

УДК 622.276.5

**О ПРИНЦИПЕ ДЕЙСТВИЯ ЭРЛИФТА**

Кононенко А.П., канд. техн. наук, доцент  
Донецкий национальный технический университет

*Предложено развитие представлений о физических основах работы эрлифтов с восходящими газожидкостными потоками в вертикальных подъемных трубах.*

*The development of the ideas of the basic physics of the operation of the airlifts with the ascending gas-liquid flows in the vertical lifting pipes is suggested.*

**1. Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Возможность повышения эффективности работы гидравлических машин и аппаратов предполагает наличие адекватных математических моделей их рабочих процессов. Основой разработки таких моделей является глубокое понимание имеющих место в машинах и аппаратах гидродинамических явлений и разработка достоверных физических моделей рабочих процессов.

Сложность физических явлений в вертикальном восходящем газожидкостном потоке не позволяет до настоящего времени однозначно трактовать принцип действия эрлифта, что ограничивает возможность повышения его, в первую очередь, энергетической эффективности.

Поэтому развитие представлений об основах физических процессов в вертикальных подъемных трубах и принципе действия эрлифта является актуальной научной задачей, имеющей существенное практическое приложение.

**2. Анализ исследований и публикаций.** Существует ряд объяснений принципа действия эрлифта и основ физических явлений, сопровождающих лифтирование жидкостей – подъем жидкости за счет энергии расширяющегося газа, имеющая место в вертикальном восходящем газожидкостном потоке относительная скорость фаз, принцип негерметичного газового поршня, уменьшение плотности газожидкостной смеси с увеличением расхода газа [1].

Как показано в [1], наиболее полно соответствует физической природе транспортирования капельных жидкостей сжатыми газами точка зрения (представление), объясняющая восходящее движение

двухфазного потока меньшей плотностью газожидкостной смеси в подъемной трубе в сравнении с плотностью жидкости, которая подлежит транспортированию и в которую, как правило, погружается нижняя часть эрлифта.

Разность плотностей движущихся жидкостей является первопричиной свободного движения – в циркуляционных трубопроводах отопительных систем, дымовых трубах, системах естественной вентиляции и др.

В вертикальных подъемных трубах эрлифтов реализуется значительное разнообразие структур водовоздушных потоков [2]. И если для пузырьково-снарядной и эмульсионной структуры потока разность плотностей газожидкостной смеси и капельной жидкости приемлемо рассматривать в качестве источника возникновения восходящего движения водовоздушной смеси, то при кольцевой, а тем более диспергированной структуре газожидкостное ядро перемещается в подъемной трубе напорным потоком.

Основными конструктивными элементами эрлифта являются подающая труба, воздухопровод, смеситель, воздухоотделитель и подъемная труба [1, 3], (рис. 1).

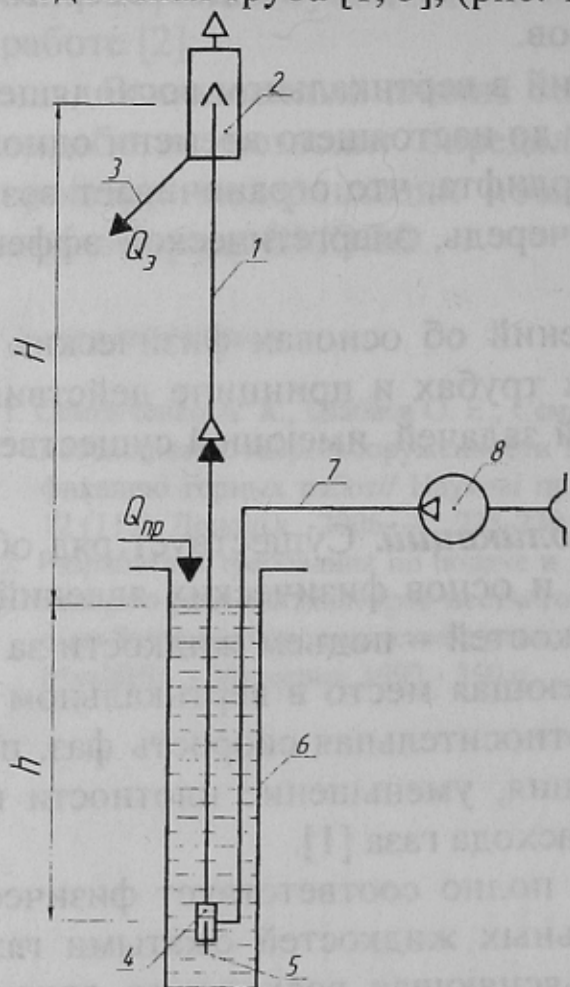


Рис. 1. Гидравлическая схема эрлифта:

- 1 – подъемная труба;
- 2 – воздухоотделитель;
- 3 – сливной трубопровод;
- 4 – смеситель;
- 5 – подающая труба;
- 6 – зумпф;
- 7 – воздухопровод;
- 8 – источник сжатого воздуха

Смеситель, к которому с одной стороны подключены два трубопровода для подвода транспортируемой жидкости и сжатого воздуха, а с другой – подъемная труба, служит для формирования с наименьшими гидравлическими потерями двухфазного потока и подачи его в подъемную трубу. Воздухоотделитель разделяет двухфазный поток на газообразную составляющую, сбрасываемую в атмосферу, и транспортируемую жидкость, отводимую по назначению.

Таким образом, основным конструктивным элементом эрлифта является подъемная труба, в которой и происходит процесс подъема жидкости на требуемую высоту. Исходя из этого, анализ рабочего процесса и принципа действия эрлифта целесообразно выполнять на основе напорной характеристики подъемной трубы и уравнения напорной характеристики по аналогии с анализом гидродинамических процессов в трубопроводах, транспортирующих однофазные жидкости. То есть, целесообразно рассматривать движение двухфазного потока в подъемной трубе эрлифта под действием перепада давления на входе (в смесителе) и выходе (в воздухоотделителе) из данной трубы. К тому же давление в смесителе может быть создано не только его погружением под уровень транспортируемой жидкости (геометрическое погружение смесителя), но и подачей в смеситель транспортируемой жидкости насосом (углесосно-эрлифтные установки [4-7]). В последнем случае имеем дело с бесспорными напорными потоками капельной жидкости (подача насосом) и газа (нагнетание компрессором) как до смесителя, так и двухфазного потока в подъемной трубе. Гидродинамические явления в таких эрлифтах не отличаются от физических процессов в газожидкостных подъемниках, нижняя часть подъемной трубы которых погружается под уровень транспортируемой жидкости и давление в смесителе которых соответствует гидростатическому давлению его геометрического погружения (при условии пренебрежения гидравлическими потерями в подающей трубе). Это также подтверждает правомерность анализа физических явлений лифтирования жидкости на основе напорной характеристики подъемной трубы эрлифта.

**3. Постановка задачи.** Исходя из существующих положений о гидродинамических явлениях в газожидкостном подъемнике разработать физическую модель рабочего процесса и объяснение принципа действия эрлифта, справедливое для всех реализуемых в нем структур восходящей водовоздушной смеси, на основе представления

о напорной характеристике вертикальной подъемной трубы подъемника.

**4. Изложение материала и результаты.** Уравнение напорной характеристики вертикального трубопровода при истечении транспортируемой восходящим потоком капельной жидкости в окружающую среду имеет вид [8]:

$$H_{\Sigma} = H_2 + aQ^2, \quad (1)$$

$H_{\Sigma}$  – напор во входном сечении вертикального трубопровода;

$H_2$  – длина вертикального трубопровода;

$a$  – сопротивление трубопровода;

$Q$  – объемный расход жидкости.

Представим уравнение (1) в виде давлений

$$p_y = c'gH_2 + c'gaQ^2 = p_g + p_{mp}, \quad (2)$$

где  $p_y$  – перепад давлений на трубе (разница давлений между входным и выходным сечениями трубы):

$\rho'$  – плотность капельной жидкости;

$p_g$  – давление, обусловленное гравитационной составляющей;

$p_{mp}$  – давление, компенсирующее гидравлические потери при движении жидкости в трубе.

Известно [8], что графически уравнение напорной характеристики трубопровода для рассматриваемого случая изображается ветвью параболы (кривая 1, рис. 2).

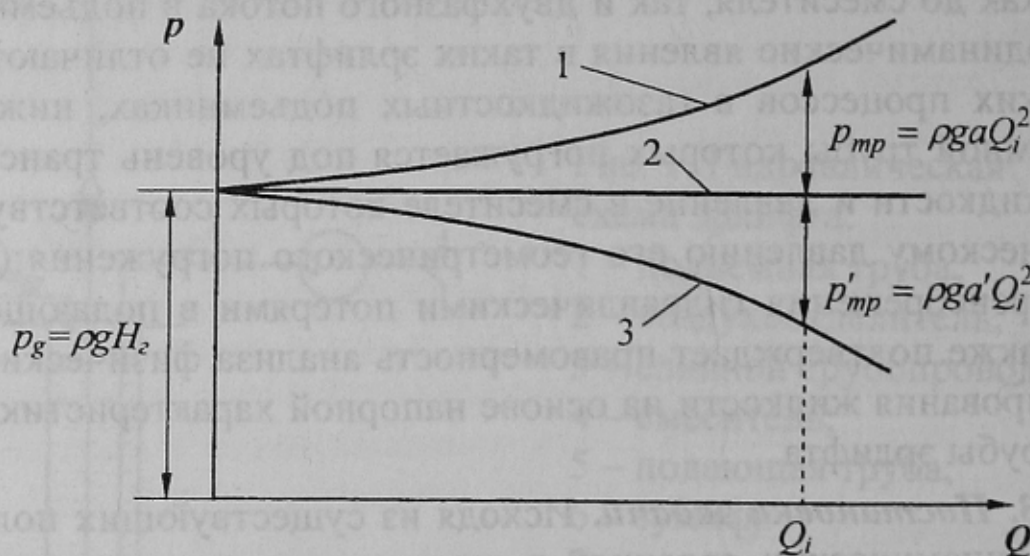


Рис. 2. Напорные характеристики вертикального трубопровода с восходящим потоком капельной жидкости

Вывявим условия, при которых напорная характеристика трубопровода будет представлена прямой, параллельной оси абсцисс (линия 2, рис. 2).

Потери давления от гидравлического трения и в этом случае будут изменяться при изменении расхода жидкости  $Q$  по параболическому закону  $p'_{тр} = \rho'ga'Q^2$ . Для обеспечения постоянства перепада давлений на трубе  $p_{\Sigma} - const$  при увеличении расхода капельной жидкости  $Q$  в соответствии с уравнением (2) необходимо уменьшать высоту трубы  $H$ , (кривая 3, рис. 2). Только в таком случае напорная характеристика вертикальной трубы может быть представлена горизонтальной линией 2 (рис. 2). Необходимо учитывать, что при уменьшении длины трубы  $H$  будет уменьшаться и сопротивление  $a'$ .

Прямой, параллельной оси абсцисс, является напорная характеристика подъемной трубы эрлифта.

При расходе воздуха  $Q_a$  и подаче эрлифта  $Q_e$ , давление в смесителе  $p_{см} = p_{\Sigma}$  формируется гидродинамическими процессами в подъемной трубе – гравитационной составляющей  $p_g$ , потерями на трение  $p_{тр}$  и на ускорение газожидкостного потока  $p_{уск}$  [9-11]

$$p_{см} = p_{\Sigma} = p_g + p_{тр} + p_{уск}. \quad (3)$$

Уравнение (3) представим в виде

$$\begin{aligned} p_{\Sigma} &= \rho_{см}g(H+h) + p_{тр} + p_{уск} = \\ &= [\rho''\varphi + \rho'(1-\varphi)]g(H+h) + p_{тр} + p_{уск}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\rho_{см}$  – плотность газожидкостной смеси;

$\rho''$  – плотность газа;

$\varphi$  – газосодержание двухфазного потока;

$H$  – высота подъема эрлифта;

$h$  – геометрическое погружение смесителя.

С другой стороны, давление в смесителе равно гидростатическому давлению геометрического погружения смесителя  $p_{n.c}$  за вычетом потерь в подающей трубе  $\Delta p_{n.m}$

$$p_{см} = p_{\Sigma} = p_{n.c} - \Delta p_{n.m} = \rho'gh - \Delta p_{n.m}. \quad (5)$$

Пренебрегая потерями в подающей трубе  $\Delta p_{n.m} \rightarrow 0$  [12], можно допустить условие

$$p_{см} = p_{\Sigma} = p_{n.c} = \rho'gh = const, \quad (6)$$

т.е. для эрлифта напорную характеристику подъемной трубы правомерно представлять при постоянном перепаде давления между входным и выходным сечениями в рассматриваемом диапазоне расходов

воздуха  $Q_0$ . Численные решения математических моделей рабочих процессов эрлифтов со снарядной, эмульсионной и кольцевой структурами водовоздушной смеси [13-17] подтверждают справедливость принятых положений.

Анализ напорной характеристики подъемной трубы эрлифта при вертикальном восходящем движении водовоздушного потока выполним на примере газожидкостного подъемника с подъемной трубой диаметром  $D = 150$  мм, длиной  $H+h = 45,9$  м, геометрическим погружением смесителя  $h = 41,5$  м (относительное погружение смесителя  $\alpha = 0,904$ ) [14, 18] при условии постоянного давления в смесителе  $p_{см} = p_{\Sigma} = const$  в рассматриваемом диапазоне изменений расходов сжатого воздуха. Структура потока в подъемной трубе (как на входе, так и на выходе) для оптимального режима и режима максимальной подачи данного эрлифта снарядная [2].

Расходная характеристика эрлифта построена по разработанной методике [9, 13, 14] при допущении существования снарядной структуры водовоздушной смеси для всего диапазона расходов сжатого воздуха (рис. 3).

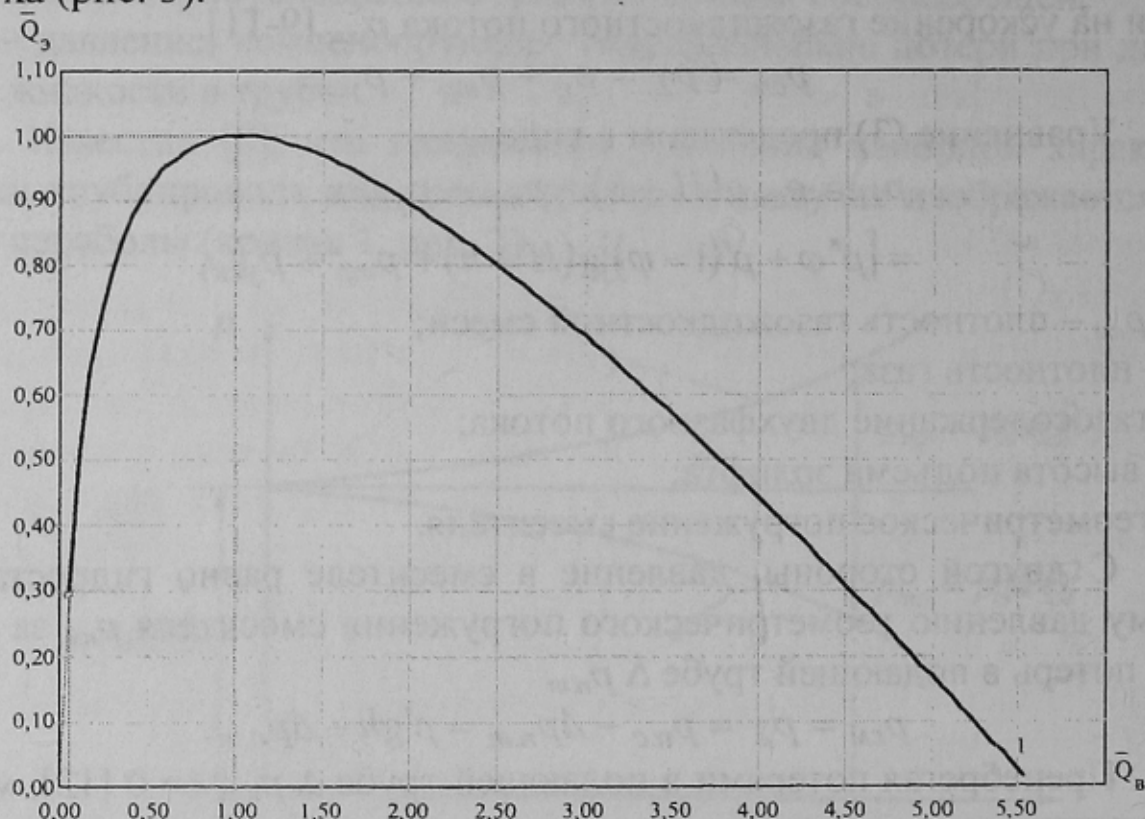


Рис. 3. Безразмерная расходная характеристика эрлифта  $D = 150$  мм,  $H+h = 45,9$  м,  $h = 41,5$  м,  $\alpha = 0,904$  [базисные значения  $Q_0 = 10,2$  м<sup>3</sup>/мин ( $0,17$  м<sup>3</sup>/с),  $Q_3 = 237,7$  м<sup>3</sup>/ч ( $0,066$  м<sup>3</sup>/с)]

Режим работы эрлифта с расходом воздуха  $Q_v = Q_{v,b}$  принято называть барботажным [1, 3]. Подача эрлифта (расход жидкости через выходное сечение подъемной трубы) при этом отсутствует  $Q_s = 0$  (начальная точка на восходящей ветви расходной характеристики, рис. 3), барботажный газожидкостный столб достигает выходного сечения подъемной трубы.

При расходе воздуха  $Q_v \leq Q_{v,b}$  напорное движение водовоздушной смеси в подъемной трубе отсутствует, так как в соответствии с уравнением (3) величины давления  $p_y$  недостаточно для компенсации составляющих  $p_g$ ,  $p_{тр}$  и  $p_{уск}$ . При этом в подъемной трубе возникает свободное движение двухфазной жидкости – восходящий циркуляционный поток в центральной части подъемной трубы и нисходящий – в периферийной (пристенной) зоне [19]. Циркуляционное движение обусловлено разницей плотностей восходящего и нисходящего потоков [20], а имеющее место давление в смесителе обеспечивает при  $Q_v = Q_{v,b}$  существование столба барботажной смеси высотой  $H+h$

$$p_{см} = p_y = p_g = c_{см,b} g(H+h) = [c'' \varphi_b + c'(1-\varphi_b)] g(H+h), \quad (7)$$

где  $\rho_{см,b}$  – плотность барботажной смеси;

$\varphi_b$  – газосодержание барботажной смеси.

Для обеспечения подачи эрлифта  $Q_s > 0$  в соответствии с уравнением (3), учитывая  $p_{см} = p_y = const$ , необходимо уменьшить составляющую  $p_g$  для возможности компенсации потерь на трение  $p_{тр}$  и ускорение  $p_{уск}$  (рис. 4). Это возможно при неизменной длине подъемной трубы  $H+h = idem$  и плотностях  $\rho'$  и  $\rho''$  увеличением газосодержания водовоздушного потока  $\varphi$ , то есть увеличением расхода воздуха  $Q_v$ .

При  $\varphi > \varphi_b$  возникает напорное движение водовоздушной смеси в подъемной трубе эрлифта, что обеспечивает подачу газожидкостного подъемника  $Q_s > 0$ . Нисходящий циркуляционный поток барботажного режима эрлифта [19] преобразуется в нисходящую жидкостную пленку при пузырьково-снарядной структуре [9], и восходящую – при кольцевой структуре водовоздушного потока [11]. Для эмульсионной структуры характерно колебательное движение пристенной жидкостной пленки [10].

Дальнейшее увеличение расхода воздуха  $Q_v$  приводит к увеличению гидравлических потерь на трение  $p_{тр}$  и, соответственно, уменьшению гравитационной составляющей  $p_g$  (рис. 4). Давление  $p_{уск}$ , компенсирующее ускорение двухфазного потока вследствие изотермического расширения сжатого воздуха, монотонно увеличивается

от  $\bar{p}_{уск} = 0$  при  $\bar{Q}_в = \bar{Q}_{в.б}$  до  $\bar{p}_{уск} \approx 0,04$  при  $\bar{Q}_в \approx 1,62$  и далее монотонно снижается до  $\bar{p}_{уск} \approx 0,01$  при  $\bar{Q}_в = \bar{Q}_{в.нр} \approx 5$ . Результаты количественных расчетов [14,16] подтверждают, что  $p_{уск}$  не превышает 5% от  $p_y$ , что может быть основанием для его пренебрежением.

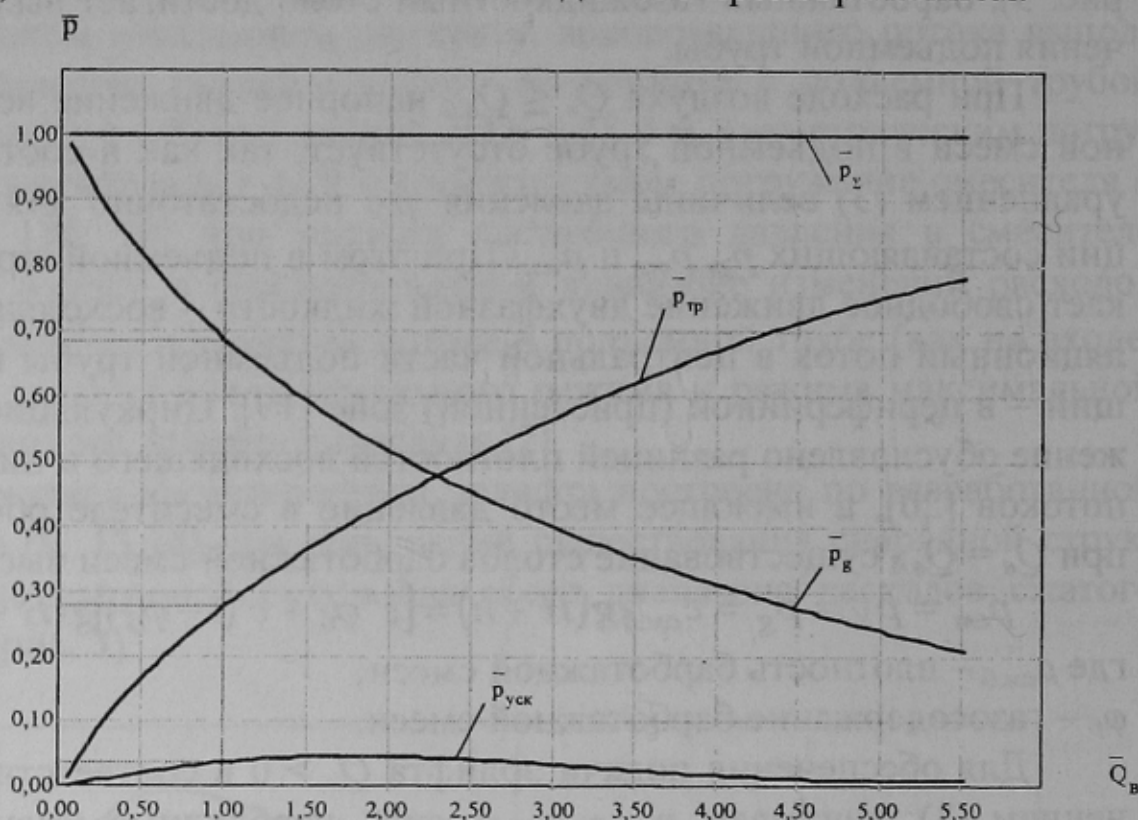


Рис. 4. Изменение относительных давлений в эрлифте  $D = 150$  мм,  $H+h = 45,9$  м,  $h = 41,5$  м,  $\alpha = 0,904$  [базисные значения  $Q_в = 10,2$  м<sup>3</sup>/мин (0,17 м<sup>3</sup>/с),  $p_\Sigma = 4,15$  кгс/см<sup>2</sup> (407,1 кПа)]

Прекращение подачи эрлифта при  $Q_в = Q_{в.нр}$  наступает тогда, когда для компенсации потерь на трение расходуется все суммарное давление  $p_y = p_{тр}$  и гравитационная составляющая  $p_g \rightarrow 0$ .

Напорное движение водовоздушной смеси в подъемной трубе сопровождается опережающим движением газовых включений из-за действия Архимедовых сил — так называемое скольжение фаз [1, 3]. Известно, что относительное движение компонентов двухфазного потока вносит характерную особенность в пузырьково-снарядный поток, что учитывается истинным газосодержанием  $\varphi < \beta$  ( $\beta$  — объемное расходное газосодержание). Утверждать о положительном эффекте трения газовых пузырей и дополнительном уносе вверх из-за этого жидкости не правомерно, так как для пузырьково-снарядной структуры силы трения, возникающие на межфазной границе, (между газом и



жидкостью) являются внутренними силами для рассматриваемой системы (газожидкостной смеси).

Эти же утверждения справедливы и для эмульсионной структуры, для которой, к тому же, отсутствуют данные для описания ее двухкомпонентной или раздельной моделью [10, 21, 22].

Воздействие сил трения газожидкостного ядра потока на перемещающуюся из-за этого вверх жидкостную пристенную пленку наблюдается при кольцевой структуре газожидкостной смеси [11, 23]. Однако и при кольцевой структуре водовоздушного потока, первопричиной напорного движения водовоздушной смеси в подъемной трубе эрлифта является перепад давлений на подъемной трубе  $p_y$ .

Таким образом, правомерно работу эрлифта классифицировать двумя видами движения водовоздушной смеси – свободным движением циркуляционных потоков в барботажном режиме работы эрлифта и напорным движением – в эксплуатационных режимах при подаче эрлифта  $Q_3 > 0$ .

Единственным источником напорного движения водовоздушной смеси в подъемной трубе эрлифта является перепад давлений между входным (на уровне смесителя) и выходным сечениями подъемной трубы. Восходящее вертикальное движение водовоздушной смеси сопровождается опережением газовых образований над жидкостными, что в зависимости от структуры потока вносит особенности в движущийся водовоздушный поток и его математическое описание.

**5. Выводы и направление дальнейших исследований.** На основе анализа напорной характеристики вертикальной подъемной трубы предложено объяснение гидродинамических процессов, протекающих в газожидкостном подъемнике, и принципа его действия, правомерное при всех имеющих место в эрлифте структурах восходящих водовоздушных потоков. Доказано, что источником движения газо-жидкостной смеси в эрлифте является разница давлений между входным и выходным сечениями подъемной трубы.

Достоверная физическая модель позволит разрабатывать адекватные математические описания рабочего процесса эрлифта.

Список источников.

1. Папаяни Ф.А., Козыряцкий Л.Н., Пашенко В.С., Кононенко А.П. Энциклопедия эрлифтов. М.: Информсвязиздат, 1995. – 592 с.
2. Кононенко А.П. Структуры двухфазных потоков в подъемных трубах эрлифтов // Вісник Сумського державного університету. Серія - Технічні науки. – Суми: СДУ. - 2005. - №12 - С. 38-48.
3. Эрлифтные установки: Учебное пособие/ Гейер В.Г., Козыряцкий Л.Н., Пашенко В.С., Антонов Я.К. – Донецк: ДПИ, 1982. – 64 с.

4. Рысин Н.Г., Костанда В.С. Углесосно-эрлифтная установка // Уголь Украины. – 1961. - №5. - С. 33.
5. Костанда В.С. Исследование и разработка эрлифтных и углесосно-эрлифтных подъемов гидрошахт: Дис. ... канд. Техн. наук: - Донецк: ДПИ, 1963, том I - 209 с., том II – 140 с.
6. Чеченев А.И. Последовательная работа насоса и эрлифта // В сб.: Разработка месторождений полезных ископаемых. Выпуск 37. - Киев: Техніка. – 1974. - С. 88-90.
7. Чеченев А.И. Расчет рабочих характеристик насосно-эрлифтной установки // В сб.: Разработка месторождений полезных ископаемых. Выпуск 41. - Киев: Техніка. – 1975. - С. 93-96.
8. Гейер В.Г., Дулин В.С., Заря А.Н. Гидравлика и гидропривод: Учебн. для вузов. – М.: Недра, 1991. – 331 с.
9. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока // Промислова гідравліка і пневматика. - 2006. - №1 (11). - С. 34-37.
10. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта с эмульсионной структурой водовоздушного потока // Наукові праці ДНТУ. Серія: "Гірничо-електромеханічна". Випуск 101. - Донецьк: ДонНТУ. – 2005. - С. 58-67.
11. 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". – 2006. - №27. - С. 113-121.
12. Кононенко А.П. Энергетическая эффективность эрлифта // Научный журнал "Вестник Донецкого университета". Серия А, "Естественные науки". - Донецк: ДонНУ. – 2006. - №1, Часть 1. - С. 205-212.
13. Бойко Н.Г., Кононенко А.П. Расчетные характеристики эрлифта со снарядной структурой водовоздушной смеси // Наукові праці ДНТУ. Серія: "Гірничо-електромеханічна". Випуск 104. - Донецьк: ДонНТУ. – 2006. - С. 17-29.
14. Кононенко А.П. Тиски та потужності снарядного водоповітряного потоку в піднімальній трубі ерліфта // Науковий журнал "Вісник ДонДУЕТ". Серія "Технічні науки". - Донецьк: ДонДУЕТ. - 2006. - №1(29). - С. 20-30.
15. Кононенко А.П. Расчетные характеристики эрлифта с эмульсионной структурой водовоздушной смеси. // Научный журнал "Вестник Донецкого университета". Серия А. Естественные науки. Часть 1. – Донецк: ДонНУ. – 2006. - №2. - С. 143 - 150.
16. Бойко Н.Г., Кононенко А.П. Энергетические параметры эмульсионного водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта // Наукові праці ДНТУ. Серія: "Гірничо-електромеханічна". Випуск 12 (113). - Донецьк: ДонНТУ. – 2006. - С. 17-32.
17. Кононенко А.П. Расчетные характеристики эрлифта с кольцевой структурой водовоздушной смеси // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков: ХПИ. – 2006. - №5/1 (23). - С. 58-61.
18. Адамов Б.И. Исследование и разработка глубоководных эрлифтных установок для подъема твердого материала: Дис. ... канд. Техн. наук: 05.05.06. – Донецк: ДПИ, 1982. –323 с.
19. Кононенко А.П. Математическая модель барботажного режима эрлифта // Наукові праці ДНТУ. Серія: "Гірничо-електромеханічна". Випуск 83. - Донецьк: ДонНТУ. - 2004. - С. 156-169.
20. Кононенко А.П. Количественный анализ гидродинамических параметров барботажного режима эрлифта // Сборник научных трудов "Вісник Донбаської державної машинобудівної академії". – Краматорск: ДГМА. – 2006. - №1(3). - С. 217-223.
21. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. - М.: Мир, 1972.- 440 с.
22. Протодьяконов И.О., Люблинская И.Е. Гидродинамика и массообмен в системах газ-жидкость. - Л.: Наука, 1990. - 349 с.
23. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. ч. II. – М.: Наука, Гл. ред. физ.мат. лит., 1987. – 360 с.

*Дата поступления статьи в редакцию: 28.04.07*