

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ДИАМЕТРА И ДЛИНЫ ПОДЪЁМНИКА ГАЗЛИФТНОЙ СКВАЖИНЫ

Ш. З. Исмаилов

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан

Multi-criteria selection of the diameter and length of the lift of gas-lift well

Sh. Z. Ismayilov

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

ABSTRACT

The problem of the optimal selection of the lift internal diameter and length used in gas-lift oil production method, with the optimal operating mode of the lift, is formulated as a two-criteria optimization problem with criteria and restrictions obtained on the basis of the equation of motion of a steady flow of fluid into the well. To solve the stated objective, the general problem of a multi-criteria problem with any finite number of criteria, constraints, and input independent variables is considered. A genetic algorithm for solving such a problem has been developed.

Keywords: well; gas-lift; oil production; optimal operating; algorithm.

© 2023 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

Введение

Газлифтный способ добычи нефти является одним из широко распространенных способов эксплуатации скважин. Количество жидкости, извлекаемое из скважины с помощью компрессорного подъемника, зависит от количества нагнетаемого сжатого газа, получаемого на компрессорных станциях. Эта зависимость меняется от глубины подъемных труб, от гидростатического напора пласта, от диаметра и длины подъемных труб, вязкости и удельного веса поднимаемой жидкости, количества выделяющегося из скважин газа, количества песка поступающего в скважину и других факторов. Многообразие этих факторов затрудняет теоретическое определение количества закачиваемого газа. Исследованию газлифтного способа добычи нефти посвящены многочисленные работы [1-9].

Так, например, в работе [5] исследовано влияние диаметра а подъемника на его характеристику, определяемую уравнением Крылова для движения газожидкостной смеси в элементарном подъемнике, и показано, что дебит жидкости для данного внутреннего диаметра d подъемника при постоянном расходе газа зависит только от параметра ξ суммарных потерь, к тому же при возрастании ξ растет и дебит. С учетом этой зависимости в [5] проведен анализ основных показателей работы подъемника: производительность подъемника q , удельный расход газа R_0 и удельный расход энергии W . Для режимов подачи подъемника, соответствующих дебитам q_{\max} и $q_{\text{опт}}$, получены функциональные зависимости этих показателей от

диаметра d и длины L подъемника $q = f_1(d, L)$, $R_0 = f_2(d, L)$, $W = f_3(d, L)$ причём при фиксированном $i \in I = \{1, 2, 3\}$ функции f_i зависят от режимов подачи (q_{\max} и $q_{\text{опт}}$).

На режиме q_{\max} для заданного диаметра подъемника получается максимальная производительность, а на режиме $q_{\text{опт}}$ – наибольший КПД работы газа, хотя и меньшая производительность.

Цель работы – разработка метода решения условной многокритериальной задачи выбора диаметра и длины газлифтного подъемника, используемого в скважинной добыче нефти, с применением в качестве критериев выбора основных показателей его работы при условиях рациональной эксплуатации скважины и высокой степени приемлемости решений.

Методы и средства исследования

Исследование скважин на приток обычно проводится методом установившегося потока. Установившийся поток характеризуется стационарным режимом работы скважины, т.е. постоянством во времени забойного $P_{\text{заб}}$ и устьевого P_y давлений и дебита скважины Q [4].

Переход одного стационарного режима на другой приводит к нестационарному процессу, наблюдаемому в системе за промежуток времени $t_{\text{пер}}$. При определении расхода газа, в случае когда подача подъемника q меньше дебита скважины Q , происходит подъём продукции скважины в затрубное пространство газлифтной установки, увеличение рабочего давления закачиваемого газа P_p и, соответственно, забойного давления $P_{\text{заб}}$, что приводит к снижению Q до величины q и установлению стационарного режима работы системы ($q = Q$). В случае когда рас-

ход газа таков, что $q > Q$, происходит снижение рабочего давления P_p и, соответственно, забойного давления $P_{зab}$, что приводит к увеличению Q и установлению стационарного режима ($q = Q$). Таким образом, путем изменения расхода закачиваемого в скважину газа и типа закачки газа (прямая и обратная) можно изменять рабочее давление P_p и следовательно, забойное давление $P_{зab}$ и дебит скважины Q , добываясь стационарного состояния системы.

В реальной практике абсолютно установившиеся потоки трудно представить, поскольку залежь эксплуатируется большим количеством интерферирующих друг с другом скважин с режимами работы, изменяющимися по целому ряду причин. Поэтому при исследовании скважин на стационарных режимах фактически принимается гипотеза квазистационарности (или псевдостационарности) режимов работы [7].

В связи с необходимостью выбора оборудования для компримирования газа практический интерес представляет расчет в конкретных условиях пускового давления $P_{пуск}$, под которым понимается максимальное давление закачиваемого газа, соответствующее оттеснению статического уровня жидкости в НКТ до башмака подъёмника. Для расчета значения $P_{пуск}$ используется зависимость [10]

$$P_{пуск} = \rho_{жg} h_n \left[1 + \frac{f_3}{f_6} (1 - K_n) \right] \quad (1)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³; h_n – погружение газлифтного подъёмника под статический уровень жидкости, м; K_n – коэффициент поглощения жидкости пластом $K_n = V_{жп}/V_{жст}$, $V_{жп}$ и $V_{жст}$ – соответственно объём жидкости, поглощенной пластом и вытесняемой жидкостью, соответственно; f_3 – площадь поперечного сечения межтрубного пространства, в которое закачивается газ, м² и f_6 – суммарная площадь поперечного сечения кольцевого пространства между обсадной колонной и воздушными трубами (затрубного пространства) и поперечного сечения подъёмника (площадь поперечного сечения того объёма, куда вытесняется жидкость). В реальных условиях $0 < K_n < 1$.

Для двухрядного подъёмника f_3 и f_6 определяются следующим образом. Для прямой закачки (или что то же, кольцевой системы закачки)

$$f_3 = 0.785(d_в^2 - d^2), f_6 = 0.785(D^2 - d_в^2 - d^2) \quad (2)$$

где $d_в$, d и D – соответственно, диаметр воздушных труб, подъёмника и обсадной колонны, м. Для обратной закачки (или что то же, центральной системы закачки)

$$f_3 = 0.785d^2, f_6 = 0.785(D^2 - d^2) \quad (3)$$

На рисунках 1-2 [6] изображена схема газлифтной скважины с двухрядным подъёмником. В неработающей скважине (рис. 1) жидкость в колонне насосно-компрессорных труб (НКТ) и в скважине находится на одном уровне (статический уровень; L – длина газлифтного подъёмника, h_1 – его погружение под статический уровень.

При установившейся работе скважины (рис. 2) жидкость в затрубном пространстве устанавливается на уровне (динамический уровень), ниже статического. Давление у башмака подъёмника $P_б$ определяется длиной подъёмника L и погружением его величины h под динамический уровень:

$$P_б = (L - h_d) \rho_{жg} = h \rho_{жg} \quad (4)$$

где $h_d = L - h$ – расстояние от динамического уровня до устья скважины.

Рабочее давление закачиваемого газа на устье скважины P_y при установившейся ее работе представляется формулой [6]:

$$P_y = P_б \cdot \exp\left(\frac{-0.031415 \cdot L \cdot \bar{\rho}_g}{zT}\right) + \Delta P_{тр} + \Delta P_{кл} \quad (5)$$

где $\bar{\rho}_g$ – относительная плотность газа по воздуху; z – коэффициент сжимаемости газа при средних давлении и температуре; T – температура, К; L – длина подъёмника, м; $\Delta P_{тр}$ – потери давления на трение (ввиду малых значений $\approx 6\%$ ими обычно пренебрегают); $\Delta P_{кл}$ – потери давления в клапане, определяемые по формуле $\Delta P_{кл} [(P_{к})_{от} - P_m] \cdot R$, $R = f_c / f_{сд}$, $f_{сд}$ – сечение седла клапана, f_c – площадь сечения сильфонной камеры клапана; $(P_{к})_{от}$ – давление в межтрубном пространстве перед открытием клапана; P_m – давление внутри клапана. Относительная плотность газа по воздуху $\bar{\rho}_g = 1.087$ кг/м³. Коэффициент сжимаемости вычисляется по формулам [10].

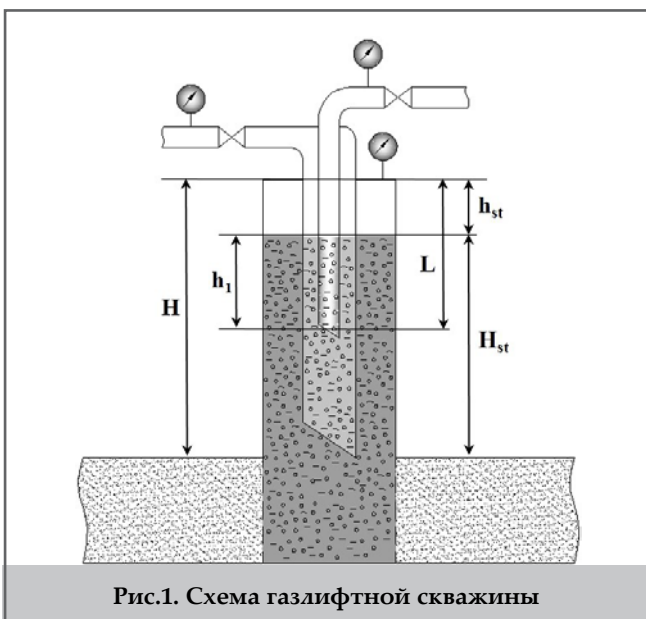


Рис.1. Схема газлифтной скважины

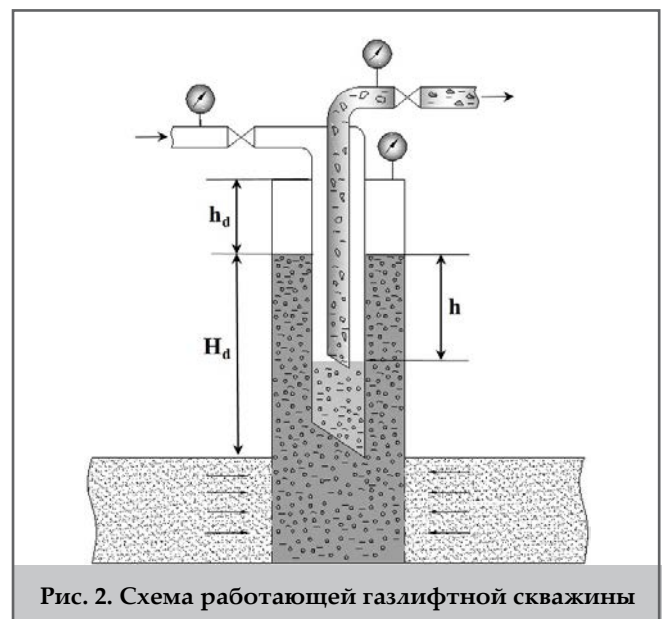


Рис. 2. Схема работающей газлифтной скважины

Как было указано выше, на режиме q_{\max} для заданного диаметра подъёмника получается максимальная производительность q , а на режиме $q_{\text{опт}}$ – наибольший КПД работы газа (хотя и меньшая производительность). Поэтому мы будем в дальнейшем исследовать основные зависимости для газлифтного подъёмника только при работе на режиме оптимальной подачи $q_{\text{опт}}$.

В [5] показано, что для режимов q_{\max} и $q_{\text{опт}}$ величины удельного расхода газа R_0 и удельного расхода энергии W при $(\rho_{ж}, h_0, d) = \text{const}$ и любом $\xi_0 \geq \xi_{0\text{мин}}$ удовлетворяют неравенствам $R_{0\text{опт}} > R_{0\text{макс}}$, $W_{\text{опт}} < W_{\text{макс}}$ причём $R_{0\text{макс}}$ и $W_{\text{макс}}$ убывают с возрастанием ξ_0 до некоторого предельного значения ($\xi_0 = 0.6$ для $R_{0\text{макс}}$ и $\xi_0 = 0.5$ для $W_{\text{макс}}$) (рис. 3), в то время как $R_{0\text{опт}}$ и $W_{\text{опт}}$ убывают с возрастанием ξ_0 для любых $\xi_0 \geq \xi_{0\text{мин}}$, что подчеркивает преимущества использования $R_{0\text{опт}}$ и $W_{\text{опт}}$ по сравнению с $R_{0\text{макс}}$ и $W_{\text{макс}}$.

Здесь $\xi_0 = P_1 / (\rho_{ж} g L)$, $P_1 = P_g$ – давление у башмака подъёмника, $\rho_{ж}$ – плотность жидкости (нефть), $h_0 = H - P_1 / (\rho_{ж} g)$, d – диаметр подъёмника.

В работе [10] для оптимального режима работы подъёмника $q_{\text{опт}}$ при любом давлении на устье скважины $P_y > 0$ приводятся выражения для дебита $q_{\text{опт}}$ (в т/сут), полученные Крыловым

$$q_{\text{опт}} = 15.625 \cdot 10^{-9} \frac{d^3 (\rho_{ж} g L - P_{\delta} + P_y) (P_{\delta} - P_y)^{1.5}}{\rho_{ж}^{1.5} \cdot L^{1.5}} \quad (6)$$

и соответствующие расчетные формулы для удельного расхода газа в ($\text{м}^3/\text{т}$)

$$R_{0\text{опт}} = \frac{1.227 \cdot 10^{-2} L (\rho_{ж} g L - P_{\delta} + P_y)}{d^{0.5} (P_{\delta} - P_y) \lg(P_{\delta} / P_y)} \quad (7)$$

и для удельного расхода энергии (в $\text{кДж}/\text{м}^3$)

$$W_{\text{опт}} = 0.6 \cdot 10^3 R_{0\text{опт}} \left[\left(\frac{P_m}{P_y} \right)^{0.167} - 1 \right] \quad (8)$$

где R_0 – удельный расход газа (в $\text{м}^3/\text{м}^3$); P_m и P_y – соответственно давления в колонне НКТ в точке ввода газа (на глубине башмака или рабочего клапана, т.е. $P_m = P_{\delta}$) и на устье скважины (в МПа); при этом принимается, что процесс расширения газа политропический (с показателем $n = 1.2$), а нормальное давление $P_0 \approx 1$ МПа.

Постановка задачи

Основными входными переменными задачи движения притока жидкости из скважины в газлифтную установку являются диаметр подъёмника d и его длина L , которые будем обозначать через x_1 и x_2 соответственно. Тогда, согласно (6), при оптимальном режиме работы подъёмника дебит $q_{\text{опт}}$ запишется в виде следующей функции от переменных x_1, x_2 :

$$q_{\text{опт}} \equiv q(x_1, x_2) = \frac{15.625 \cdot 10^{-9} x_1^3 (\rho_{ж} g x_2 - P_{\delta} + P_y) (P_{\delta} - P_y)^{1.5}}{\rho_{ж}^{1.5} \cdot x_2^{1.5}} \quad (9)$$

а удельный расход энергии в соответствии с (7) и (8) в виде

$$W_{\text{опт}} \equiv W_{\text{опт}}(x_1, x_2) = \frac{0.6 \cdot 10^3 \left[\left(\frac{P_{\delta}}{P_y} \right)^{0.167} - 1 \right] x_2 (\rho_{ж} g x_2 - P_{\delta} + P_y)}{x_1^{0.5} (P_{\delta} - P_y) \lg(P_{\delta} / P_y)} \quad (10)$$

при этом требуется максимизировать дебит $q_{\text{опт}}$ и минимизировать удельный расход. Обычно в теории много-

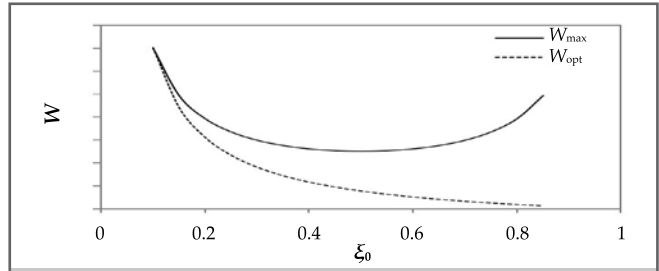


Рис. 3. Зависимости удельного расхода энергии W для режимов максимальной и оптимальной подачи подъёмника от величины относительного погружения ξ_0

критериальных задач все критериальные функции либо максимизируются или минимизируются, что легко достигается с учётом того, что для любой функции f , где переводит n -мерное евклидово пространство \mathcal{R}^n в одномерное \mathcal{R}^1 , $\max f(x) = \min(-f(x))$. Мы будем рассматривать векторный критерий $f(x) = (f_1(x), f_2(x))$, где $f_1(x) = -q_{\text{опт}}(x_1, x_2)$, $f_2(x) = W_{\text{опт}}(x_1, x_2)$ и обе функции минимизируются. Поскольку согласно (8) величина $W_{\text{опт}}$ прямо пропорциональна величине $R_{0\text{опт}}$, то минимизация функции $W_{\text{опт}}(x_1, x_2)$ по x_1, x_2 приводит к минимизации функции

$$R_{\text{опт}} \equiv R_{\text{опт}}(x_1, x_2) = \frac{1.227 \cdot 10^{-2} x_2 (\rho_{ж} g x_2 - P_{\delta} + P_y)}{x_1^{0.5} (P_{\delta} - P_y) \lg(P_{\delta} / P_y)} \quad (11)$$

Так что, достаточно вместо двух функций $W(x_1, x_2)$ и $R_{\text{опт}}(x_1, x_2)$ рассматривать только функцию $W_{\text{опт}}(x_1, x_2)$. Следовательно, в случае режима $q_{\text{опт}}$ можно рассматривать векторный критерий

$$\min \{z_1 = f_1(x), z_2 = f_2(x)\} \quad (12)$$

Определим теперь ограничения задачи для двухрядного подъёмника.

В отсутствие рабочего клапана и малых $\Delta P_{\text{тр}}$ из (2.5) следует

$$P_{\delta} \approx P_y \exp \left(- \frac{0.031415 \cdot x_2 \cdot \bar{\rho}_2}{zT} \right) \quad (13)$$

откуда находим

$$\frac{P_{\delta}}{P_y} = \exp \left(- \frac{0.031415 \cdot \bar{\rho}_2 \cdot x_2}{zT} \right) \quad (14)$$

и

$$P_{\delta} - P_y = P_y \left[\exp \left(- \frac{0.031415 \cdot \bar{\rho}_2 \cdot x_2}{zT} \right) - 1 \right] \quad (15)$$

Подставляя выражения (14) и (15) в формулы (9) и (10), приходим при известном P_y к следующим нелинейным функциям от x_1 и x_2 :

$$f_1(x) = - \frac{15.625 \cdot 10^{-9} x_1^3}{\rho_{ж}^{1.5} \cdot x_2^{1.5}} \left\{ \rho_{ж} g x_2 - P_y \left[\exp \left(- \frac{0.031415 \cdot \bar{\rho}_2 \cdot x_2}{zT} \right) - 1 \right] \right\} \times \times P_y^{1.5} \left[\exp \left(- \frac{0.031415 \cdot \bar{\rho}_2 \cdot x_2}{zT} \right) - 1 \right]^{1.5} \quad (16)$$

$$f_2(x) = 0.6 \cdot 10^3 \left[\exp \left(- \frac{0.5243 \cdot 10^{-2} \cdot \bar{\rho}_2 \cdot x_2}{zT} \right) - 1 \right] x_2 \times \times \left\{ \rho_{ж} g x_2 - P_y \left[\exp \left(- \frac{0.031415 \cdot \bar{\rho}_2 \cdot x_2}{zT} \right) - 1 \right] \right\} \times \times \frac{1}{x_2^{0.5} P_y \left[\exp \left(- \frac{0.031415 \cdot \bar{\rho}_2 \cdot x_2}{zT} \right) - 1 \right] \left(\frac{-0.015 x_2 \bar{\rho}_2}{zT} \right)} \quad (17)$$

Здесь $\bar{\rho}_i = 1.087 \text{ кг} / \text{м}^3$ – относительная плотность газа по воздуху; z – коэффициент сжимаемости газа. Таким образом, мы приходим к двухкритериальной задаче (12), где $x = (x_1, x_2)$ принадлежит области S двумерного евклидова пространства, определяемой ограничениями (с $m=8$)

$$g_l(x) \geq 0, \quad l=1, \dots, m \quad (18)$$

подробно описываемыми ниже. Забойное давление $P_{заб}$ удовлетворяет неравенствам:

$$P_{заб} - P_{нас} + \varepsilon \geq 0 \quad (19)$$

$$P_{нас} - P_{заб} > 0 \quad (20)$$

Полагая, что давление в резервуаре выше давления насыщения $P_{нас}$ и забойное давление $P_{заб}$ ниже $P_{нас}$, для псевдоустойчивого и двухфазного (нефть/газ) потока на основании модели Фогеля [7] забойное давление $P_{заб}$ выражается через дебит скважины Q по формуле

$$P_{заб} \equiv 0.125 \bar{P} \left[\sqrt{81 + \frac{144}{P_{нас}} \left(\bar{P} - P_{нас} - \frac{Q}{J^*} \right)} - 1 \right]$$

при условии, что $P_{заб} < P_{нас}$. Показатель J^* – индекс продуктивности (productivity index), называемый в русскоязычной литературе «коэффициентом продуктивности» $K_{прод}$ [5]: $J^* = Q / (P_1 - P_{заб})$. P_1 – давление в резервуаре, *psia*. Для псевдоустановившегося потока вокруг вертикальной скважины $J^* = Q / (\bar{P} - P_{заб})$, где \bar{P} – среднее давление в резервуаре.

Принимая во внимание, что в установившемся (стационарном) потоке $Q = q$, где $q_{опт}$ – подача продукции подъёмника при оптимальном режиме его работы, неравенства (19) и (20) запишутся в виде (18):

$$g_1(x) \equiv 0.125 \bar{P} \left[\sqrt{81 + \frac{144}{P_{нас}} \left(\bar{P} - P_{нас} + \frac{1}{J^*} \cdot f_1(x_1, x_2) \right)} - 1 \right] - P_{нас} + \varepsilon \geq 0 \quad (21)$$

$$g_2(x) \equiv P_{нас} - 0.125 \bar{P} \left[\sqrt{81 + \frac{144}{P_{нас}} \left(\bar{P} - P_{нас} + \frac{1}{J^*} \cdot f_1(x_1, x_2) \right)} - 1 \right] \varepsilon_1 \geq 0 \quad (22)$$

где ε и ε_1 – достаточно малые (не зависящие друг от друга) положительные числа.

Ограничение на забойное давление $P_{кр.заб}$ можно записать в виде:

$$g_3(x) \equiv 0.125 \bar{P} \left[\sqrt{81 + \frac{144}{P_{нас}} \left(\bar{P} - P_{нас} + \frac{1}{J^*} \cdot f_1(x_1, x_2) \right)} - 1 \right] - P_{заб.кр} \geq 0 \quad (23)$$

где $P_{заб.кр}$ выражается по формуле из [5] через газовый фактор G'_0 , отнесенный к 1 т продукции скважины (в $\text{м}^3/\text{т}$ сутки); $P_{нас}$ – давление насыщения (в МПа); $P_{пл}$ – пластовое давление (в МПа):

$$P_{заб.кр} = 3.5 + 68.33 \cdot 10^{-3} \cdot G'_0 \cdot \frac{P_{нас}}{P_{пл}} \text{ МПа}$$

Нижние и верхние границы дебита Q можно записать (с учётом $q=Q$) в виде

$$g_4(x) \equiv f_1(x_1, x_2) + \frac{\pi x_1^2}{4} (1 + 1.8 \cdot B) \geq 0 \quad (24)$$

$$g_5(x) \equiv \left(f_1(x_1, x_2) + \frac{\pi x_1^2}{4} \right) \geq 0 \quad (25)$$

где B – объёмная обводнённость продукции (в десятичных единицах).

Так как предпочтительным считается уменьшение пускового давления, что достигается большим снижением f_3 в сравнении с $f_{вр}$ с учётом выражений (2) и (3) для f_3 и f_3 в случае кольцевой системы закачки двухрядного подъёмника, получаем следующее ограничение:

$$g_6(x) \equiv \frac{D^2}{2} - d_o^2 + x_1^2 \geq 0 \quad (26)$$

где D и d_o – соответственно, диаметр обсадной колонны и диаметр воздушных труб колонны НКТ. Наконец, ограничения на длину подъёмника $P_{\delta}/(\rho_{ж} \cdot g) < L < H$, (P_{δ} – давление у башмака, H – высота подъёмника) запишутся как

$$g_7(x) \equiv x_2 - \frac{1}{\rho_{ж} \cdot g} \cdot P_y \exp \left(-\frac{0.031415 \cdot \bar{\rho}_i}{zT} \cdot x_2 \right) \geq 0 \quad (27)$$

$$g_8(x) \equiv H - x_2 \geq 0 \quad (28)$$

Условная многокритериальная задача минимизации в пространстве переменных $x = (x_1, \dots, x_n)$ формулируется следующим образом

$$\min f(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_q(x)\} \quad (29)$$

при ограничениях

$$x \in S = \left\{ x \in \mathbb{R}^n \mid g_l(x) \geq 0, \quad l=1, \dots, m, \quad x \geq 0 \right\} \quad (30)$$

(в случае задачи газлифтного подъёмника $n=2$, $x_1=d$, $x_2=L$, $q=2$, $m=8$).

Метод решения задачи

Приведем определение понятия недоминируемых решений многокритериальной задачи, удовлетворяющих соотношению (29).

По определению [11], точка z^0 критериального пространства Z из элементов $z = (z_1=f_1(x), \dots, z_q=f_q(x))$ называется недоминируемым решением задачи (29) тогда и только тогда, когда не существует какая-либо другая точка $z \in Z$, для которой

$$\left. \begin{aligned} z_k &< z_k^0 \text{ для некоторого } k \in \{1, 2, \dots, q\} \\ z_l &\leq z_l^0 \text{ для всех } l \neq k \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

В противном случае точка z^0 называется доминируемой точкой в критериальном пространстве Z .

Далее, точка $x^0 \in S$ называется эффективной тогда и только тогда, когда не существует какая-либо другая точка $x \in S$, для которой в случае многокритериальной задачи минимизации

$$\left. \begin{aligned} f_k(x) &< f_k(x^0) \text{ для некоторого } k \in \{1, 2, \dots, q\} \\ f_l(x) &\leq f_l(x^0) \text{ для всех } l \neq k \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

в противном случае точка x^0 называется неэффективной.

В генетических алгоритмах существенно используются Парето решения многокритериальной задачи оптимизации. По определению [11], точка z^0 называется Парето-решением тогда и только тогда, когда она является недоминируемой точкой относительно всех точек критериального пространства Z . Недоминируемое решение, после одной генерации генетического алгоритма, может стать доминируемым. Однако генетические алгоритмы дают наилучшую аппроксимацию Парето-решений, к тому же они предусматривают возможность избавления от доминируемых решений при формировании Парето-решений в каждой новой генерации алгоритма. Парето-решениям,

которые получаются выбором недоминируемых элементов исходной популяции, присваивается ранг1 (Rank1). После изъятия их из популяции в полученной усеченной популяции находится множество новых Парето-решений, которым присваивается ранг 2 (Rank 2) и т. д.

Для оценки приемлемости (fitness) элемента x популяции в работе [12] предлагается использовать взвешенную сумму критериев

$$z = \sum_{k=1}^q w_k f_k(x) \quad (33)$$

где w_k – случайные веса, определяемые формулой

$$w_k = \frac{r_k}{\sum_{k=1}^q w_k f_k(x)}, \quad k=1,2,\dots,q \quad (34)$$

где r_1, \dots, r_q – независимые случайные числа из интервала (0,1), определяемые RANDOM процедурой. Уравнением (33) можно определить приемлемость z_i каждого элемента популяции. Вероятность выбора i -элемента из популяции следует вычислять по формуле

$$p_i = \frac{|z_i - z_{\text{наихуд}}|}{\sum_{j=1}^{N_{\text{pop}}} |z_j - z_{\text{наихуд}}|} \quad (35)$$

где N_{pop} – размер популяции; $z_{\text{наихуд}} = z_{\text{min}}$ в случае многокритериальной задачи максимизации и $z_{\text{наихуд}} = z_{\text{max}}$ – в случае минимизации.

Численное решение задачи

Для численного решения многокритериальной задачи условной оптимизации (29)-(30) разработан генетический алгоритм с адаптацией выбора пар родителей в операции кроссовера (пересечения), реализации операции мутации (перемешивания) для генерации потомков и построения элитных (высокого качества) решений. Алгоритм состоит из пяти этапов.

Этап 1 (выбор начальной популяции). Для $t=1$ (– номер генерации алгоритма) строится популяция $pop(t)$ размера $N=N_{\text{pop}(t)}$ с помощью последовательности псевдослучайных чисел γ_k по методу Лемера [13] с индексами $\{k_{i,1}, \dots, k_{i,n}\}$ ($j=1, \dots, N$); n – размер вектора $x^j = (x_1^j, \dots, x_n^j)$, соответствующего элементу x^i популяции $pop(t)$.

Этап 2 (выбор пар родителей в операции «кроссовер»).

В обозначениях [11] через $c(x) = (c_1(x), \dots, c_l(x), \dots, c_m(x))$ обозначим вектор нарушений ограничений (3.22) в точке $x \in pop(t)$

Построим матрицы $G_1 = OBJ = [f_{ik}]$ ($i=1, \dots, N; k=1, \dots, q$), $G_2 = CON = [c_{il}]$ ($i=1, \dots, n; l=1, \dots, m$) и $G_3 = COM = [d_{ij}]$ ($i=1, \dots, N; j=1, \dots, k$), $d_{i,k+l} = c_{il}$ ($i=1, \dots, N; l=1, \dots, m$).

Каждая строка матрицы G_1, G_2, G_3 определяет i -компоненту n -размерных векторов RankOBJ, RankCon и RankCom. С помощью этих векторов выбирается родитель A и его партнер (B или C). Под RankG $G = G_j, j=1, 2, 3, \dots$ здесь понимается множество F_G Парето-оптимальных решений всех рангов $1, 2, \dots$, соответствующих матрице критериев A . Элементы A, B и C выбираются из множества F_{G_3} так, чтобы произведение $P_A \cdot P_B \cdot P_C$ вероятностей (4.5) для элементов A, B, C по матрице критериев F_{G_3} было наибольшим среди всех A, B, C из F_{G_3} . Для выбора для заданного родителя A партнера B или C вводятся множества ограничений $\{S_A\}, \{S_B\}$ и $\{S_C\}$, которые удовлетворяют элементы A, B и C ; и используются правила:

- 1) если $(\{S_A\} \cap \{S_B\}) \supset (\{S_A\} \cap \{S_C\})$, то партнер= C ;
- 2) если $(\{S_A\} \cap \{S_B\}) \subset (\{S_A\} \cap \{S_C\})$, то партнер= B ;
- 3) если $(\{S_A\} \cap \{S_B\}) = (\{S_A\} \cap \{S_C\})$, то выбор партнер выбирается из элементов B и C случайным образом с помощью рулетки или RANDOM процедуры.

Этап 3 (выполнение операций «кроссовер»). Для генерации потомка из двух родителей x_1 и x_2 , применим операцию «кроссовер-смеситель» (blend crossover) [14].

Этап 4 (выполнение операций «мутация»). Эту операцию можно выполнить по методу «неравномерной мутации» [15-17].

Этап 5 (построение элитных решений).

1. Для определения функции приемлемости (fitness function) f_i вводится функция отклонения $r(x) = \sum_{k=1}^q w_k |z_k(x) - z_k^*|$ где w_k – весовые коэффициенты из (4.1), $z_k(x) = f_k(x)$; $z_k^* = \min_{x \in S} f_k(x)$. Тогда функция f_i элемента x^i определяется как $f_i = eval(x^i)$, где

$$eval(x^i) = r_{\text{max}} - z(x) + \gamma / r_{\text{max}} - r_{\text{min}} + \gamma$$

γ – некоторое число в интервале (0,1), которое обычно выбирается случайным образом, но так чтобы знаменатель дроби в правой части не обращался в ноль, $r_{\text{max}} = \max_{x \in S} r(x), r_{\text{min}} = \min_{x \in S} r(x)$.

2. Обозначим через $F_0(t)$ множество элементов x^i из F_{G_2} для которых при заданном малом $\epsilon_1 > 0$ вероятными P_i , вычисленные по формуле (35) для матрицы критериев F_{G_2} удовлетворяют неравенству $|P_i - P_{\text{max}}| < \epsilon_1$, где $P_{\text{max}} = \max_{x^i \in F_{G_2}} P_i$. Из множества $F_0(t)$ выделяется подмножество элементов x , обозначим его $pop^{elita}(t)$, которое при заданном малом $\epsilon_2 > 0$ удовлетворяют неравенству:

Если $t < t_{\text{max}}$ (t_{max} – заданное максимальное число генераций алгоритма), то положим $t:t+1$ и переходим на этап 2. Иначе выводим на печать координаты всех элитных решений $pop^{elita}(t)$. Stop (конец алгоритма).

Выводы

Исследование скважин на приток обычно проводится методом установившегося потока. На практике, абсолютно установившиеся потоки трудно представить, поэтому принимается их квазистационарность (или псевдостационарность). Основными входными переменными задачи движения притока жидкости из скважины в газлифтную установку являются диаметр d и длина L подъёмника. Исходя из уравнения движения в элементарном подъёмнике, можно получить функциональные зависимости основных показателей работы подъёмника (производительность q , удельный расход газа R и удельный расход энергии W) от параметров d и L для длинного подъёмника. Рассматривается режим оптимальной подачи подъёмника $q_{\text{опт}}$, на котором получается наибольший КПД работы газа (хотя и меньшая производительность). Базируясь на зависимостях выходных показателей q, R, W от входных переменных d и L , составляются критерии многокритериальной (с двумя критериями) задачи минимизации с ограничениями, зависящими от двух переменных $x_1 = d$ и $x_2 = L$. Данная задача является частным случаем общей задачи многокритериальной оптимизации с q критериями, m ограничениями, n входными переменными $x = (x_1, \dots, x_n)$, и векторным критерием $minf(x) = f_1(x), f_2(x), \dots, f_q(x)$, к которой приводится любая многокритериальная задача. Для решения этой задачи предложен специально разработанный генетический алгоритм.

Литература

1. Данхэм, К. (2014). Газлифтная эксплуатация: последние достижения. *ROGTEC. Российские нефтегазовые технологии*, 4(10), 66-72.
2. (1994). Gas lift. Book 6 of the vocational training series. Third edition. *Explication & Production Department, American Petroleum Institute.*
3. (1999). Gas lift design and technology. Well completions and productivity chevron main pass 313 optimization project 09/12/00. *Schlumberger.*
4. Salem, A. S. (2009). Petroleum production engineering 2. (PTE 431). Lectures 10-12. Principle of gas-lift system.
5. Мищенко, И. Т. (2003) Скважинная добыча нефти: Учебное пособие для вузов. Москва: «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина.
6. Середа, Н. Г., Сахаров, В. А., Тимашев, А. Н. (1986). Спутник нефтяника и газовика. Справочник. Москва: Недра.
7. Guo, B., Lyons, W. C., Ghalamber, A. (2007) Petroleum production engineering. A computer-assisted approach. *Elsevier Science & Technology Books.*
8. Abdullayev, V. C. (2022). Qazlift quyuları üçün xüsusi sərf tənzimləyici quyudaxili qurğu. *Scientific Petroleum*, 1, 46-51.
9. Abdullayev, V. C. (2021). Maili və şaquli qazlift quyularının istismar xüsusiyyətlərinin müqayisəli araşdırılması və təzyiç gradientinin təsirinin öyrənilməsi. *Scientific Petroleum*, 1, 48-57.
10. Мищенко, И. Т. (2008). Расчеты при добыче нефти и газа. Москва: «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина.
11. Ray, T., Kang, T. and Chye S. K. (2000, July). An evolutionary algorithm for constrained optimization. In: *Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO '00).*
12. Murata, T. (1996) Genetic algorithms for multiobjective optimization. Thesis PhD. University of Osaka Prefecture.
13. Соболев, И. М. (1973). Численные методы Монте-Карло. Москва: Наука.
14. Eshelman, L. J., Schaffer, J. D. (1993) Real-coded genetic algorithms and interval-schemata. *Foundations of Genetic Algorithms*, 2, 187-202.
15. Michalewicz, Z. (1996) Genetic algorithm + Data structure = Evolution program. *New York: Springer-Verling.*
16. Suleimanov, B. A., Dyshin, O. A. (2013). Application of discrete wavelet transform to the solution of boundary value problems for quasi-linear parabolic equations. *Applied Mathematics and Computation*, 219, 7036-7047.
17. Сулейманов, Б. А., Аббасов, Э. М., Дышин, О. А. (2008). Вейвлет- метод решения задачи нестационарной фильтрации с разрывными коэффициентами. *Журнал вычислительной математики и математической физики*, 48(12), 2163-2179.

References

1. Dunham, C. (2014). Gas-lift: the state of the art. *ROGTEC. Russian Oil and Gas Technologies*, 4(10), 66-72.
2. (1994). Gas lift. Book 6 of the vocational training series. Third edition. *Explication & Production Department, American Petroleum Institute.*
3. (1999). Gas lift design and technology. Well completions and productivity chevron main pass 313 optimization project 09/12/00. *Schlumberger.*
4. Salem, A. S. (2009). Petroleum production engineering 2. (PTE 431). Lectures 10-12. Principle of gas-lift system.
5. Mishchenko, I. T. (2003). Borehole oil production. *Moscow: «Oil and Gas» Gubkin Russian state University of Oil and Gas.*
6. Sereda, N. G., Sakharov, V. A., Timashev, A. N. (1986). Manual for oil and gas industry workers. *Moscow: Nedra.*
7. Guo, B., Lyons, W. C., Ghalamber, A. (2007) Petroleum production engineering. A computer-assisted approach. *Elsevier Science & Technology Books.*
8. Abdullayev, V. J. (2022). Comparative study of the operational properties of deviated and straight gas-lift wells and sensitivity analysis of pressure gradient. *Scientific Petroleum*, 1, 46-51.
9. Abdullayev, V. J. (2021). Comparative study of the operational properties of deviated and straight gas-lift wells and sensitivity analysis of pressure gradient. *Scientific Petroleum*, 1, 48-57.
10. Mishchenko, I. T. (2008). Calculations in oil and gas production. *Moscow: «Oil and Gas» Gubkin Russian state University of Oil and Gas.*
11. Ray, T., Kang, T. and Chye S. K. (2000, July). An evolutionary algorithm for constrained optimization. In: *Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO '00).*
12. Murata, T. (1996) Genetic algorithms for multiobjective optimization. Thesis PhD. University of Osaka Prefecture.
13. Sobol, I. M. (1973). Monte Carlo numerical methods. *Moscow: Nauka.*
14. Eshelman, L. J., Schaffer, J. D. (1993) Real-coded genetic algorithms and interval-schemata. *Foundations of Genetic Algorithms*, 2, 187-202.
15. Michalewicz, Z. (1996) Genetic algorithm + Data structure = Evolution program. *New York: Springer-Verling.*
16. Suleimanov, B. A., Dyshin, O. A. (2013). Application of discrete wavelet transform to the solution of boundary value problems for quasi-linear parabolic equations. *Applied Mathematics and Computation*, 219, 7036-7047.
17. Suleimanov, B. A., Abbasov, E. M., Dyshin, O. A. (2008). Wavelet method for solving the unsteady porous-medium flow problem with discontinuous coefficients. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 48(12), 2194-2210.

Многокритериальный выбор диаметра и длины подъемника газлифтной скважины

Ш. З. Исмаилов

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан

Реферат

Задача оптимального выбора внутреннего диаметра и длины подъемника, используемых при газлифтной добыче нефти, при оптимальном режиме работы подъемника сформулирована в виде двухкритериальной задачи оптимизации с критериями и ограничениями, полученными на основе уравнения движения установившегося притока жидкости в скважину. Для решения поставленной задачи рассмотрена общая задача многокритериальной задачи с любым конечным числом критериев, ограничений и входных независимых переменных. Разработан генетический алгоритм решения такой задачи.

Ключевые слова: скважина; газлифт; добыча нефти; режим работы; алгоритм.

Qazlift quyusunun qaldırıcısının diametrinin və uzunluğunun çoxmeyarlı seçimi

Ş. Z. İsmaylov

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, Bakı, Azərbaycan

Xülasə

Qazlift üsulu ilə neftçixarmada istifadə olunan qaldırıcının daxili diametrinin və uzunluğunun optimal seçilməsi məsələsi, qaldırıcının optimal iş rejimində, quyuya qərarlaşmış maye axınının hərəkəti tənliyi əsasında əldə edilən meyarlar və məhdudiyyətlərlə iki meyarlı optimallaşdırma məsələsi şəklində tərtib edilmişdir. Qoyulan məsələnin həlli üçün meyarların, məhdudiyyətlərin və giriş müstəqil dəyişənlərin hər hansı bir son ədədi ilə çox meyarlı məsələnin ümumi vəzifəsi nəzərdən keçirilir. Belə bir problemin həlli üçün genetik alqoritm işlənmişdir.

Açar sözlər: quyu; qazlift; neft hasilatı; iş rejimi; alqoritm.