ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ УПОРЯДОЧИВАНИЯ ПЕРЕЧНЯ ГЕОЛОГО-ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ

Базовкин А. В.[1]
(*СамараНИПИнефть, Самара*)

Рассматривается проблема, стоящая перед нефтегазодобывающими предприятиями, связанная с оптимальным распределением по месяцам календарного года технических мероприятий, направленных на поддержание добычи нефти и газа. В статье даётся математическая постановка данной задачи, которая предусматривает равномерность распределения таких мероприятий по году, монотонное убывание их стартовых дебитов, возможность запрета проведения мероприятий в отдельные месяцы (например, в силу дорожных условий), а также возможность жёстко зафиксировать месяц проведения отдельных мероприятий в силу производственных причин. Предлагаемая в статье математическая постановка данной задачи представляет собой задачу нелинейного булева программирования. Для её решения предложен гибридный стохастическо-эвристический алгоритм. Стохастический подход реализован на этапе формирования матрицы распределения числа мероприятий по месяцам года, а эвристический – на этапе распределения конкретных мероприятий по месяцам года. В завершении статьи приведены результаты тестовых расчётов.

Ключевые слова: производственное планирование, оптимизация, перечень ГТМ, нелинейное программирование.

1. Введение

Для поддержания добычи нефти и газа на более высоком уровне при разработке месторождений обычно проводится комплекс геолого-технических мероприятий (ГТМ). Эти мероприятия могут быть направлены на интенсификацию притока к скважине, на вовлечение новых дренируемых запасов, на поддержание пластового давления и т.д. Перечень ГТМ формируется на основе анализа текущего состояния разработки пласта, технического состояния скважин, экономической эффективности и других существенных факторов [1, 2, 4–6]. Для обеспечения качественного планирования производственных показателей в добывающей компании перечень ГТМ формируется на годы

---

[1] *Андрей Владимирович Базовкин*, *к.ф.-м.н.* (*BazovkinAV@samnipineft.ru*).

вперёд и насчитывает иногда тысячи мероприятий. На предварительном этапе обычно для большинства мероприятий задаётся только год их выполнения. Определение точных дат проведения отдельных мероприятий является одним из заключительных «штрихов» при формировании перечня. В настоящей работе рассматривается проблема распределения мероприятий по месяцам года и предлагается математический метод её решения.

2. Постановка задачи

2.1. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Пусть имеется предприятие, занимающееся добычей углеводородного сырья. Внутри данного предприятия выделены подразделения, называемые цехами добычи, которые ведут свою деятельность на закреплённых за ними месторождениях.

Пусть имеется перечень ГТМ, который включает о каждом мероприятии информацию: номер цеха добычи, стартовый дебит нефти (прирост дебита), дата проведения – точная или с указанием одного только года. Будем полагать, что стартовый дебит нефти есть известная величина, не зависящая от даты проведения мероприятия (в пределах указанного года). Обычно перечень ГТМ содержит мероприятия различного типа: бурение скважин и боковых стволов, изменение интервалов перфораций, гидроразрыв пласта, вывод скважины из бездействия и т.д. Требуется упорядочить мероприятия каждого типа по соответствующему году так, чтобы:

– по каждому цеху добычи ГТМ одного типа были распределены равномерно в течение года;

– среднемесячный стартовый дебит нефти по добывающему предприятию монотонно убывал в течение года.

Под «среднемесячным стартовым дебитом» понимается среднее арифметическое стартовых дебитов мероприятий, запланированных на данный месяц. Первое условие выглядит естественно в силу того, что для выполнения ГТМ одного типа требуются специализированные бригады рабочих с соответствующим оборудованием. Второе условие вытекает из широко используемой экономической модели, предполагающей, что рост цен[1] на нефть происходит более медленно по сравнению с процентной ставкой альтернативного безрискового размещения капитала, в связи с чем экономически выгодно иметь более высокую добычу в более ранний период.

Дополнительно предусмотрим возможность запрета проведения мероприятий в определённые месяцы (например, в связи с дорожными условиями). Кроме того, в силу производственных причин иногда дата проведения конкретного мероприятия фиксирована и не может быть изменена. Это обстоятельство также будет учтено.

Отметим, что в рассматриваемой постановке не учитывается стоимость мероприятий. Это связано с тем, что обычно на этапе планирования стоимость мероприятий одного типа предполагается одинаковой и определяется на основе осреднённых показателей. В частности это справедливо для таких типов мероприятий как гидроразрыв пласта, изменение интервалов перфорации, вывод скважины из бездействия, расконсервация скважины. Для мероприятий, связанных с бурением (новые скважины, боковые стволы), стоимость зависит от глубины бурения и длины проходки. В последнем случае может возникнуть необходимость рассмотрения постановки оптимизационной задачи с учётом стоимости работ. Впрочем, если глубины скважин приблизительно равны, то и в этом случае различиями в стоимостях работ можно пренебречь.

2.2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ

Упорядочивание перечня ГТМ будем осуществлять независимо по типам мероприятий и годам их планируемого выполнения. Поэтому будем считать, что далее речь идёт о мероприятиях одного типа, запланированных на один и тот же год. Месяцем выполнения ГТМ назовём месяц даты окончания данного мероприятия. Пусть в перечне ГТМ имеется m мероприятий, месяц выполнения которых в пределах года допустимо варьировать.

[1] *Точнее рост чистого денежного потока, включающий не только доход от продажи нефти, но и сопутствующие капитальные, операционные затраты и др.*

Обозначим p_i – порядковый месяц в году, в который предлагается выполнение i-го мероприятия. Определим

$$(1)\quad x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } j = p_i, \\ 0 & \text{иначе}; \end{cases}$$

где $i = 1, \ldots, m$, $j = 1, \ldots, 12$. Пусть q_i – стартовый дебит нефти i-го ГТМ, тогда среднемесячный стартовый дебит в j-й месяц равен

$$(2)\quad q_j^{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^{m} x_{i,j} q_i + \sum_{i=1}^{\underline{m}} \underline{x_{i,j}}\,\underline{q_i}}{\sum_{i=1}^{m} x_{i,j} + \sum_{i=1}^{\underline{m}} \underline{x_{i,j}}},$$

где символы с нижним подчёркиванием относятся к мероприятиям с зафиксированной датой проведения ($\underline{m}$ – общее число таких мероприятий). Задачу упорядочивания перечня можно сформулировать как поиск такой матрицы x с элементами $x_{i,j}$, которая доставляет минимум функционалу

$$(3)\quad F(x) = \sum_{j=1}^{12} \left(q_j^{\text{ср}} - \tilde{q}_j\right)^2 \longrightarrow \min$$

где $\tilde{q}_j$ – значения некоторой наперёд заданной монотонно убывающей функции, к виду которой мы бы хотели приблизить распределение средних стартовых дебитов.

Определим

$$(4)\quad y_{i,k} = \begin{cases} 1, & \text{мероприятие } i \text{ выполняется цехом } k, \\ 0 & \text{иначе}; \end{cases}$$

где $k = 1, \ldots, N_C$, N_C – число цехов добычи. Условие равномерности распределения мероприятий в течение года для данного цеха добычи можно записать в виде

$$(5)\quad \begin{cases} \sum_{i=1}^{m} x_{i,j} y_{i,k} + \sum_{i=1}^{\underline{m}} \underline{x_{i,j}}\,\underline{y_{i,k}} \le \left\lfloor \dfrac{m_k + \underline{\underline{m_k}}}{12 - |R|} \right\rfloor + 1, & \sum_{i=1}^{m} \underline{x_{i,j}}\,\underline{y_{i,k}} \le \left\lfloor \dfrac{m_k + \underline{\underline{m_k}}}{12 - |R|} \right\rfloor, \\ \sum_{i=1}^{m} x_{i,j} y_{i,k} = 0, & \text{иначе}; \end{cases}$$

где $\lfloor\ \rfloor$ – означает взятие целой части; $m_k = \sum y_{i,k}$ – число мероприятий, выполняемых k-м цехом, месяц проведения которых дозволено менять в пределах года; $\underline{m_k}=\sum \underline{y_{i,k}}$ – число мероприятий, выполняемых k-м цехом и месяц проведения которых фиксирован; R – множество номеров тех месяцев года, в которые мероприятия не могут выполняться в силу технических ограничений; $|R|$– мощность множества R, т.е. количество содержащихся в нём элементов. Уравнения (3), (5) следует дополнить условиями

(6) $$\sum_{i=1}^{m} x_{i,r} = 0, r \in R ,$$

(7) $$\sum_{j=1}^{12} x_{i,j} = 1 .$$

Условие (6) означает запрет проведения мероприятий в указанные месяцы, условие (7) означает, что i-е мероприятие должно быть выполнено в один из месяцев года.

3. Метод решения

Выражение (3) с ограничениями (5)–(7) представляет собой нелинейную оптимизационную задачу. Для решения подобных задач широко используются стохастические [7, 11] и эвристические подходы [3, 8, 9, 10, 12]. Эти методы универсальны в своём применении, но не гарантируют нахождение глобального минимума. Впрочем, обычно они позволяют улучшить некое начальное решение (например, предложенное человеком), что оправдывает их применение с практической точки зрения.

Для решения задачи (3), (5)–(7) разработан гибридный алгоритм, включающий как стохастические, так и эвристические компоненты. На первых двух шагах алгоритма формируется матрица распределения числа мероприятий по месяцам года, элементы которой обозначим $n_{k,j}$ (первый индекс соответствует номеру цеха, второй – порядковому номеру месяца в году). Условие (5) допускает некоторый произвол в распределении мероприятий по месяцам года, поэтому на шаге 2 используется стохастический подход. На шаге 3 происходит распределение мероприятий по месяцам года, так чтобы число распределяемых мероприятий в j-й месяц для цеха k равнялось $n_{k,j}$. На шаге 4 выполняется процедура перестановки мероприятий между месяцами внутри каждого цеха с целью уменьшения целевой функции F.

Шаг 1. Сформируем матрицу месяцев года, в которые запрещается распределять мероприятия. Для этого используем рекуррентную процедуру

(8) $$n_{k,j}^{tabu,0} = \begin{cases} 1, & j \in R, \\ 0 & \text{иначе}; \end{cases}$$

(9) $$N_k^p = \left\lfloor \frac{m_k + \left(\underline{m_k} - \sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^{m} \underline{x_{i,j}}\, \underline{y_{i,k}}\, n_{k,j}^{tabu,p-1} \right)}{12 - \sum_{j=1}^{12} n_{k,j}^{tabu,p-1}} \right\rfloor,$$

(10) $$n_{k,j}^{tabu,p+1/2} = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^{m} \underline{x_{i,j}}\, \underline{y_{i,k}} > N_k^p, \\ 0 & \text{иначе}; \end{cases}$$

(11) $$n_{k,j}^{tabu,p+1} = n_{k,j}^{tabu,p+1/2} + n_{k,j}^{tabu,0} - n_{k,j}^{tabu,p+1/2} n_{k,j}^{tabu,0}\ ,$$

где N_k^p – среднее арифметическое число мероприятий в месяцах, доступных для распределения. Смысл приведённых формул следующий. На нулевом шаге $n_{k,j}^{tabu,0}$ принимается равным 1 в те месяцы j, в которые запрещено распределять мероприятия по техническим причинам (6). На последующих шагах элементы матрицы $n_{k,j}^{tabu,p}$ дополнительно принимают значения 1 в те месяцы, в которые число априори распределённых мероприятий превышает среднемесячное число мероприятий, причём при определении последнего не учитываются месяцы, запрещённые к распределению мероприятий на предыдущих шагах, т.е. для которых $n_{k,j}^{tabu,p-1} = 1$. Шаг (11) выполняет функцию корректора, восстанавливая выполнение условия (6). Число шагов, необходимое при выполнении процедуры (9)–(11) может составить от 1 до 11, в зависимости от данных задачи, где число 11 соответствует максимальному последовательному исключению 11 месяцев. Для простоты описания алгоритма будем считать, что процедура выполняется 11 раз, при этом, возможно, на последних шагах матрица $n_{k,j}^{tabu,p}$ остаётся неизменной. Обозначим

$$n_{k,j}^{tabu} = n_{k,j}^{tabu,11},\ N_k = N_k^{11}.$$

Запретим распределение мероприятий в месяцы j, в которые $n_{k,j}^{tabu} = 1$, что обеспечит выполнение условия (6) и второй части условия (5). Число мероприятий, гарантированно распределяемое в j-й месяц для цеха k:

$$n_{k,j}^{0} = \left(\lfloor N_k \rfloor - \sum_{i=1}^{\underline{m}} \underline{x_{i,j}}\,\underline{y_{i,k}}\right)\left(1 - n_{k,j}^{tabu}\right). \tag{12}$$

Обнуляем значение счётчика внешних итераций $I_{\text{внеш}} = 0$ (смысл переменной $I_{\text{внеш}}$ прояснится на шаге 5).

Шаг 2. Для каждого цеха оставшиеся $m_k - \sum_{j=1}^{12} n_{k,j}^{0}$ мероприятий распределяются случайным образом по одному между месяцами, для которых

$$\sum_{i=1}^{\underline{m}} \underline{x_{i,j}}\,\underline{y_{i,k}} \le N_k \text{ и } n_{k,j}^{tabu} = 0.$$

Таких месяцев достаточное количество, так как число мероприятий, которое необходимо распределить, равно

$$m_k - \sum_{j=1}^{12} n_{k,j}^{0} = m_k - \sum_{j=1}^{12}\left(\lfloor N_k \rfloor - \sum_{i=1}^{\underline{m}} \underline{x_{i,j}}\,\underline{y_{i,k}}\right)\left(1 - n_{k,j}^{tabu}\right) =$$

$$= m_k - \left(\lfloor N_k \rfloor\left(12 - \sum_{j=1}^{12} n_{k,j}^{tabu}\right) - \sum_{j=1}^{12}\sum_{i=1}^{\underline{m}} \underline{x_{i,j}}\,\underline{y_{i,k}}\left(1 - n_{k,j}^{tabu}\right)\right) =,$$

$$= m_k - \left(\left\lfloor \frac{m_k + \alpha}{\beta} \right\rfloor \beta - \alpha\right),$$

где

$$\alpha = \underline{m_k} - \sum_{j=1}^{12}\sum_{i=1}^{m} \underline{x_{i,j}}\,\underline{y_{i,k}}\, n_{k,j}^{tabu} = \sum_{j=1}^{12}\sum_{i=1}^{m} \underline{x_{i,j}}\,\underline{y_{i,k}}\left(1 - n_{k,j}^{tabu}\right),$$

$$\beta = 12 - \sum_{j=1}^{12} n_{k,j}^{tabu} .$$

Теперь нетрудно показать, что $m_k - \left(\left\lfloor \dfrac{m_k + \alpha}{\beta} \right\rfloor \beta - \alpha \right) \le \beta$, чем и доказывается существование необходимого числа месяцев для распределения оставшихся мероприятий.

Таким образом, число мероприятий, распределяемых на j-й месяц, равно:

(13) $n_{k,j} = n_{k,j}^0 + \delta_{k,j}$,

где

$$\delta_{k,j} = \begin{cases} 0 \vee 1, & \sum_{i=1}^{\underline{m}} \underline{x_{i,j}}\,\underline{y_{i,k}} \le N_k \text{ , } n_{k,j}^{tabu} = 0, \\ 0 & \text{иначе;} \end{cases}$$

$$\sum_{j=1}^{12} \delta_{k,j} = m_k - \sum_{j=1}^{12} n_{k,j}^0 .$$

Покажем, что подобное распределение мероприятий по году удовлетворяет первой части условия (5). В соответствии с (12), (13) для месяцев j таких, что $n_{k,j}^{tabu} = 0$, выполняется:

(14) $\sum_{i=1}^{m} x_{i,j} y_{i,k} + \sum_{i=1}^{\underline{m}} \underline{x_{i,j}}\,\underline{y_{i,k}} = n_{k,j} + \sum_{i=1}^{\underline{m}} \underline{x_{i,j}}\,\underline{y_{i,k}} \le \lfloor N_k \rfloor + 1.$

Покажем, что последовательность N_k^p, p=1,…,11 монотонно не возрастает. Действительно, $N_k^p = \lfloor (m_k + \alpha^p) / \beta^p \rfloor$, где

$$\alpha^p = \underline{m_k} - \sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^{\underline{m}} \underline{x_{i,j}}\,\underline{y_{i,k}}\, n_{k,j}^{tabu,p-1} ,$$

$$\beta^p = 12 - \sum_{j=1}^{12} n_{k,j}^{tabu,p-1} .$$

Тогда N_k^{p+1} будет иметь вид[1]

[1] *Другой возможный случай $N_k^{p+1} = N_k^p$ тривиален.*

$$N_k^{p+1} = \left\lfloor (m_k + \alpha^p - \sum_{j=1}^{12} a_j)/(\beta^p - \sum_{j=1}^{12} b_j) \right\rfloor, \text{ где}$$

$a_j = \sum_{i=1}^{m} \underline{x_{i,j}}\, \underline{y_{i,k}} \left(n_{k,p_i}^{tabu,p+1} - n_{k,p_i}^{tabu,p} \right)$ – число априори распределённых мероприятий в месяцы, исключаемые на шаге $p + 1$ по формуле (10), $b_j = \sum_{j=1}^{12} \left(n_{k,j}^{tabu,p+1} - n_{k,j}^{tabu,p} \right)$ – число соответствующих месяцев. В силу (10) a_j удовлетворяет условию $a_i > N_k^p = \lfloor (m_k + \alpha^p)/\beta^p \rfloor$, откуда

$$N_k^{p+1} = \left\lfloor \frac{m_k + \alpha^p - \sum_{j=1}^{12} a_j}{\beta^p - \sum_{j=1}^{12} b_j} \right\rfloor \le \left\lfloor \frac{m_k + \alpha^p - \left(\left\lfloor \frac{m_k + \alpha^p}{\beta^p} \right\rfloor + 1 \right) \sum_{j=1}^{12} b_j}{\beta^p - \sum_{j=1}^{12} b_j} \right\rfloor \le$$

$$\le \left\lfloor \frac{m_k + \alpha^p - \frac{m_k + \alpha^p}{\beta^p} \sum_{j=1}^{12} b_j}{\beta^p - \sum_{j=1}^{12} b_j} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{m_k + \alpha^p}{\beta^p} \right\rfloor = N_k^p.$$

Из (14) с учётом последнего неравенства имеем

$$\sum_{i=1}^{m} x_{i,j} y_{i,k} + \sum_{i=1}^{m} \underline{x_{i,j}}\, \underline{y_{i,k}} \le \lfloor N_k \rfloor + 1 \le \lfloor N_k^1 \rfloor + 1,$$

что означает выполнение условия (5).

Теперь матрица распределения числа мероприятий по месяцам года $n_{k,j}$ сформирована.

Обнуляем счётчик внутренних итераций $I_{\text{внутр}} = 0$ (смысл переменной $I_{\text{внутр}}$ прояснится на шаге 4).

Шаг 3. На этом шаге происходит случайное распределение мероприятий по месяцам так, чтобы

$$\sum_{i=1}^{m} x_{i,j} y_{i,k} = n_{k,j},$$

после чего выполняется вычисление целевой функции $F(x)$.

Шаг 4. Вычисляются изменения значения целевой функции F в случае парных перестановок ГТМ внутри одного цеха добычи. Всего для одного цеха выполняется $m_k(m_k - 1)$ таких вычислений. Для определения изменения целевой функции при перестановке мероприятий вычисления по формуле (3) могут быть упрощены. Учитывая, что при перестановке изменяются средние стартовые дебиты только для двух месяцев, изменение целевой функции можно выразить формулой (промежуточные выкладки опущены)

$$\begin{aligned}\Delta F^{ij} &= F\left(x^{ij}\right) - F\left(x\right) = \\ &= b_i\left(b_i + 2(\tilde{q}_{p_i} - q_{p_i}^{cp})\right) + b_j\left(b_j + 2(\tilde{q}_{p_j} - q_{p_j}^{cp})\right),\end{aligned} \tag{15}$$

где x^{ij} получается из x перестановкой строк i и j; p_i – номер месяца, на который запланирован i-й ГТМ в решении x;

$q_{p_i}^{cp} = \left(\sum_{s=1}^{m} q_s x_{s,p_i} + \sum_{s=1}^{m} \underline{q_s}\,\underline{x_{s,p_i}}\right) \Bigg/ \left(n_{p_i} + \sum_{s=1}^{m} \underline{x_{s,p_i}}\right)$ – средний стартовый дебит месяца p_i в решении x;

$$b_i = \frac{q_i - q_j}{n_{p_i}},\ b_j = \frac{q_i - q_j}{n_{p_j}},\ n_i = \sum_{s=1}^{m} x_{s,i} = \sum_{k=1}^{N_C} n_{k,i}\,.$$

Использование формулы (15) требует выполнения 15 арифметических операций вместо $12(m + 4) + 1$ операций при вычислении по формуле (3).

Алгоритм на шаге 4 реализуется следующим образом. Для некоторого цеха k выделяется подмножество мероприятий, соответствующих данному цеху $S^k = \{i \mid y_{k,i} = 1\}$. Для определённости считаем, что мероприятия в этом множестве упорядочены по возрастанию их номеров. Для первого мероприятия, имеющего номер $s^k{}_1$, вычисляются значения $\Delta F^{s_1^k s_j^k}$, $j = 1, \ldots, m_k$, $s_1^k, s_j^k \in S^k$. Если минимальное из них

$$\Delta F^{s_1^k s_{j1}^k} = \min_{j=1,\ldots,m_k} \Delta F^{s_1^k, s_j^k}$$

оказывается меньше нуля, то к решению x применяется соответствующая перестановка $(s^k{}_1, s^k{}_{j1})$. Эта перестановка приводит к уменьшению целевой функции (3). На основе решения $x^{s_1^k s_{j1}^k}$

вычисляются значения $\Delta F^{s_2^k s_j^k}$, $j = 1, \ldots, m_k$, если минимальное из них оказывается меньше нуля, то к решению применяется соответствующая перестановка ($s^k{}_2$, $s^k{}_{j\,2}$). Такая процедура выполняется последовательно для всех $j = 1, \ldots, m_k$, т.е. для всех мероприятий данного цеха.

Описанные действия выполняются поочерёдно для всех цехов, т.е. для $k = 1, \ldots, N_C$. В результате получаем некоторое решение x^*. Если на очередной внутренней итерации алгоритма получено меньшее, чем на предыдущих итерациях, значение целевой функции (3), то соответствующее решение x^* присваивается переменной x^{*4}, используемой для хранения текущего наилучшего решения, полученного на шагах 3-4:

$$x^{*4}_{I_{\text{внутр}}} = \begin{cases} x^*, & I_{\text{внутр}} = 0 \text{ или } F(x^*) < F(x^{*4}_{I_{\text{внутр}}-1}), \\ x^{*4}_{I_{\text{внутр}}-1} & \text{иначе}; \end{cases}$$

где нижний индекс у x^{*4} означает номер внутренней итерации. В конце шага увеличиваем значение счётчика внутренних итераций на 1: $I_{\text{внутр}} := I_{\text{внутр}} + 1$. Если значение счётчика $I_{\text{внутр}}$ не достигло установленной максимальной величины, то возвращаемся на шаг 3, иначе переходим на шаг 5.

Шаг 5. Для шагов 2–5 выполняется внешний цикл итераций. На шаге 5 производится сравнение решения x^{*4}, полученного на шагах 3–4, с лучшим решением x^{*5}, полученным на предыдущих внешних итерациях. Обновляем решение x^{*5} в соответствии с формулой

$$x^{*5}_{I_{\text{внеш}}} = \begin{cases} x^{*4}, & I_{\text{внеш}} = 0 \text{ или } F(x^{*4}) < F(x^{*5}_{I_{внеш}-1}), \\ x^{*5}_{I_{\text{внеш}}-1} & \text{иначе}; \end{cases}$$

Увеличиваем значение счётчика внешних итераций на 1: $I_{\text{внеш}} := I_{\text{внеш}} + 1$. Если значение счётчика $I_{\text{внеш}}$ не достигло установленной максимальной величины, то возвращаемся на шаг 2, иначе считаем работу алгоритма законченной. Полученное решение x^{*5} будет лучшим в смысле целевой функции (3) из всех построенных в процессе работы алгоритма.

Рассматривалась также модификация алгоритма, в которой шаг 4 выполнялся несколько раз подряд. В результате численных экспериментов отмечено, что обычно достаточно 1–2 выполнений этого шага, большее число повторов увеличивает время вычислений, не приводя к существенному улучшению решения.

4. Результаты расчётов

Работу алгоритма проиллюстрируем на тестовом примере. В основе расчёта лежит перечень ГТМ одного из добывающих обществ нефтяной компании Роснефть, насчитывавший 339 мероприятий одного типа, которые были запланированы на период бизнес-планирования продолжительностью 60 месяцев[1]. Отметим, что расчёт для каждого 12-месячного периода выполнялся независимо и, по сути, на рис. 1 представлено пять отдельных расчётов. Число мероприятий для отдельных 12-месячных периодов варьировалось от 64 до 77. Таким образом, число переменных $x_{i,j}$ при решении задачи (3)–(7) составляло от 768 до 924.

Из рисунка видно, что в результате работы алгоритма исходный перечень был модифицирован таким образом, чтобы распределение среднемесячных стартовых дебитов по каждому году стало близко соответствовать целевому распределению, определённому пользователем. В расчёте использовалось 15 внешних итераций, каждая из которых включала 2000 внутренних. При этом время выполнения последовательного программного кода, написанного на языке программирования VBA, составило 254 с на ЭВМ, оснащённой процессором AMD E-450 с тактовой частотой 1,65 ГГц, и 49 с – на ЭВМ, оснащённой процессором Intel U8250 i5 с максимальной тактовой частотой 3,4 ГГц.

Отметим, что поскольку внутренние итерации могут выполняться независимо друг от друга, представленный алгоритм может быть с лёгкостью адаптирован для использования параллельных вычислений.

---

[1] *Всего перечень насчитывал более 2000 мероприятий шести типов.*

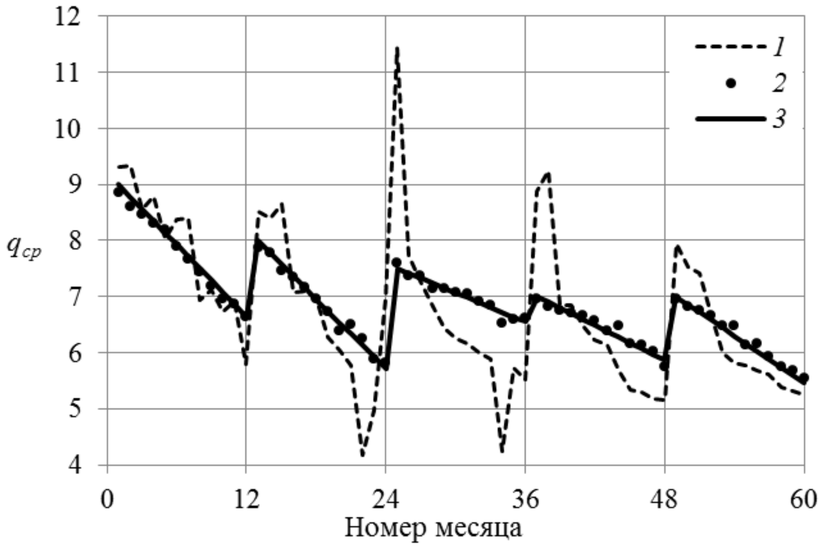

Рис. 1. Средний стартовый дебит: 1 – исходная конфигурация перечня ГТМ; 2 – перечень ГТМ, полученный в результате работы алгоритма; 3 – желаемое распределение стартовых дебитов, указанное пользователем

5. Заключение

С целью оптимизации производственных процессов нефтедобывающего предприятия предложена математическая постановка задачи распределения ГТМ по месяцам года. Для решения задачи был разработан эвристический метод, который был реализован на языке программирования VBA. Созданная программа показала свою эффективность при решении реальных задач, стоящих перед специалистами одного из добывающих обществ нефтяной компании Роснефть.

Литература

1. АНТОНОВ О.Г., НАСЫБУЛЛИН А.В., ЛИФАНТЬЕВ А.В. *Совершенствование методов регулирования разработки нефтяных залежей* // Нефтяная провинция. – 2016. – №3. – С. 87–100.
2. АРТАМОНОВ А.А., АЛЬМУХАМЕТОВ М.А. *Практическая реализация современных подходов планирования ГТМ* // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2013. – №6. – С. 44–48.
3. АСТРАКОВА А.С., БАННИКОВ Д.В., ЛАВРЕНТЬЕВ М.М. (МЛ), ЧЕРНЫЙ С.Г. *Применение генетического алгоритма к задаче оптимального расположения датчиков* // Вычислительные технологии. – 2009. – Т. 14, №5. – С. 3–17.
4. АХМЕДОВ К.С. *Методика ранжирования скважин при планировании ГТМ на газодобывающих месторождениях ОАО «Газпром»* // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2014. – №5. – С. 40–44.
5. ГИЛАЕВ Г.Г., ПУСТОВОЙ П.А., ЗАХАРЧЕНКО Е.И., СТРЕЛЬЦОВА Ю.Г., КУСОВ Г.В. *Выбор очередности и времени проведения геолого-технических мероприятий* // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2010. – №9. – С. 31–33.
6. ГРАЧЕВ С.И., КОЛМАКОВ А.В. *Методика выбора скважин для проведения геолого-технических мероприятий по поддержанию действующего фонда* // Наука и ТЭК. – 2012. – №2. – С. 11–14.
7. РУБАН А.И. *Глобальная оптимизация методом усреднения координат*. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. – 303 с.
8. РУТКОВСКАЯ Д., ПИЛИНЬСКИЙ М., РУТКОВСКИЙ Л. *Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы*. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
9. BACK T., SCHWEFEL H.-P. *An overview of evolutionary algorithms for parameter optimization* // Journal of Evolutionary Computation. – 1993. – Vol. 1, No. 2. – P. 1–20.
10. KENNEDY J., EBERHART R.C. *Swarm Intelligence*. – San Francisco, Morgan Kaufmann, 2001.

11. KIRKPATRICK S., GELATT JR., VECCHI M.P. *Optimization by Simulated Annealing* // Science. – 1983. – Vol. 220, No. 4598. – P. 671–680.
12. KOSHUR V.D., PUSHKARYOV K.V. *Global Optimization via Neural Network Approximation of Inverse Coordinate Mappings* // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). – 2011. – Vol. 20, No. 3. – P. 181–193.

ABOUT ONE METHOD OF OPTIMIZATION WELL INTERVENTIONS LIST

Andrey Bazovkin, SamaraNIPIneft, Samara, Cand.Sc., Chief Specialist (BazovkinAV@samnipineft.ru).

Abstract: To maintain oil and gas production at a higher level, a complex of well interventions is usually use in the petroleum exploration. The list of well interventions is formed on the basis of the analysis of the current state of reservoir development, technical condition of wells, economic efficiency and other significant factors. To ensure quality planning of production indicators in the oil company, the list of well interventions is formed for years ahead and includes, sometimes, thousands of activities. Usually for most events, only one year of their performance is pre-set. It is of interest to study the influence of variation of the well intervention's months performing within a year for economic indicators. This article proposes a mathematical formalization of the problem of ordering the list of well interventions taking into account some production and economic conditions. The formulated problem is the problem of nonlinear optimization. To solve the problem, a heuristic method is proposed, a full description of which is given in the article. In conclusion, the results of optimization for one real example are given.

Keywords: production scheduling, optimization, well intervention list, Nonlinear programming.

УДК 519.714.7 + 517.977.5 + 658.5
ББК У9(2)230.37
DOI: 10.25728/ubs.2018.76.8

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Я.И. Квинто.*

*Поступила в редакцию 28.11.2017.
Опубликована 30.11.2018.*