

Инкин А.В., к.т.н., доцент (Национальный горный университет,
г. Днепропетровск)

ОЦЕНКА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОСХОДЯЩЕГО ПОТОКА ПРИ ЛИФТИРОВАНИИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Разработана математическая модель извлечения вязкопластичной жидкости с помощью эрлифта. На ее основе установлено изменение свойств газожидкостной смеси вдоль ствола скважины, что позволило минимизировать расход энергии затрачиваемой на подъем жидкости.

With the help of airlift the mathematical model of viscoplastic fluid extraction is developed. As a result the liquid-gas mixture properties changing along a borehole, that has allowed to minimize power consumption on liquid lifting is assigned.

Введение. Широко применяемый в практике разработки нефтяных и газовых месторождений насосный подъем жидкостей из земных недр на дневную поверхность сопряжен с большими затратами энергии. Кроме того, установка насосов в скважинах малого диаметра, используемых при освоении локальных месторождений жидких полезных ископаемых, приводит к их быстрому износу и становится неэффективной. Альтернативным способом добычи вязких жидкостей является компрессорная эксплуатация скважин с применением воздушных подъемников – эрлифтов. При этом подъем жидкости происходит посредством подающегося в сжатом виде и смешиваемого с ней газобразного рабочего агента (газа, воздуха или пара).

Повышение рентабельности добычи вязких жидкостей возможно путем сокращения непроизводительных энергетических затрат, возникающих при неадекватном учете изменения гидродинамических параметров лифтируемой смеси по высоте подъемных труб. Поэтому определение особенностей восходящего потока, вызванных неравномерным распределением давления вдоль ствола скважины, является актуальной научно-практической задачей.

Физические основы модели. Схема работы воздушного подъемника для откачки вязкопластичной жидкости, приведена на рис. 1. В скважины, через которые планируется производить ее отбор, спускаются два ряда насосно-компрессорных труб (НКТ). Внутренние трубы 1 служат для подачи воздуха через башмак эрлифта 2 к забою скважины 3, внешние 4 – для поднятия га-

зожидкостной смеси на поверхность.

При отсутствии отбора из скважины жидкость в НКТ и обсадной колонне будет находиться на одном уровне. При этом давление ее столба на забое скважины будет равно пластовому. Нагнетаемый по воздушной трубе воздух вытеснит из нее жидкость до башмака эрлифта, а затем начнет поступать в подъемную трубу, снижая тем самым плотность находящейся в ней жидкости, что приведет к ее подъему. При непрерывной подаче воздуха газожидкостная смесь поднимется до устья скважины и поступит в трубопроводы.

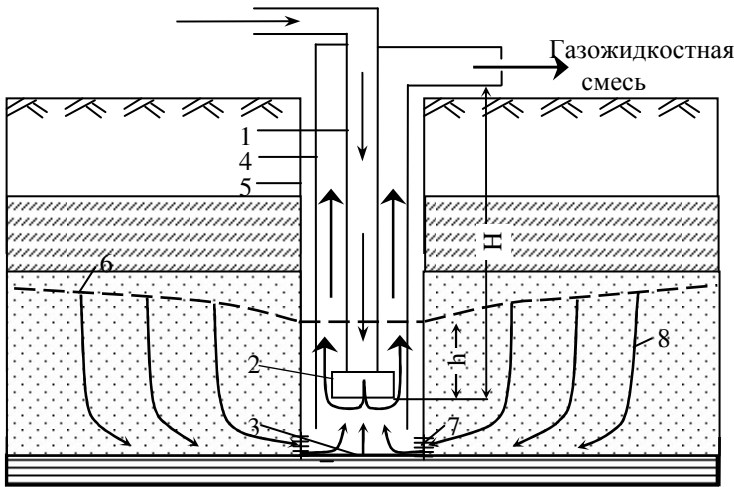


Рис. 1. Схема эрлифта для добычи вязкопластичной жидкости: 5 – обсадная колонна; 6 – динамический уровень; 7 – фильтр; 8 – направление течения жидкости

В месте входа газа в подъемную трубу в соответствии с его расходом устанавливается начальное давление (P_1). При этом давление на забое скважины будет пропорционально высоте столба жидкости от забоя до динамического уровня. В устье насосно-компрессорных труб, при выходе из нее смеси, также установится давление, равное давлению среды, в которой работает эрлифт (P_2). Таким образом, на находящуюся в подъемнике смесь будет постоянно действовать градиент давления, обуславливающий изменение ее гидродинамических параметров.

При составлении математической модели лифтирования вязкопластичной жидкости были приняты следующие допущения: 1) расширение газа происходит в изотермическом режиме вследствие значительного превышения теплоемкости жидкости над теплоемкостью газа; 2) газожидкостная смесь имеет четочный тип потока во всем диапазоне изменения расходов воздуха;

3) потери давления в эрлифте, вызванные местным сопротивлением и ускорением, не учитываются, ввиду доминирующего воздействия потерь, обусловленных гидростатическим столбом смеси и трением (98%) [1].

Методика моделирования. Для определения производительности эрлифта при откачке вязкой жидкости необходимо найти глубину погружения его башмака под динамический уровень (h , рис. 1), а также расход и давление закачиваемого газа. Этот расчет сводится к анализу различных вариантов значений, подлежащих определению величин, и построению кривых распределения давления с целью установления оптимального режима работы подъемника. При этом суммарный градиент потерь давления в нем можно определить из выражения:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \left(\frac{\partial P_{см}}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial P_{тр}}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где ∂P – общая потеря давления в подъемнике; $\partial P_{см}$, $\partial P_{тр}$ – потери давления, обусловленные гидростатическим столбом смеси и трением соответственно.

Потеря давления, вызванная силой тяжести на участке подъемной трубы длиной z_i (рис. 2), будет равна

$$\Delta P_{смi} = \Delta z_i \rho_{смi} g, \quad (2)$$

где $\rho_{см}$ – плотность газожидкостной смеси; g – ускорение свободного падения.

Зависимость плотности смеси от газосодержания потока имеет вид

$$\rho_{смi} = \rho_{жс} - \varphi_i (\rho_{жс} - \rho_{воз}), \quad (3)$$

в которой истинное объемное газосодержание потока определяется по соотношению [2]

$$\varphi_i = 0,833 \beta_i, \quad (4)$$

а объемное расходное газосодержание:

$$\beta_i = \frac{V_i}{Q + V_i}, \quad (5)$$

где $\rho_{воз}$, V и $\rho_{жс}$, Q – плотность, расход воздуха и жидкости соответственно.

При этом расход воздуха определяется из выражения

$$V = R_{зак} Q, \quad (6)$$

а его объем на участке z_i по закону Бойля-Мариотта:

$$P_i V_i = const, \quad (7)$$

где $R_{зак}$ – удельный расход воздуха на один куб. метр лифтируемой жидкости.

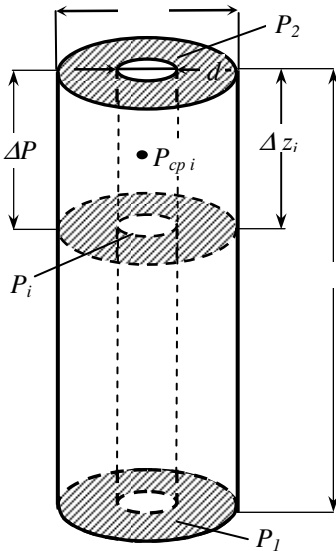


Рис. 2. Схема для расчета давления в насосно-компрессорных трубах эрлифта: D и d – внешний и внутренний диаметр НКТ; H – длина воздушного подъемника

Отличие между истинным и расходным газосодержанием потока объясняется превышением линейной скорости воздуха над скоростью смеси в подъемной трубе. При этом скорость смеси определяется из выражения

$$\omega_{см} = \frac{(Q + V)}{S}, \quad (8)$$

а превышение линейной скорости воздуха принимается равным

$$\omega_0 = 0,2\omega_{см}, \quad (9)$$

где S – площадь поперечного сечения подъемной трубы.

Для определения градиента потерь на трение потоком четочной структуры в подъемной трубе используется уравнение [3]

$$\Delta P_{mri} = \rho_{жс} g \Delta z_i \cdot \left[\frac{9,25 \cdot 10^{-7}}{D^{16/3}} V^2 + \frac{0,81 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[4]{\mu_{жс}}}{D^{4,75}} \cdot Q^{1,75} + m_{mp} (V \cdot Q)^K \right], \quad (10)$$

где m_{mp} – коэффициент трения, определяемый из выражения

$$m_{mp} = 1,1 \cdot 10^{-3} D^{-3} \sqrt[3]{Q \cdot \mu_{жс}^{0,025}}, \quad (11)$$

$\mu_{жс}$ – вязкость жидкости; K – коэффициент, зависящий от диаметра подъемной трубы [3].

Решение приведенных уравнений было произведено в программной среде MathCad. По рекомендациям [4] устанавливались внешние и внутренние диаметры НКТ и задавался удельный расход воздуха. После чего определялось распределение давления в подъемных трубах с учетом его закачки. Этот расчет производился путем численного суммирования всех приращений давления ΔP на каждом участке Δz_i подъемных труб, начиная от давления P_2 (рис. 2). Задав шаг изменения давления, определялось давление на конце первого шага, а также его среднее значение. При рассчитанном среднем давлении по уравнению (7) определялся объем воздуха на этом шаге. Затем по выражениям (4), (5), (8), (9) находилось истинное и расходное газосодержание потока, а также скорость смеси и газовой фазы. Плотность газо-

жидкостной смеси определялась из уравнения (3), а потери давления на трение – по зависимости (10). Зная общий перепад давления ΔP , а также найдя $\Delta P_{тр}$ и $\rho_{см}$ на этом шаге, по формулам (1), (2) определялась его длина Δz_i . Аналогично выполнялся расчет для других интервалов приращения длины между соседними сечениями НКТ.

Апробация методики. На рис. 3 приведены результаты расчета распределения давления в подъемной трубе эрлифта с учетом закачиваемого воздуха для следующих условий: $P_2 = 101325$ Па; $Q = 10$ м³/сут; $R_{зак} = 50$ м³/м³; $D = 0,15$ м; $d = 0,05$ м; $H = 60$ м; $\rho_{воз. норм. усл.} = 1,1$ кг/м³; $\mu_v = 10^{-2}$ Па·с; $\rho_{жс} = 840$ кг/м³. Полученная кривая (рис. 3; 4) совмещалась на одном графике с кривой, определенной по линейному закону распределения давления в трубах до момента закачки воздуха (рис. 3; 1). Точка их пересечения соответствует давлению у башмака эрлифта P_1 и глубине его погружения под динамический уровень h . Задаваясь диапазоном значений удельного расхода воздуха от 50 до 300 м³/м³ были определены соответствующие диапазоны h и P_1 (рис. 3; 2, 3).

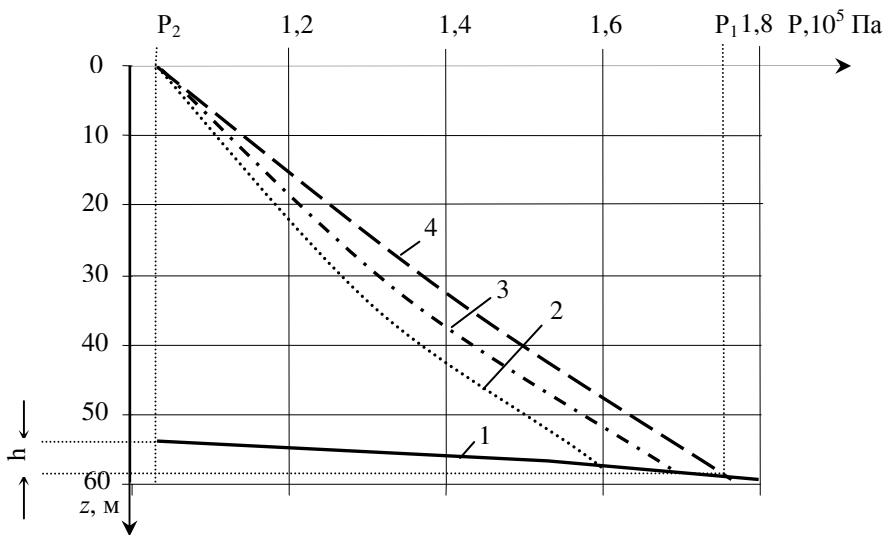


Рис. 3. Анализ кривых распределения давления вдоль ствола подъемных труб эрлифта:

1 – до подачи воздуха; 2, 3, 4 – после подачи с удельным расходом 300, 100 и 50 м³/м³

Для выбора рациональных технологических параметров эрлифта (h , P_1 , $R_{зак}$), характеризующихся минимумом подаваемой в скважину энергии на

единицу расхода жидкости, использовалось соотношение [1]

$$E_{\text{зак}} = R_{\text{зак}0} P_{\text{атм}} \ln \frac{P_1}{P_2}. \quad (12)$$

Вариация задаваемых параметров показала, что рациональный режим работы воздушного подъемника ($E_{\text{зак}} = 2,8$ МДж) в данных условиях достигается при удельном расходе закачиваемого воздуха $R_{\text{зак}0} = 50 \text{ м}^3$ и соответствующему ему давлению у башмака $P_1 = 1,75 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

На рис. 4 приведена безразмерная дебитная характеристика этого эрлифта в диапазоне относительных подач от $\bar{Q}_s = 0$ на восходящей ветви характеристики до $\bar{Q}_s = 0$ на нисходящей ветви, что соответствует расходам воздуха от барботажного до предельного. При ее построении в качестве базисных значений были приняты следующие расходы воздуха и продуктивности эрлифта: $V = 55,3 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $Q_s = 20 \text{ м}^3/\text{сут}$.

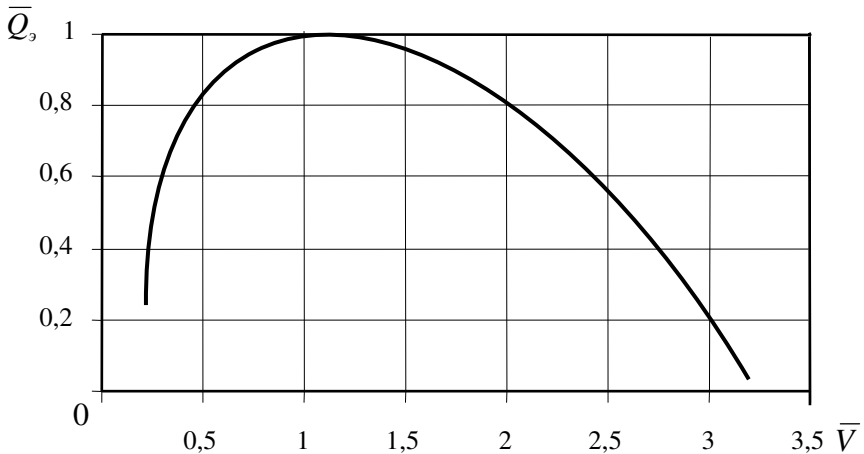


Рис. 4. Безразмерная дебитная характеристика эрлифта (Q_s) при подъеме вязкой жидкости подачей воздуха (V)

Для данного эрлифта в оптимальном режиме работы характерно увеличение объемного расходного газосодержания потока от $\beta = 0,61$ на уровне башмака до $\beta = 0,82$ на изливе (рис. 5). Истинное газосодержание вследствие превышения линейной скорости газа над скоростью смеси будет иметь меньшие значения, равные $\varphi = 0,51$ и $\varphi = 0,68$ соответственно.

Плотность газожидкостной смеси по мере ее подъема в трубах воздушно-

го подъемника уменьшится от $\rho_{см} = 399,5 \text{ кг/м}^3$ при $z = 57 \text{ м}$ до $\rho_{см} = 248,7 \text{ кг/м}^3$ при $z = 0$. При этом скорость воздуха, подаваемого через башмак эрлифта в НКТ, будет увеличиваться с 1,15 м/с на башмаке до 2,55 м/с на изливе. Приведенная скорость газожидкостной смеси увеличится с 0,9 до 2,3 м/с соответственно (рис. 6).

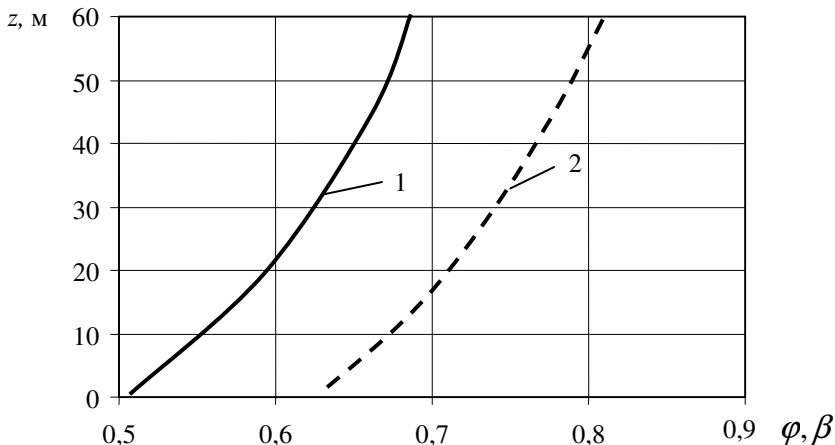


Рис. 5. Изменение газосодержания потока по высоте подъемной трубы эрлифта:

1 – истинного (φ); 2 – расходного (β)

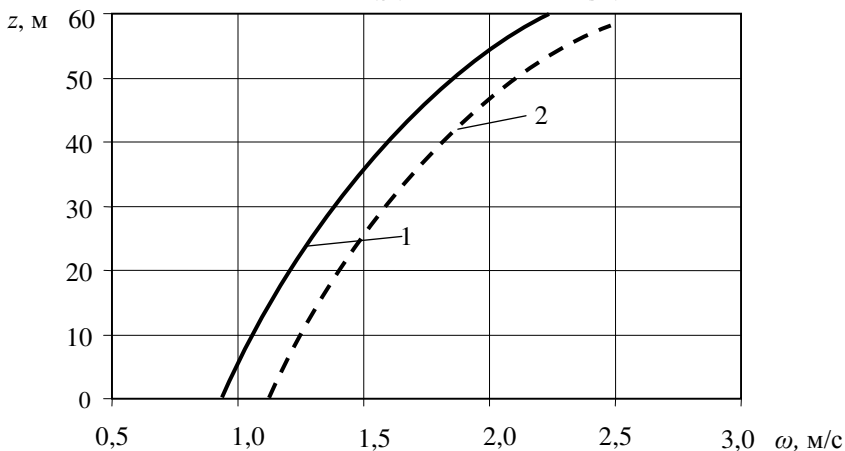


Рис. 6. Изменение скорости газожидкостной смеси и ее воздушной фазы по высоте

подъемной трубы эрлифта: 1 – $\omega_{см}$; 2 – $\omega_{воз}$

Выводы. С помощью обоснованной математической модели лифтирования вязкопластичной жидкости получены количественные распределения расходного и истинного газосодержания потока, плотности газожидкостной смеси и скоростей ее компонентов вдоль ствола скважины. Это позволило установить технологические параметры эрлифта и сепаратора, обеспечивающие поднятие смеси и ее разделение на жидкую и газовую фазу на рациональном режиме их работы. Данный режим существенно сократит энергетические затраты на подъем и переработку вязкой жидкости, что приведет к снижению ее себестоимости.

Представленные исследования выполнены при поддержке фонда гражданских исследований и развития CRDF США (грант № USB1-021-DP-07 Научно-образовательного центра НГУ).

1. Бойко В.С. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений: учеб. для вузов / В.С. Бойко. – М.: Недра, 1990. – 427 с. **2.** Давидсон В.Е. Основы гидравлического расчета эрлифта: учебное пособие / В.Е. Давидсон. – Днепропетровск: ДГУ, 1986. – 68 с. **3.** Мищенко И.Т. Теоретические основы подъема жидкости из скважин: Ч. 2 / И.Т. Мищенко. – М.: Изд-во МИНХ и ГП, 1977. – 81 с. **4.** Сидоров Н.А. Бурение и эксплуатация нефтяных и газовых скважин / Н.А. Сидоров. – М.: Недра, 1982. – 376 с.

Рецензент: д.т.н., профессор Власюк А. П. (НУВГП)