

УДК 622.53: 622.615

**ОЦЕНКИ МЕТОДОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ
ЖИДКОСТЕЙ ЭРЛИФТНЫМИ
УСТРОЙСТВАМИ**

М.В. Василевский, В.И. Романдин*

Томский политехнический университет
*Томский государственный университет
E-mail: vasmix40@mail.ru**Василевский Михаил Викто-
рович**, доцент Института не-
разрушающего контроля ТПУ.
E-mail: vasmix40@mail.ruОбласть научных интересов:
методы механики дисперсных
сред, в приложении к задачам
защиты окружающей среды от
загрязнений, в том числе ме-
тоды пневмотранспортирова-
ния дисперсных материалов.**Романдин Владимир Ивано-
вич**, старший научный со-
трудник Института приклад-
ной математики и механики
Томского Государственного
университета.E-mail: romandin@niipmm.
tsu.ruОбласть научных интересов:
методы гидроаэромеханики в
приложении к технологиче-
ским процессам переработки
дисперсных материалов, в том
числе методы пневматиче-
ского транспортирования
дисперсных материалов.

Даются оценки методов транспортирования жидкости эрлифтными устройствами. Предлагается метод расчета параметров эрлифта с учетом ускорения потока. Проводится анализ газосодержания в потоках устройств гидроподъема полезных ископаемых.

Ключевые слова:

Диспергация, аэрация, пневмотранспортирование, эрлифт, количество движения.

Транспортировка жидкости посредством диспергации газа в жидкости реализуется в эрлифтах, газлифтах, которые нашли применение в технологиях водоотлива, добычи полезных ископаемых, обработки сточных вод [1–5]. В эрлифтах реализуется пузырьковое течение. Область объемных газосодержаний, соответствующих пузырьковому течению, простирается от одиночного изолированного пузыря до квазисплошного течения пены, когда на долю жидкости приходится менее 1 % объема среды [3]. Процесс образования пузырьков определяется свойствами газа и жидкости, конструктивными особенностями распределителей газа и

способом подвода газа. В [3] приводятся сведения о размерах пузырьков, получающихся при конкретных условиях, скорости подъема пузыря в зависимости от размера в покоящейся жидкости.

Принцип действия эрлифта основан на законе сообщающихся сосудов, согласно которому положение уровней жидкости при разном их удельном весе неодинаково, причем жидкость меньшего удельного веса имеет более высокий уровень (рис. 1). При подаче воздуха в трубу под уровень на глубине h в трубе возникает восходящее движение и в зависимости от приведенной скорости в поперечном сечении трубы воды и воздуха возникают разные режимы течения смеси [3]. Для трубки 25,4 мм в диапазоне приведенных скоростей воды $0,1 \dots 1,2$ м/с и приведенной скорости воздуха $2 \dots 10$ м/с имеет место пузырьково-снарядный режим течения, при скорости воды в диапазоне $2 \dots 10$ м/с и скорости воздуха $2 \dots 8$ м/с имеет место пузырьковый режим течения [3]. Под приведенной скоростью компоненты понимается ее расчетная расходная скорость в предположении отсутствия другой компоненты. В [4] приведены зависимости для расчета восходящего газожидкостного потока по различным методикам с учетом различных режимов движения смеси. Вычисления необходимых перепадов давления и требуемого расхода жидкости проводят численным решением дифференциального уравнения движения смеси для принятых режимов течения.

В [5] приведена карта режимов течения газожидкостных смесей в зависимости от обобщенных параметров, в которых фигурируют физико-механические характеристики газа и жидкости (плотность, скорость, вязкость, поверхностное натяжение, диаметр трубы).

В [1, 2] представлены простые методы расчета расходной характеристики эрлифта. Уравнение движения записывается в гидравлической форме «обозначения» [1]:

$$\rho h = \rho_{\text{см}}(H+h) + a_3 \rho_{\text{см}} Q_{\text{см}}^2, \quad (1)$$

где величина $a_3 \rho_{\text{см}} Q_{\text{см}}^2$ может быть представлена формулой Дарси [6],

$$a_3 \rho_{\text{см}} Q_{\text{см}}^2 = \rho_{\text{см}} \cdot \lambda \cdot [(H+h)/D] \cdot v_{\text{см}}^2 / 2g = \rho_{\text{см}} \lambda [(H+h)/D] [Q_{\text{см}} / (\pi D^2/4)]^2 / 2g,$$

где λ – коэффициент трения; $\rho_{\text{см}} = \rho/(1+q_n)$; $q_n = q[p_a/(p_a + \rho gh/2)]$; $q = (Q_B/Q_3)$, Q_B ; Q_3 – расходы воздуха и жидкости (подача эрлифта); $Q_{\text{см}} = Q_3(1+q_n)$; ρ – плотность воды; p_a – атмосферное давление. Следовательно,

$$a_3 = \lambda \cdot [(H+h)/D^5] / [(\pi/4)^2 2g] = \psi [(H+h)/D^5] / g. \quad (2)$$

Решая уравнение (1) относительно $Q_{\text{см}}$ и учитывая приведенные соотношения (2), получается расходное уравнение [1, 2]

$$Q_3^2 = K_Q^2 g D^5, K_Q = \frac{1}{1+q_n} \sqrt{\frac{\alpha}{\psi} \left(1+q_n - \frac{1}{\alpha}\right)},$$

где $\alpha = h/(H+h)$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; D – диаметр подъемного трубопровода эрлифта.

Рекомендуемые значения K_Q для длинных эрлифтов

$$K_Q = \frac{5\sqrt{\alpha}}{1+q_n} \sqrt{\left(1+q_n - \frac{1}{\alpha}\right)} \quad (3)$$

для коротких лифтов

$$K_Q = \frac{3,68\sqrt{\alpha}}{1+q_n} \sqrt{\left(1+q_n - \frac{1}{\alpha}\right)}. \quad (4)$$

Под длинными эрлифтами понимаются эрлифты, для которых $h/D > 200$ и $\rho gh/p_a > 2$, для коротких эрлифтов $h/D < 200$ и $\rho gh/p_a < 2$. Величина q_n для водоотливных эрлифтных систем находится в диапазоне $5 \dots 40$, $\alpha = 0,15 \dots 0,5$ [1].

Оптимальное значение удельного расхода воздуха, соответствующего максимальной подаче эрлифта, в работе [2] предложено в виде

$$q_{\text{max}} = \left(\frac{2}{\alpha} - 1\right) \left(1 + \frac{\rho gh}{2p_a}\right) \quad (5)$$

По графическим зависимостям [1] для короткого или длинного эрлифта и выбранного α находят q_n , из соотношений (3) или (4) рассчитывают необходимый диаметр эрлифта по заданному расходу воды.

Этот метод не учитывает вклад располагаемого напора на создание ускорения потока в подъемной трубе, который для коротких эрлифтов может быть больше напора на преодоление трения. Значение удельного расхода, соответствующего максимальной подаче эрлифта, по выражению (5) противоречит механике процесса, поскольку при $\alpha \rightarrow 1$ удельный расход воздуха с увеличением h также возрастает.

Запишем уравнения движения смеси в интегральном виде в эйлеровом представлении. В это уравнение входят величины изменения количества движения потока на входе и выходе из выделенной области течения, массовая сила, действующая на объем, и силы напряжений на поверхности, ограничивающих данный объем [6]. Схема для расчета количества движения потоков и сил приведена на рис. 1. Выделенный объем ограничен пунктирной линией. Вода из колодца поступает в трубу, проходит через нижнее сечение 1–1 со скоростью v_{f1} и количеством движения $K_1 = W_f \cdot v_f$, $W_f = Q_f \cdot \rho_f$ – массовый расход жидкости, $v_f = Q_f/S$. Выше сечения 1–1 происходит смешение воздуха с массовым расходом W_g и воды с массовым расходом W_f . Смесь

выходит через сечение 2–2 со скоростью v_{m2} и количеством движения $K_2 = G \cdot v_{m2}$, где $G = W_f + W_g$
 $= Q_{m2} \cdot \rho_{m2}$ – массовый расход смеси; $v_{m2} = Q_{m2} / S$; $Q_{m2} = Q_{f1} + Q_{g2}$; $\rho_{m2} = \frac{G}{Q_{m2}} = \frac{\rho_f Q_{f1} + \rho_g Q_{g2}}{Q_{f1} + Q_{g2}}$.

Статическое давление P_1 в сечении 1–1 записывается с учетом затрат на создание динамического напора $P_1 = P_a + \rho_f \cdot g \cdot h - \rho_f \cdot v_f^2 / 2$, давление P_2 в сечении 2–2 равно атмосферному $P_2 = P_a$.

Массовая сила (сила тяжести) смеси в выделенном объеме $F_g = g \cdot S \int_0^{H+h} \rho_{mz} dz \approx gS(H+h)\bar{\rho}_m$, где z – вертикальная координата, отсчитываемая от сечения 1–1 вверх. Величина плотности смеси ρ_{mz} зависит от давления и температуры смеси. При постоянной температуре ρ_{mz} зависит от распределения давления по координате z . При линейном распределении давления по высоте среднее значение плотности смеси $\bar{\rho}_m = G / \bar{Q}_m$, $\bar{Q}_m = \frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_g}{\rho_g}$ – расход смеси; величина $\bar{\rho}_g = \rho_{g2} (\bar{P}_m / P_2)$ – средняя плотность воздуха в смеси; $\bar{P}_m = (P_1 + P_2) / 2$ – среднее давление смеси.

Сила трения потока $F_T = \pi D \int_0^{H+h} \tau_w dz \approx \pi D(H+h) \frac{1}{2} \xi \bar{\rho}_m v_m^2$.

Для развитого турбулентного режима величина $\xi = 0,005$ в формуле $\tau_w = (1/2)\xi v_m^2$ [2. С. 45], что соответствует $\lambda = 0,02$ в выражении $\tau_w = (1/8)\lambda v_m^2$ [6. С. 671].

Уравнение движения в проекции на ось z имеет вид [6]

$$K_1 - K_2 + F_1 - F_2 - F_g - F_T = 0 \tag{6}$$

Подставляя введенные величины, получим связь между расходами и рабочими давлениями в эрлифте.

Для упрощения расчетов введем величину массового газосодержания $x = W_g / G$, которая при устойчивой работе эрлифта постоянна по высоте. $W_g = \frac{W_f x}{1-x}$, $G = \frac{W_f}{1-x}$. В эрлифтах $0,002 < x < 0,05$; $K_2 \gg K_1$; $gh \gg v_f^2 / 2$.

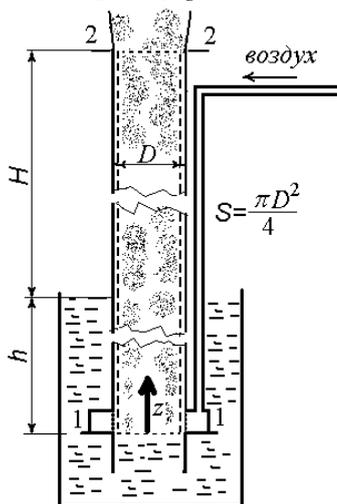


Рис. 1. Расчетная схема эрлифта

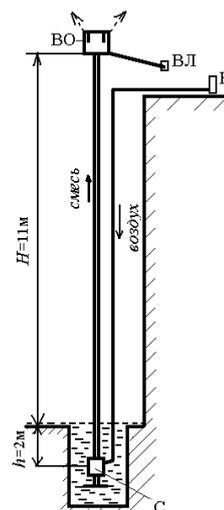


Рис. 2. ВО – водоотделитель, ВЛ – водяной лоток, К – компрессор с избыточным давлением 0,3 ати, производительностью 5 м³/мин, С – смеситель.

Вышеприведенные величины будут иметь вид

$$\bar{\rho}_m = \frac{G}{Q_m} \approx \frac{\rho_f}{1 + x \frac{\rho_f}{\rho_g}}, \quad \bar{\rho}_g = \rho_{g2} \left(1 + \frac{\rho_f g h}{2P_2} \right); \quad v_{m2} = \frac{G}{\rho_{m2} S} = \frac{W_f}{(1-x) S \rho_{m2}} = v_f \frac{x \frac{\rho_f}{\rho_g} + 1}{1-x}, \quad v_f = Q_f / S;$$

$$K_2 = v_{m2} S \rho_{m2} v_{m2} = v_f^2 \rho_f S \frac{x \frac{\rho_f}{\rho_g} + 1}{(1-x)^2}, \quad \rho_{m2} \approx \frac{\rho_f}{x \frac{\rho_f}{\rho_g} + 1}; \quad F_1 - F_2 \approx \rho_f \cdot g \cdot h S; \quad F_g \approx g S (H + h) \bar{\rho}_m;$$

$$F_T = \pi D (H + h) \frac{1}{2} \xi \bar{\rho}_m v_m^2 = \frac{1}{2} \pi D (H + h) \xi \frac{1 + x \frac{\rho_f}{\rho_g}}{(1-x)^2} \rho_f v_f^2.$$

Подставляя приведенные выражения в (6), вводя $\alpha = h/(H+h)$ и разделив на $S = \pi D^2/4$, получим

$$gh \left(1 - \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{1}{\frac{\rho_f}{\rho_g} x + 1} \right) = v_f^2 \frac{1}{(1-x)^2} \left[x \left(\frac{\rho_f}{\rho_{g2}} + 2 \frac{h}{\alpha D} \xi \frac{\rho_f}{\rho_g} \right) + 1 + 2 \frac{h}{\alpha D} \xi \right]. \quad (7)$$

При больших газосодержаниях « $x > 0,015$ » можно положить $(\rho_f/\rho_{g2})x \gg 1$ и уравнение (7) можно упростить и записать в виде

$$gh \left(1 - \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{1}{1 + Ax} \right) = \frac{x}{(1-x)^2} B v_f^2, \quad (8)$$

$$\text{где } A \approx \frac{\rho_f}{\rho_g}, \quad B = \frac{\rho_f}{\rho_{g2}} \left(1 + 2 \frac{h}{\alpha D} \xi \frac{\rho_{g2}}{\rho_g} \right).$$

Величина v_f^2 в выражении (8) имеет максимум при изменении x . Значение x_{\max} , при котором v_f^2 имеет наибольшее значение, определится из соотношения $dv_f^2/dx = 0$. Вводя упрощения $(1-x)^2 \approx 1-2x$ и учитывая, что $A \gg 2/\alpha$, получим

$$x_{\max} = \frac{(1-\alpha)}{\alpha} \cdot \frac{\left(1 + \sqrt{\frac{1}{1-\alpha}} \right)}{A}. \quad (9)$$

В выражении (8) $\xi = 0,005$ и при $h/D < 50$ и $\alpha = 0,5$ величина $2 \frac{h \xi}{\alpha D} \frac{\rho_{g2}}{\rho_g} < 1$.

По уравнению (9) определяется оптимальное газосодержание, по уравнению (8) определяется скорость жидкости, а по соотношению $v_f = Q_f/S$ – необходимая площадь проходного сечения.

Пример. Дано $Q_f = 18 \text{ м}^3/\text{ч} = 0,005 \text{ м}^3/\text{с}$; $h = 2 \text{ м}$; $[(P_1+P_2)/2P_2] = 1,1$;
 $\bar{\rho}_g = \rho_{g2} \left(1 + \frac{\rho_f g h}{2P_2} \right) = 1,25 \left(1 + \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 2}{2 \cdot 101 \cdot 10^3} \right) = 1,37 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $A = \frac{\rho_f}{\rho_g} = \frac{1000}{1,37} = 729$;
 $\alpha = h/(H+h) = 0,15$; $(\rho_{g2}/\rho_f) = 0,00125$; $(\rho_f/\rho_{g2}) = 800$. Имеем

$$x_{\max} = \frac{(1-\alpha) \cdot 1 + \sqrt{\frac{1}{1-\alpha}}}{\alpha \cdot A} = \frac{1-0,15}{0,15} \cdot \frac{1 + \sqrt{\frac{1}{1-0,15}}}{729} = 0,0162, \text{ расход воздуха}$$

$$Q_{g2} = \frac{\rho_f}{\rho_{g2}} \cdot \frac{Q_f \cdot x}{(1-x)} = 800 \cdot 0,0162 \cdot 18 / 0,984 = 237 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Диаметр D определяется с помощью итераций из выражения (9) с учетом $v_f = Q_f/S$. В первом приближении предполагается, что силы трения отсутствуют и $B = (\rho_f/\rho_{g2}) = 800$,

$$v_f' = \sqrt{\frac{gh}{B} \left[\frac{1-2x}{x} \left(1 - \frac{1}{\alpha + Ax} \right) \right]} = \sqrt{\frac{9,81 \cdot 2}{800} \cdot \frac{(1-2 \cdot 0,0162)}{0,0162} \cdot \frac{1}{0,15} \cdot \frac{1}{(1+0,0162 \cdot 728)}} = 0,89 \text{ м/с};$$

$S' = 0,005/0,89 = 0,0056 \text{ м}^2$; $D' \approx 0,085 \text{ м}$; $h/D' = 23,5$. Во втором приближении расчет показывает $B = 1947$; $v_f = 0,57 \text{ м/с}$; $D'' = 0,106 \text{ м}$; $h/D'' = 18,9$. В третьем приближении $B = 1722$; $v_f = 0,61$; $D''' = 0,102 \text{ м}$; Окончательное значение $D = 0,1 \text{ м}$. Схема установки эрлифта для удаления воды представлена на рис. 3.

В технологиях гидродобычи полезных ископаемых эрлифты применяются в качестве наиболее эффективных средств для подъема дисперсных материалов «размер частиц до 100 мм», полученных в технологиях гидродобычи [2]. При этом скорость воды в подъемном трубопроводе должна быть достаточной для транспортировки кусковых материалов. В технологии реализуется совместная работа эрлифта, зумпфа (промежуточной емкости), грунтонасоса и насоса размыва грунта. Практика эксплуатации эрлифтно-земснарядных комплексов показала невозможность применения экспериментальных зависимостей, используемых для расчета эрлифтных установок, в угольной промышленности с малыми коэффициентами заглубления α . В эрлифтно-земснарядных комплексах погружение смесителя эрлифта составляет 20...200 м, высота подъема над уровнем воды составляет 0,5...1 м. Особенностью работы эрлифтно-земснарядных комплексов является переменная глубина погружения смесителя и величины α . Одновременно с увеличением глубины погружения смесителя растет необходимое давление сжатого воздуха, и значение α приближается к единице.

В [2] приведены результаты расчетов и экспериментальных исследований эрлифтных систем с погружением смесителя на глубину $h = 10...65 \text{ м}$ и большими коэффициентами заглубления ($\alpha > 0,75$). Предложена аппроксимирующая зависимость удельного расхода воздуха при больших значениях α для этого диапазона глубин

$$q = 0,95\alpha^{-2,2} \quad [2].$$

При гидроподъеме полезных ископаемых определяющим фактором процесса является скорость жидкости в участке подвода твердых включений в камеру смешения. Скорость суспензии определяет абразивный износ стенок трубы и временной ресурс работы. Транспортирующая способность потока после камеры смешения намного превышает транспортирующую способность в участке подвода. Скорость подвода должна быть выше скорости витания твердых частиц в жидкой среде. Скорость витания определяется соотношением

$$U_v = 1,71 \sqrt{\frac{d_c \cdot g \cdot \rho_c}{\rho_f}} \text{ м/с}. \quad (10)$$

При $\rho_c/\rho_f = 2,3$; $d_c = 0,05 \text{ м}$; $U_v = 1,82 \text{ м/с}$. Для песка с диаметром частиц $d_c < 0,5 \text{ мм}$ скорость витания не превышает 0,18 м/с. Скорости жидкости, превышающее значение скорости витания для крупных частиц по формуле (10), могут быть получены при глубинах погружения смесителя более 10 м.

В [2] приведены результаты испытаний и отладки эрлифтно-земснарядного комплекса. Максимальная подача эрлифта по пульпе $Q_f = 630 \text{ м}^3/\text{ч}$; по песку $Q_c = 248 \text{ м}^3/\text{ч}$; расход воды для размыва $Q = 356 \text{ м}^3/\text{ч}$; расход сжатого воздуха $Q_g = 19,66 \text{ м}^3 \approx 1180 \text{ м}^3/\text{ч}$; высота подъема гидросмеси над уровнем водоема $H = 4 \text{ м}$; глубина разработки песка $h = 12 \text{ м}$; диаметр подъемной трубы эрлифта $D = 0,3 \text{ м}$. В этом случае подача суспензии $Q_s = Q_f + Q_c = 878 \text{ м}^3/\text{ч}$; $W_s = W_f + Q_c \rho_c = 1200,4 \text{ т/ч}$.

Для суспензии уравнение (7) имеет вид

$$\text{gh} \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_f} \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{1}{\frac{\rho_s}{\rho_g} x + 1} \right) = v_s^2 \frac{1}{(1-x)^2} \frac{\rho_s}{\rho_f} \left[x \left(\frac{\rho_s}{\rho_{g2}} + 2 \frac{h}{\alpha D} \xi \frac{\rho_s}{\rho_g} \right) + 1 + 2 \frac{h}{\alpha D} \xi \right]. \quad (11)$$

$$\text{Здесь } \rho_s = \frac{Q_f \rho_f + Q_u \rho_u}{Q_f + Q_u} = \frac{630 \cdot 1000 + 248 \cdot 2300}{630 + 248} = 1370 \text{ кг/м}^3;$$

$$x = \frac{W_g}{W_f + W_u + W_g} = \frac{\rho_{g2} \cdot Q_{g2}}{Q_f \rho_f + Q_u \rho_u + Q_{g2} \rho_{g2}} = 0,00125. \text{ Удельный объемный расход воздуха}$$

$$q = Q_{g2}/(Q_f + Q_u) = 1180/(630+248) = 1,34.$$

Сравнительные расчетные показатели приведены в таблице. Удельный расход воздуха рассчитывается по формуле (5) и определяется с использованием формулы (11). Диаметр трубы на расход суспензии $Q_s = 878 \text{ м}^3/\text{ч}$ рассчитывается с использованием формулы (4) и с использованием соотношения (11). Скорость суспензии во входном патрубке определяется по соотношению $v_s = Q_s/S$. Скорость смеси в выходном сечении трубы определяется по соотношению

$$v_{m2} = v_s \frac{x \frac{\rho_s}{\rho_{g2}} + 1}{1-x}. \quad (12)$$

Таблица. Значения величин удельных расходов воздуха, диаметров труб и скоростей потоков

Формулы	$q = Q_g/Q_s$	Формулы	D , м	Формулы	v_s , м/с	Формулы	v_{m2} , м/с
(5)	2,67	(4)	0,32	(4)	3,05	(4), (12)	11,2
(11)	2,96	(11)	0,35	(11)	2, 51	(11), (12)	9,93
Экспер. [2]	1,37	Экспер. [2]	0,3	Экспер. [2]	3,47	Экспер. [2]	8,22

Представленные экспериментальные низкие значения газосодержания в [2] и высокие концентрации твердых частиц в суспензии при высоких скоростях потока вызывают сомнения, поскольку, как показывают расчеты по (11), располагаемого напора недостаточно. Подобные режимы и показатели могут быть реализованы при значениях $\alpha > 0,9$. Формула (11) может быть использована при расчетах параметров эрлифта и в качестве контроля при проведении исследований.

Работа выполнена при поддержке РФФИ – проект №11–08–00059.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гейер В.Г., Тимошенко Г.М. Шахтные вентиляторные и водоотливные установки. – М.: Недра, 1987. – 270 с.
2. Антонов Я.К., Козыряцкий Л.Н., Малашкина В.А., Холмогоров А.П., Хунис Я.Е. Гидроподъем полезных ископаемых. – М.: Недра, 1995. – 173 с.
3. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения: Пер. с англ. / Под ред. И.Т. Аладьева. – М.: Мир, 1972. – 440 с.
4. Сахаров В.А., Мохов М.А. Гидродинамика газожидкостных смесей в вертикальных трубах и промысловых подъемниках. – М: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. Губкина, 2004. – 398 с.
5. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. Изд. 2-е. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.
6. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 848 с.

Поступила 10.01.2012 г.