

А.П. КОНОНЕНКО, д-р техн. наук, профессор, ДонНТУ, Донецк;
М.Ю. КАРПУШИН, аспирант, ДонНТУ, Донецк

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭРЛИФТА С ПОДВОДОМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРИТОКА В ПРОМЕЖУТОЧНОЕ СЕЧЕНИЕ ПОДЪЕМНОЙ ТРУБЫ

Запропоновані методики подання і розрахунку характеристик ерліфта з підведенням додаткової притоки в проміжний перетин піднімальної труби на основі чисельного розв'язання розробленої математичної моделі робочого процесу газорідного підйомника.

Предложены методики представления и расчета характеристик эрлифта с подведением дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы на основе численного решения разработанной математической модели рабочего процесса воздушножидкостного подъемника.

The methods of presentation and calculation of the airlift characteristics with the input of the additional inflow into the lifting pipe intermediate section have been offered. They are based on the numerical solution of the developed mathematical model of the gas-liquid lift operation process.

1 Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Успешные проектирование, наладка и эксплуатация гидравлических машин и аппаратов требует наличия их достоверных технических характеристик. Характеристики серийно производимых гидравлических машин (насосов, компрессоров, вентиляторов) получают, как правило, экспериментальным путем на стендах заводов-изготовителей. В отношении эрлифтов такой метод не является рациональным ввиду их индивидуального проектирования под конкретны условия применения, что требует разработки аналитических методов построения характеристик газожидкостных подъемников.

Отличием характеристик эрлифтов с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы от характеристик традиционных газожидкостных подъемников является необходимость наглядного представления зависимости подачи эрлифта, как суммы основного и дополнительного притоков жидкости (гидросмеси), от основного и дополнительного расходов сжатого воздуха, или, что более правомерно, от суммарного энергопотребления.

Поэтому разработка методики представления и расчета расходных характеристик эрлифтов с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы является актуальной задачей, имеющей научное и практическое приложение.

2 Анализ исследований и публикаций. При переменных притоках жидкости (гидросмеси) в ряде случаев энергетически целесообразно использование эрлифтов с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы [1]. Кроме снижения энергетических затрат при транспортировании переменных во времени притоков, предложенная эрлифтная установка (рис. 1) исключает необходимость использования запорных устройств в потоке абразивной гидросмеси.

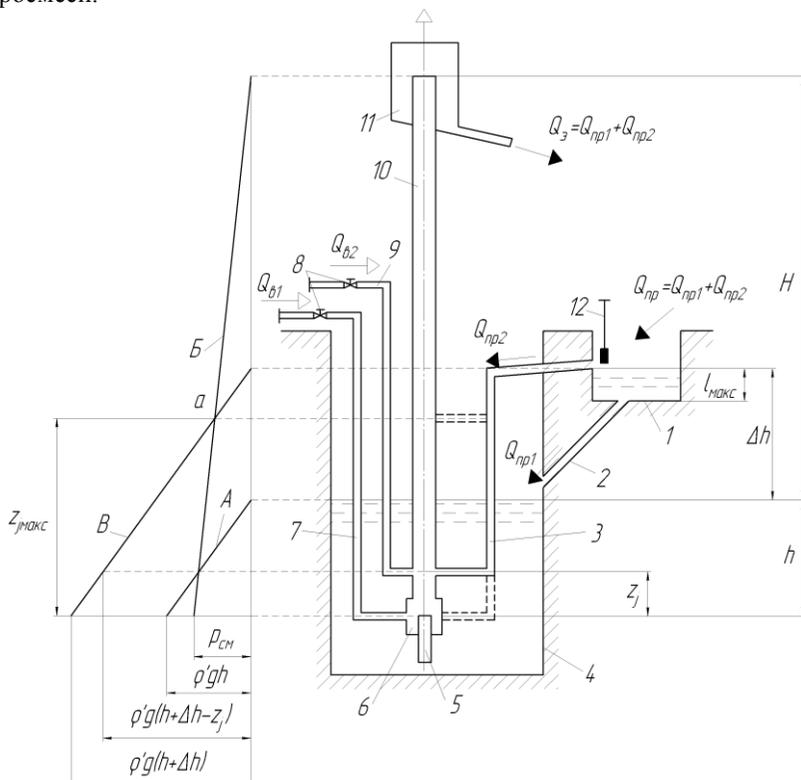


Рисунок 1 – Схема эрлифтной установки с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы: 1 – приемная емкость; 2 – основной подводящий трубопровод; 3 – дополнительный подводящий трубопровод; 4 – зумпф; 5 – подающая труба; 6 – смеситель; 7 – основной воздухопровод; 8 – задвижки; 9 – дополнительный воздухопровод; 10 – подъемная труба; 11 – воздухоотделитель; 12 – запорное устройство; A – эпюра давления жидкости (гидросмеси) в зумпфе 4; B – эпюра давления газожидкостной смеси (аэрогидросмеси) в подъемной трубе 10; B – эпюра давления жидкости (гидросмеси) в дополнительном подводящем трубопроводе 3

Базовый приток $Q_{пр1}$ подается в эрлифт через подающую трубу 5, а дополнительный приток $Q_{пр2}$ – через дополнительный подводящий трубопровод 3. Если $Q_{пр2} = 0$, то подача эрлифта составляет $Q_3 = Q_{пр1}$ и потребный расход воздуха $Q_{в1}$ подается в смеситель 6 через основной воздухопровод 7. Если приток жидкости (гидросмеси) увеличивается и подача эрлифта составляет величину $Q_3 = Q_{пр1} + Q_{пр2}$, расход воздуха может быть увеличен до значения $Q_в = Q_{в1} + Q_{в2}$ с подводом дополнительного количества сжатого воздуха $Q_{в2}$ через дополнительный воздухопровод 9. Также увеличение расхода воздуха в эрлифт возможно за счет обеспечения подвода его большего количества через основной воздухопровод 7 при закрытой задвижке 8 на дополнительном воздухопроводе 9. Выбор варианта воздухообеспечения эрлифта определяется по критерию минимальной энергоемкости газожидкостного подъемника.

Вертикальная координата z_j промежуточного сечения подъемной трубы 10, где возможно осуществление подвода дополнительного притока $Q_{пр2}$, не может превышать уровня точки a (точки пересечения эпюр B и B'), то есть величины $z_{j\max}$.

Известны методы представления и расчета расходных характеристик традиционных эрлифтов как эмпирическим [2 – 6], так и аналитическим [7 – 9] способами.

Метод построения расходных характеристик эрлифта на основе безразмерных зависимостей [2 – 6] обеспечивает приемлемую точность количественных соотношений между расходом воздуха и подачей воды при заданных геометрических и технологических параметрах эрлифта, однако, будучи эмпирическим, исключает возможность его использования для анализа физических процессов лифтирования жидкости сжатым газом.

Разработанные математические модели рабочих процессов эрлифтов со снарядной [10], эмульсионной [11] и кольцевой [12] структурами водовоздушных потоков в подъемных трубах эрлифтов позволили, в том числе, получить соответствующие аналитические методики расчета расходных характеристик эрлифтов [7 – 9].

Однако не разработана методика представления расходных характеристик эрлифтов и способы их расчетов при работе газожидкостного подъемника в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси) и подводе дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы. Основой для решения указанной научной задачи является полученная математическая модель рабочего процесса эрлифта в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси) [1].

3 Постановка задачи. На основе разработанной математической модели рабочего процесса газожидкостного подъемника в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси) разработать методики представления и расчета расходных характеристик эрлифта с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы.

4 Изложение материала и результаты. Расходные характеристики эрлифта, конструкция которого предполагает возможность высокоэффективной работы в условиях переменных притоков (рис. 1), могут быть получены решением уравнения стационарного восходящего движения двухкомпонентной водовоздушной смеси в вертикальной подъемной трубе с учетом дополнительных количеств жидкости (гидросмеси) и воздуха, подводимых в ее промежуточное сечение [1]

$$-\frac{dp(z)}{dz} = \frac{4\tau_w(z)}{D} + \frac{d}{dz}\{G''(z) \cdot w''(z) \cdot \varphi(z) + G'(z) \cdot w'(z) \cdot [1 - \varphi(z)]\} + \rho_{см}(z) \cdot g,$$

где z – расстояние от смесителя до рассматриваемого сечения подъемной трубы; $p(z)$ – давление газожидкостной смеси; τ_w – касательное напряжение на стенке подъемной трубы; D – диаметр подъемной трубы; $G'(z)$ и $G''(z)$ – массовые скорости жидкой и газообразной фаз соответственно; $w'(z)$ – истинная скорость воды; $w''(z)$ – истинная скорость воздуха; $\varphi(z)$ – истинное газосодержание водовоздушной смеси; $\rho_{см}(z)$ – плотность газожидкостной смеси; g – ускорение свободного падения.

Подача эрлифта [расход жидкости (гидросмеси)]

$$Q_s(z) = \begin{cases} Q_{пр1}, & \text{при } 0 \leq z \leq z_j; \\ Q_{пр1} + Q_{пр2}, & \text{при } z_j < z \leq H + h, \end{cases}$$

где H – высота подъема эрлифта; h – геометрическое погружение смесителя.

Расход воздуха при нормальных (технических) условиях и подводе его дополнительного количества $Q_{в2}$ через дополнительный воздухопровод в промежуточное сечение подъемной трубы z_j

$$Q_v(z) = \begin{cases} Q_{в1}, & \text{при } 0 \leq z \leq z_j; \\ Q_{в1} + Q_{в2}, & \text{при } z_j < z \leq H + h. \end{cases}$$

Адекватность разработанной математической модели рабочего процесса эрлифта, основой которой является модель газожидкостного подъемника со снарядной структурой водовоздушного потока [10], подтверждена экспериментальными данными [1].

Максимально возможное значение координаты подвода дополнительного притока в подъемную трубу $z_{j\max}$ определяется точкой пересечения эпюр

давления B и B (точкой a , рис. 1), ниже которой давление в дополнительном подводящем трубопроводе превышает давление в подъемной трубе. Давления в подъемной трубе эрлифта и в дополнительном подводящем трубопроводе на высоте $z_{j\max}$ равны между собой

$$p_B = p_B, \quad (1)$$

где p_B – избыточное давление в подъемной трубе эрлифта на высоте $z_{j\max}$; p_B – избыточное давление в дополнительном подводящем трубопроводе на высоте $z_{j\max}$.

Давление в подъемной трубе на расстоянии $z_{j\max}$ от смесителя

$$p_B = p_{cm} \left(1 - \frac{z_{j\max}}{H+h} \right), \quad (2)$$

где p_{cm} – избыточное давление в смесителе,

$$p_{cm} = \rho'g \left(h - h_{п.т} \right), \quad (3)$$

здесь ρ' – плотность транспортируемой жидкости (гидросмеси); $h_{п.т}$ – потери напора в подающей трубе при расходе через нее транспортируемой жидкости (гидросмеси) в количестве, равном $Q_{пр1}$.

Давление в дополнительном подводящем трубопроводе на расстоянии $z_{j\max}$ от смесителя

$$p_B = \rho'g \left(\Delta h + h - z_{j\max} \right), \quad (4)$$

где Δh – превышение уровня жидкости в приемной емкости над уровнем жидкости в зумпфе.

Решение уравнения (1) с учетом (2), (3) и (4) относительно $z_{j\max}$ позволяет получить выражение для максимально возможной координаты подвода дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы

$$z_{j\max} = \frac{h_{п.т} + \Delta h}{H + h_{п.т}} \cdot (H + h).$$

Целесообразный вид характеристик эрлифта и методики их получения рассмотрим на примере газожидкостного подъемника с диаметрами подъемной трубы $D = 300$ мм, подающей трубы $d = 120$ мм, длиной подъемной трубы $H+h = 30$ м, геометрическим погружением смесителя $h = 8$ м, превышением уровня жидкости в приемной емкости над уровнем жидкости в зумпфе (рис. 1) $\Delta h = 2$ м, максимально возможной координатой подвода дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы $z_{j\max} = 3,14$ м.

Для приведенных данных безразмерная расходная характеристика эрлифта традиционной конструкции (без подвода дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы) в виде зависимости $\bar{Q}_3 = f(\bar{Q}_B)$ имеет вид кривой 1 (рис. 2). При этом безразмерная зависимость давления в смесителе от расхода воздуха эрлифта $\bar{p}_{см} = f(\bar{Q}_B)$ представляется кривой 2 и свидетельствует об уменьшении давления с увеличением подачи эрлифта из-за увеличивающихся гидравлических потерь в подающей трубе.

Увеличение гидравлических потерь в подающей трубе приводит к снижению энергоэффективности эрлифта и, следовательно, к снижению его подачи. Если при увеличении притока гидросмеси сверх величины, которая соответствует подаче эрлифта в оптимальном режиме $\bar{Q}_{3,опт1} = \bar{Q}_{пр1}$ (рис. 2), дополнительный приток $Q_{пр2}$ подводить в промежуточное сечение подъемной трубы, то безразмерная расходная характеристика такого эрлифта будет соответствовать кривой 3. Данная характеристика получена для $z_j = 0$.

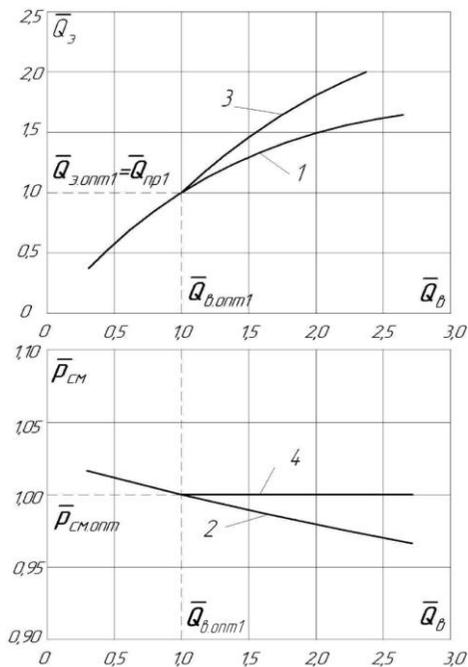


Рисунок 2 – Безразмерные характеристики эрлифтов $\bar{Q}_3 = f(\bar{Q}_B)$ и $\bar{p}_{см} = f(\bar{Q}_B)$: 1, 2 – традиционной схемы; 3, 4 – предлагаемой схемы (базисные значения $Q_3 = 0,0222 \text{ м}^3/\text{с}$; $Q_B = 0,273 \text{ м}^3/\text{с}$; $p_{см} = 75 \text{ кПа}$)

В рассматриваемом случае увеличение подачи эрлифта с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы обеспечивается за счет снижения потерь в подающей трубе и обеспечения постоянного давления в смесителе $p_{см} = p_{см. опт}$ при расходе воздуха $Q_{в} > Q_{в. опт1}$ (кривая 4, рис. 2).

Изменение значения вертикальной координаты точки подвода дополнительного притока в подъемную трубу z_j при прочих равных условиях приводит к изменению подачи эрлифта и вида его расходных характеристик (рис. 3). Чем выше от смесителя (в пределах $0 \leq z_j \leq z_{j макс}$) производится подвод дополнительного притока в подъемную трубу, тем больший дополнительный расход воздуха подводимый в то же промежуточное сечение трубы z_j необходим (рис. 3).

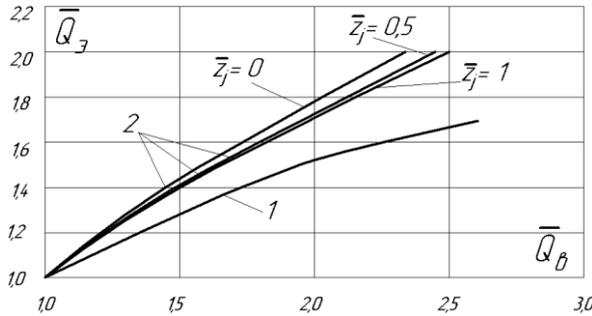


Рисунок 3 – Безразмерные расходные характеристики эрлифта $\bar{Q}_3 = f(\bar{Q}_B)$ традиционной 1 и предлагаемой 2 схем при разных значениях z_j (базисные значения $z_j = z_{j макс} = 3,14$ м; $Q_3 = 0,0222$ м³/с; $Q_B = 0,273$ м³/с)

Однако мощность $N_{в2}$ дополнительного расхода воздуха $Q_{в2}$ снижается при подводе его в более высокое сечение подъемной трубы z_j (рис. 4).

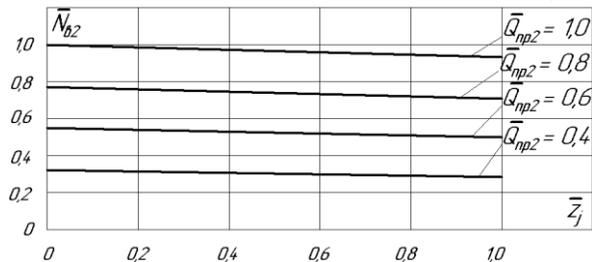


Рисунок 4 – Зависимость безразмерной мощности потока дополнительного расхода воздуха от безразмерной координаты его подвода в подъемную трубу $\bar{N}_{в2} = f(\bar{z}_j)$ (базисные значения $z_j = z_{j макс} = 3,14$ м, $N_{в2} = 22,4$ кВт, $Q_{вп2} = 0,0222$ м³/с)

Уменьшение указанной мощности объясняется снижением потребного давления дополнительного количества воздуха $Q_{в2}$ даже при повышении его расхода с увеличением координаты z_j . Увеличение дополнительного притока $Q_{пр2}$, подводимого в промежуточное сечение подъемной трубы с вертикальной координатой $z_j = z_{j\text{макс}}$ требует соответствующего увеличения мощности потока дополнительного расхода воздуха $N_{в2}$ (рис. 5).

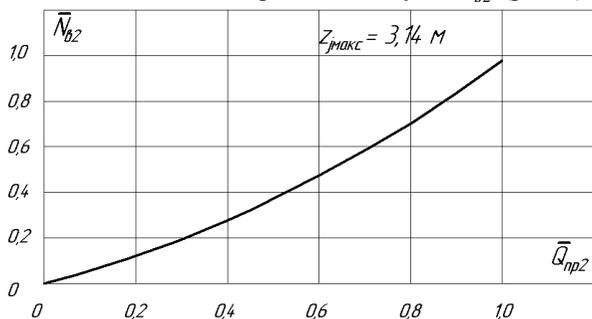


Рисунок 5 – Зависимость безразмерной мощности потока дополнительного расхода воздуха от безразмерного дополнительного притока $\bar{Q}_{пр2}$ при $z_j = z_{j\text{макс}} = 3,14$ м (базисные значения $Q_{пр2} = 0,0222$ м³/с; $N_{в2} = 22,4$ кВт)

Графическая зависимость безразмерной подачи эрлифта от безразмерной суммарной мощности потока воздуха $\bar{N}_{в\Sigma} = \bar{N}_{в1} + \bar{N}_{в2}$ ($\bar{N}_{в1}$ – безразмерная мощность основного потока воздуха $Q_{в1}$) $\bar{Q}_3 = f(\bar{N}_{в\Sigma})$ (рис. 6) подтверждает энергоэффективность разработанной эрлифтной установки при работе в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси).

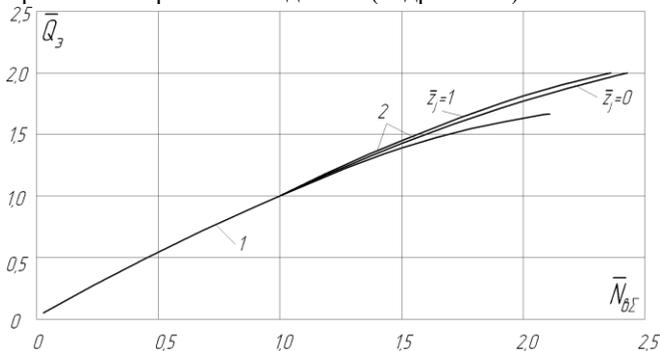


Рисунок 6 – Зависимость безразмерной подачи эрлифта от безразмерной суммарной мощности потока воздуха $\bar{Q}_3 = f(\bar{N}_{в\Sigma})$ для эрлифта традиционной 1 и предлагаемой 2 схем (базисные значения $z_j = z_{j\text{макс}} = 3,14$ м; $Q_3 = 0,0222$ м³/с; $N_{в\Sigma} = 15,4$ кВт)

Так, при значении безразмерной суммарной мощности потока воздуха, равном $\bar{N}_{\Sigma} = 2$ (рис. 6), подача эрлифта предлагаемой схемы на 11% превышает подачу эрлифта традиционной схемы.

5 Выводы и направление дальнейших исследований. Разработана методика представления характеристик эрлифта с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы в виде зависимостей подачи эрлифта от расхода воздуха и от мощности потока воздуха при задаваемых вертикальных координатах уровней подвода дополнительного притока. Характеристикой, наиболее полно отражающей протекающие в эрлифте гидродинамические процессы, является зависимость подачи эрлифта от суммарной мощности основного и дополнительного расхода воздуха. Полученные данные являются основой для разработки способов повышения энергетической эффективности газожидкостных подъемников.

Список литературы: 1. Кононенко А. П. Модель рабочего процесса эрлифта в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси) / А.П. Кононенко, М. Ю. Карпушин // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Випуск 16(142), серія гірничо-електромеханічна. Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2008. – С. 149 – 158. 2. Гейер В.Г. Универсальные характеристики подъемной трубы эрлифта / В.Г. Гейер, В.С. Костанда // В кн.: Гидравлическая добыча угля. Вып. 4(26). – М.: Недра, 1965. – С. 30 – 34. 3. Гейер В.Г. Безразмерные характеристики эрлифта / В.Г. Гейер, В.С. Костанда, Н.Г. Логвинов, В.В. Хубаев // В кн.: Гидравлическая добыча угля. Реф. сб. № 7 (29). – М.: Недра, 1965. – С. 34 – 38. 4. Гейер В.Г. Математическое описание безразмерных характеристик эрлифтов / В.Г. Гейер, Н.Г. Логвинов // В сб.: Разработка месторождений полезных ископаемых. Вып. 29, Киев: Техника, 1972, С. 119 – 127. 5. Гейер В.Г. О свойствах безразмерных характеристик эрлифтов / В.Г. Гейер, Н.Г. Логвинов // В кн.: Разработка месторождений полезных ископаемых. Вып. 31, Киев: Техника, 1973, С. 51 – 56. 6. Логвинов Н.Г. Особенности безразмерных эксплуатационных характеристик эрлифта / Н.Г. Логвинов, А.П. Стегзиевко, Е.И. Надеев, Е.Н. Логвинова // Труды Донецкого государственного технического университета. Выпуск 7, серия горно-электромеханическая. – Донецк: ДонГТУ, 1999, С. 153 – 156. 7. Бойко Н.Г. Расчетные характеристики эрлифта со снарядной структурой водовоздушной смеси / Н.Г. Бойко, А.П. Кононенко // Наукові праці ДНТУ. Серія: "Гірничо-електромеханічна". Випуск 104. – Донецьк: ДонНТУ. – 2006. – С. 17 – 29. 8. Кононенко А.П. Расчетные характеристики эрлифта с эмульсионной структурой водовоздушной смеси / А.П. Кононенко // Научный журнал "Вестник Донецкого университета". Серия А. Естественные науки. Часть 1. – Донецк: ДонНУ. – 2006. – №2. – С. 143 – 150. 9. Кононенко А.П. Расчетные характеристики эрлифта с кольцевой структурой водовоздушной смеси / А.П. Кононенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков: ХПИ. – 2006. – №5/1 (23). – С. 58 – 61. 10. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока / А.П. Кононенко // Промислова гідраліка і пневматика. – 2006. – №1 (11). – С. 34 – 37. 11. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта с эмульсионной структурой водовоздушного потока / А.П. Кононенко // Наукові праці ДНТУ. Серія: "Гірничо-електромеханічна". Випуск 101. – Донецьк: ДонНТУ. – 2005. – С. 58 – 67. 12. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта с кольцевой структурой водовоздушного потока / А.П. Кононенко // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – №27. – С. 113 – 121.

Надійшла до редколегії 06.08.2010