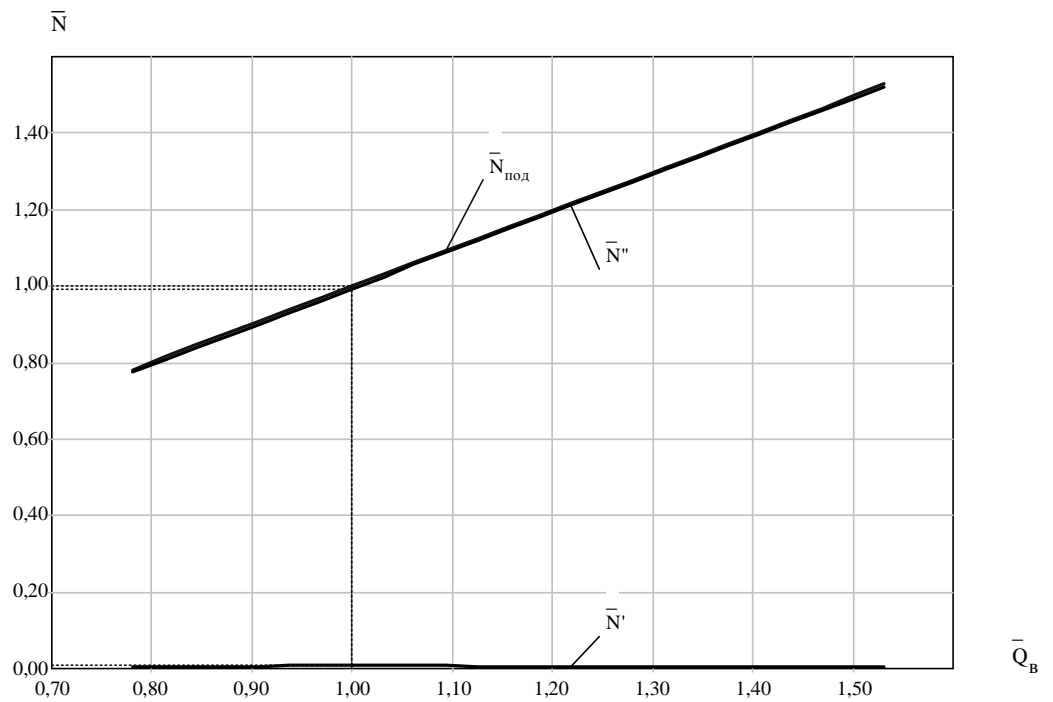


Рис. 3. Изменение относительных подводенных мощностей в эрлифте $D = 150$ мм, $H+h = 11,7$ м, $d = 30$ мм, $l = 460$ мм, $h = 2,4$ м, $\alpha = 0,205$ [базисные значения $Q_{\text{б}} = 19,2$ м³/мин (0,32 м³/с), $N_{\text{под}} = 4,47$ кВт]

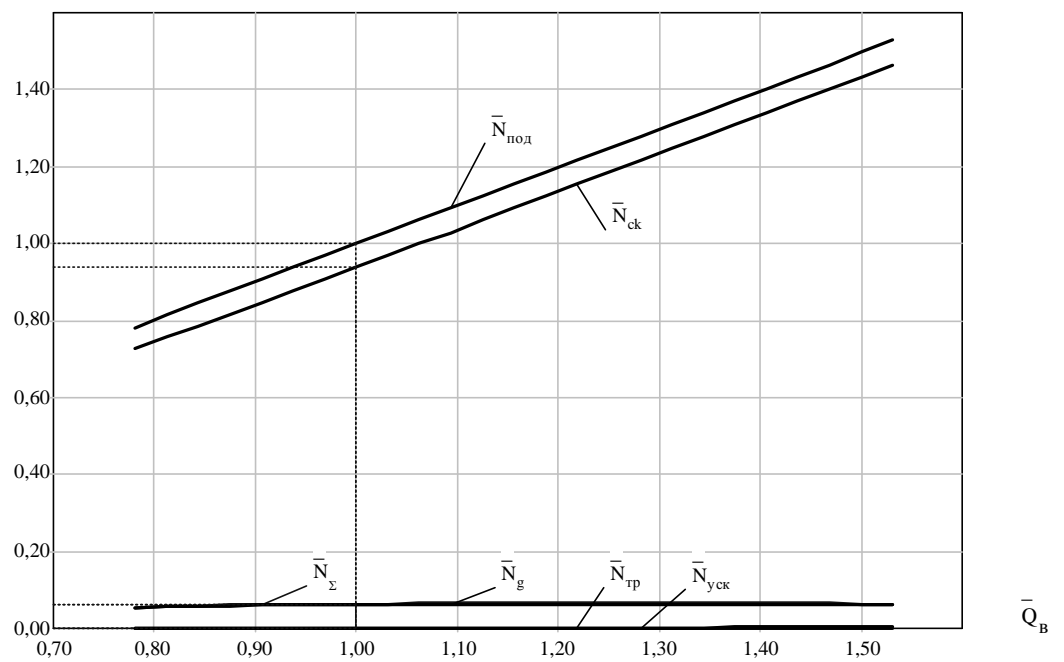


Рис. 4. Изменение относительных мощностей в эрлифте $D = 150$ мм, $H+h = 11,7$ м, $d = 30$ мм, $l = 460$ мм, $h = 2,4$ м, $\alpha = 0,205$ [базисные значения $Q_{\text{б}} = 19,2$ м³/мин (0,32 м³/с), $N_{\text{под}} = 4,47$ кВт]

5. **Выводы и направление дальнейших исследований.** Впервые для эрлифтов с подъемными трубами диаметрами $D = 100\div 250$ мм получены количественные распределения давлений и мощностей кольцевого водовоздушного потока в режиме максимальной подачи эрлифта. Показано, что относительная мощность, расходуемая на компенсацию потерь на скольжение, находится в пределах $\bar{N}_{ск} = 75\div 95\%$. Оставшаяся часть подведенной мощности расходуется на преодоление силы тяжести \bar{N}_g , компенсацию потерь на трение $\bar{N}_{тр}$ и компенсацию потерь на ускорение $\bar{N}_{уск}$.

Сравнительный анализ распределения давлений и мощностей водовоздушных потоков при имеющих место в подъемной трубе эрлифта снарядной, эмульсионной и кольцевой структурах течения позволит установить наиболее энергетически целесообразные режимы и разработать рекомендации по совершенствованию газожидкостных подъемников.

Список литературы

1. Арманд А.А. Исследование механизма движения двухфазной смеси в вертикальной трубе // Сб.: Гидродинамика и теплообмен при кипении в котлах высокого давления. - Изд-во АН СССР. - 1955. - С. 21-34.
2. Эрлифтные установки: Учебное пособие. - В.Г. Гейер, Л.Н. Козыряцкий, В.С. Пащенко, Я.К. Антонов – Донецк: ДПИ, 1982. – 64 с.
3. Папаяни Ф.А., Козыряцкий Л.Н., Пащенко В.С., Кононенко А.П. Энциклопедия эрлифтов. - М.: Информсвязиздат, 1995. – 592 с.
4. Кононенко А.П. Тиски та потужності снарядного водоповітряного потоку в піднімальній трубі ерліфта // Науковий журнал «Вісник ДонДУЕТ». Серія "Технічні науки". - Донецьк: ДонДУЕТ. - №1(29). – 2006. - С. 20-30.
5. Бойко Н.Г., Кононенко А.П. Энергетические параметры водовоздушного потока в эрлифте с эмульсионной структурой смеси // Наукові праці ДНТУ. Серія: "Гірничо-електромеханічна". Випуск 12 (113). - Донецьк: ДонНТУ. – 2006. - С. 17-32.
6. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта с кольцевой структурой водовоздушного потока // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. - Харків: НТУ "ХПІ". - №27. – 2006. - С. 113-121.
7. Кононенко А.П. Расчетные характеристики эрлифта с кольцевой структурой водовоздушной смеси // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков: ХПИ. -№5/1 (23). – 2006. - С. 58-61.
8. Кононенко А.П. Ограничения в подаче эрлифта. Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури // Збірник наукових праць: «Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва», Випуск 2005-7(55). – Макіївка: ДНАБА. – 2005. - С.71-81.
9. Кононенко А.П. Структуры двухфазных потоков в подъемных трубах эрлифтов // Вісник Сумського державного університету. Серія - Технічні науки. – Суми: СДУ. - №12. – 2005. - С. 38-48.
10. Костанда В.С. Исследование и разработка эрлифтных и углесосно-эрлифтных подъемов гидрошахт: Дисс. ... канд. техн. наук. - Донецк: ДПИ, 1963: том 1 – 209 с., том 2 – 140 с.
11. Малыгин С.С. Применение эрлифтов для водоотлива шахт: Дисс. ... канд. техн. наук. - Донецк: ДПИ, 1966. – 264 с.