УДК 517.977.5 Вестник СПбГУ. Прикладная математика. Информатика... 2024. Т. 20. Вып. 1
MSC 93C85

Синтез законов управления давлениями на скважинах для оптимизации добычи газового конденсата*

М. В. Коровкин[1], *М. В. Сотникова*[1], *Н. А. Жабко*[1], *Т. А. Лепихин*[1], *Р. А. Севостьянов*[1], *В. М. Бабин*[2], *А. А. Гимазов*[3]

[1] Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9
[2] Nedra Digital,
Российская Федерация, 199178, Санкт-Петербург, Уральская ул., 4
[3] Научно-технический центр «Газпром-нефти»,
Российская Федерация, 190000, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 75–79

Для цитирования: *Коровкин М. В., Сотникова М. В., Жабко Н. А., Лепихин Т. А., Севостьянов Р. А., Бабин В. М., Гимазов А. А.* Синтез законов управления давлениями на скважинах для оптимизации добычи газового конденсата // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2024. Т. 20. Вып. 1. С. 79–90. https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2024.107

В работе описана задача оптимизации добычи газового конденсата в процессе разработки заданного количества скважин на месторождении. Она состоит в определении такого распределения управляющих воздействий, в качестве которых выступают забойные давления, когда для заданной фиксированной скорости добычи газовой смеси обеспечивается максимальное извлечение газового конденсата на определенном горизонте планирования. Выполнена формализованная постановка задачи и показано, что она сводится к задаче нелинейного программирования с существенно нелинейной целевой функцией и ограничениями. Предложены два различных подхода к поиску оптимального решения. Первый из них основан на решении исходной оптимизационной задачи, а второй — на ее упрощении с целью снизить вычислительные затраты на поиск решения. Представлен численный пример добычи газового конденсата для пяти скважин и выполнено сопоставление полученных результатов моделирования для указанных двух алгоритмов.

Ключевые слова: цифровое управление, оптимизация, добыча газового конденсата, нелинейное программирование.

1. Введение. В работе рассматривается задача максимизации добычи газового конденсата при извлечении газовой смеси из пласта на месторождении. В качестве управляющих воздействий выступают забойные давления на скважинах, объединенных одним магистральным трубопроводом. Проблема состоит в том, что при снижении пластового давления, которое неизбежно происходит в процессе разработки залежи, часть газового конденсата не поднимается на поверхность, а выпадает в пласте. В связи с этим возникает задача координированного управления забойными давлениями на скважинах, чтобы как можно дольше поддерживать заданный уровень добычи газовой смеси при максимально возможном извлечении газового конденсата.

В настоящее время имеющиеся вычислительные мощности позволяют ставить на практическую основу разработку сложных программных комплексов с целью суще-

* Работа выполнена при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (проект ID: 94062114).

ственного повышения эффективности работы систем управления техническими процессами, в том числе при переработке нефти в ректификационных колоннах [1, 2] и при добыче полезных ископаемых [3].

Структура статьи следующая. В п. 2 описывается математическая модель добычи газового конденсата и осуществляется ее дискретизация. В п. 3 выполняется формализованная постановка задачи максимизации добычи газового конденсата при условии поддержания заданной скорости добычи сырья на горизонте планирования. Показано, что эта задача сводится к задаче нелинейного программирования. В п. 4 предлагаются два различных подхода к ее решению. Первый из них позволяет найти лучшее решение, но с большими вычислительными затратами, а второй — значительно снизить необходимые вычислительные ресурсы, но с возможной существенной потерей качества процессов управления. В п. 5 приведены результаты численного моделирования, иллюстрирующие преимущества и недостатки предлагаемых подходов.

2. Математическая модель процесса добычи конденсата. Принятая математическая модель добычи сырья на газоконденсатных скважинах основана на уравнении продуктивности скважины [4, 5]

$$P_{pl}^2(t) - P_z^2(t) = A\mu(t)z(t)q(t). \tag{1}$$

Здесь P_{pl} — пластовое давление, P_z — забойное давление, которое является управляющим воздействием и позволяет регулировать добычу, $q(t)$ — дебит газа, т. е. скорость добычи газа на скважине, показывающая объем извлеченного газа в единицу времени. Коэффициент $A > 0$ — постоянная величина, $\mu(t)$ и $z(t)$ — существенно нелинейные функции, которые зависят от текущих давления и температуры на скважине, а также от ее технических характеристик, режима функционирования и физических свойств добываемой газовой смеси. В дальнейшем будем считать, что эти функции известны и могут быть вычислены алгоритмически.

Суммарная добыча газовой смеси вычисляется как интеграл от дебита, т. е.

$$Q(t) = \int_0^t q(\tau)d\tau. \tag{2}$$

По мере добычи газа из пласта пластовое давление P_{pl} падает, что описывается линейной зависимостью

$$\frac{P_{pl}(t)}{z(t)} = -kQ(t) + \frac{P_{pl}^0}{z_0}, \tag{3}$$

где $k > 0$ — постоянная величина; $P_{pl}^0 = P_{pl}(0)$; $z_0 = z(0)$ — значения пластового давления и функции z для момента времени $t = 0$ и нулевой суммарной добычи $Q(0) = 0$.

Если скважин несколько, то каждая из них описывается своей совокупностью уравнений (1)–(3). В результате для N скважин получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} &P_{pl}^{i\,2}(t) - P_z^{i\,2}(t) = A_i\mu_i(t)z_i(t)q_i(t),\\ &\dot{Q}_i = q_i(t), \;\; Q_i(0) = 0,\\ &\frac{P_{pl}^i(t)}{z_i(t)} = -k_iQ_i(t) + \frac{P_{pl}^{i0}}{z_{i0}}, \;\; i = \overline{1, N}, \end{aligned} \tag{4}$$

которая представляет собой математическую модель добычи газовой смеси на газоконденсатных скважинах некоторого месторождения. При этом в качестве управления выступают забойные давления на скважинах P_z^i, $i = \overline{1,N}$, регулирующие их дебит.

В процессе разработки месторождения, как правило, требуется, чтобы скорость добычи сырья оставалась постоянной, т. е. выполнялось равенство

$$\sum_{i=1}^{N} q_i = q_z, \tag{5}$$

где q_z — заданная константа. Отметим, что сырье, добываемое из каждой скважины, поступает в общую газовую магистраль, в которой должна поддерживаться указанная скорость добычи q_z.

Газовая смесь на газоконденсатном месторождении содержит многокомпонентный газ и газовый конденсат. При этом основную ценность при добыче представляет именно газовый конденсат. Особенностью его добычи является то, что при разработке месторождения пластовое давление и температура постепенно снижаются и, начиная с определенных критических значений, газовый конденсат выпадает (конденсируется) в самом пласте и становится практически недоступным для извлечения. В связи с этим задача управления скважинами на месторождении состоит в таком управлении забойными давлениями, которое позволило бы максимально длительное время поддерживать суммарную добычу на заданном уровне и извлекать наибольшее возможное значение газового конденсата.

Важной характеристикой газоконденсатной скважины является конденсатогазовый фактор (КГФ), который будем задавать функциями

$$f_i = f_i(P_{pl}^i), \;\; i = \overline{1,N}. \tag{6}$$

Тогда скорость добычи газового конденсата, т. е. объем добычи в единицу времени, равна

$$q_k^i = f_i(P_{pl}^i) q_i, \;\; i = \overline{1,N}. \tag{7}$$

Будем считать, что функции $f_i(P_{pl}^i)$, $i = \overline{1,N}$, известны. В действительности на практике данные зависимости, как правило, получают экспериментально посредством проведения дорогостоящих исследований. При этом экономическое обоснование необходимости уточнения таких функций и соответственно проведения дополнительных дорогостоящих измерений в процессе эксплуатации месторождения для увеличения добычи газового конденсата является насущной проблемой, требующей подробного изучения.

3. Постановка задачи. Цель управления скважинами — максимизация добычи газового конденсата при постоянной скорости добычи сырья, т. е. при выполнении условия (5). При этом допускается нарушение данного условия в заданных пределах:

$$\left| \sum_{i=1}^{N} q_i(t) - q_z \right| \leqslant \Delta q_z \quad \forall t \in [0, T], \tag{8}$$

где Δq_z — допустимая погрешность; величина T определяет горизонт планирования при разработке месторождения.

Введем функционал, равный суммарной добыче газового конденсата на интервале $[0, T]$. С учетом (7) получим, что

$$J = J(P_z^1(t), ..., P_z^N(t)) = \sum_{i=1}^{N} \int\limits_0^T f_i(P_{pl}^i(\tau)) q_i(\tau) d\tau. \tag{9}$$

В итоге сформулируем следующую математическую задачу о максимизации добычи газового конденсата на временном горизонте длиной T:

$$J = J(P_z^1(t), ..., P_z^N(t)) \to \max_{\mathbf{u}(\cdot) \in \Omega}. \tag{10}$$

Здесь $\mathbf{u}(t) = \left(P_z^1(t), ..., P_z^N(t)\right)$ — вектор управления, Ω — допустимое множество векторных функций, компоненты которых являются кусочно-непрерывными на отрезке $[0, T]$, такими, что выполняется ограничение (8), т. е.

$$\Omega = \{\mathbf{u} = \mathbf{u}(t) \in E^N : u_i(t) = P_z^i(t) \in K^0[0, T], \sum_{i=1}^{N} q_i(\mathbf{u}(t)) \leqslant \Delta q_z \quad \forall t \in [0, T]\}, \tag{11}$$

где $K^0[0, T]$ — множество кусочно-непрерывных функций на отрезке $[0, T]$. Поставленная оптимизационная задача (10) на допустимом множестве (11) рассматривается по отношению к математической модели (4).

Горизонт планирования T при разработке месторождения обычно составляет от одного года до нескольких лет, и в течение этого времени поддерживается заданная скорость добычи сырья q_z. Исходя из практических соображений, давления на скважинах удобно задавать постоянными на определенных равных промежутках времени длиной ΔT, причем $T = l\Delta T$, где $l > 0$ — целое число. В связи с этим поставленная задача синтеза управления (10), (11) естественным образом сводится к дискретной формулировке.

Выполним дискретизацию уравнений (4) с постоянным шагом t_s, кратным ΔT, т. е. $\Delta T = st_s$, где $s > 0$ — целое число. В результате получим следующие уравнения:

$$\begin{gathered} q_i[n] = \frac{\left(P_{pl}^{i\,2}[n] - P_z^{i\,2}[n]\right)}{A_i \mu_i[n] z_i[n]}, \\ Q_i[n+1] = Q_i[n] + t_s q_i[n], \;\; Q_i[0] = 0, \\ P_{pl}^i[n] = -k_i z_i[n] Q_i[n] + P_{pl}^{i0} \frac{z_i[n]}{z_{i0}}, \;\; i = \overline{1, N}. \end{gathered} \tag{12}$$

При этом дискретный отсчет $n = 0, 1, 2, ...$ соотносится с фактическим моментом времени t соотношением $t = nt_s$.

В модели (12) забойные давления на скважинах задаются кусочно-постоянными функциями с шагом дискретности ΔT, т. е. для каждой скважины задание управления на горизонте планирования T эквивалентно заданию программной последовательности

$$\mathbf{u}_i = \left[P_z^i(0), P_z^i(\Delta T), ..., P_z^i((l-1)\Delta T)\right], \quad i = \overline{1, N}. \tag{13}$$

Тогда значение забойного давления $P_z^i[n]$ для дискретного отсчета n в уравнениях (12) соотносится с элементами последовательности (13) таким образом:

$$P_z^i[n] = P_z^i(j\Delta T), \quad j = \left[\frac{nt_s}{\Delta T}\right]. \tag{14}$$

Функционал (9), характеризующий добычу газового конденсата, в результате дискретизации принимает вид

$$J = J(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, ..., \mathbf{u}_N) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{n=0}^{sl} f_i(P_{pl}^i[n]) q_i[n] t_s. \tag{15}$$

Ограничение (8) на скорость добычи сырья в дискретном варианте преобразуется к системе неравенств

$$\left| \sum_{i=1}^{N} q_i[n] - q_z \right| \leqslant \Delta q_z \quad \forall n \in [0, sl]. \tag{16}$$

В итоге с учетом соотношений (12)–(16) исходную оптимизационную задачу (10), (11) сведем к задаче оптимизации

$$J = J(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, ..., \mathbf{u}_N) \to \max_{\overline{\mathbf{u}} \in \Omega_d \in E^{Nl}}, \tag{17}$$

здесь $\overline{\mathbf{u}} = (\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, ..., \mathbf{u}_N)$ — вспомогательный вектор, а допустимое множество Ω_d состоит из всевозможных последовательностей управляюших воздействий (13), при которых выполняются ограничения (16), т. е.

$$\Omega_d = \{\overline{\mathbf{u}} \in E^{Nl} : \left| \sum_{i=1}^{N} q_i[n] - q_z \right| \leqslant \Delta q_z \ \ \forall n \in [0, sl]\}. \tag{18}$$

Оптимизационная задача (17), (18), рассматриваемая совместно с уравнениями математической модели (12), представляет собой задачу нелинейного программирования с существенно нелинейной целевой функцией (17) и ограничениями (16). Отметим, что размерность задачи равна Nl, а число ограничений составляет $2sl$.

4. Синтез законов управления давлениями на скважинах. Рассмотрим вопросы построения допустимого начального решения и два различных подхода к синтезу закона управления давлениями на скважинах. Первый из них позволяет получить лучшее решение по отношению к заданному функционалу качества (15), однако требует существенных вычислительных ресурсов, особенно при количестве скважин $N > 10$. Второй подход основан на идее пошаговой оптимизации и обеспечивает нахождение более грубого приближения к оптимальному решению, но за значительно меньшее вычислительное время.

Важно отметить, что поставленная задача оптимизации (17), (18) крайне сложна для непосредственного решения современными численными методами. Это определяется в том числе большим числом нелинейных ограничений (16). Известно, что к существенным проблемам в решении таких задач относится наличие локальных экстремумов. Любой численный метод решения задачи нелинейного программирования, опирающийся на необходимые условия Куна — Такера, гарантирует сходимость только к локальному экстремуму.

С целью упрощения поставленной оптимизационной задачи и процесса поиска решения было принято следующее допущение. Вместо неравенств (16) рассматривается система ограничений следующего вида:

$$\left| \frac{1}{s} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{s} q_i[j + (\nu - 1)s] - q_z \right| \leqslant \Delta q_z \quad \forall \nu \in [0, l]. \tag{19}$$

Суть введения ограничений (19) состоит в том, что вместо заданного объема добычи q_z за время t_s вводится аналогичное ограничение, но на среднюю скорость добычи сырья за период постоянства управления ΔT. При этом число ограничений значительно сокращается с величины sl до значения l. Естественно, что при таком подходе не гарантируется соблюдение ограничений (16) на каждом такте n дискретного времени. Тем не менее, учитывая практические аспекты рассматриваемой задачи, приближенное решение, получаемое в этом случае, является достаточно точным приближением к решению исходной оптимизационной задачи (17), (18).

4.1. Поиск допустимого начального приближения. В соответствии с введенными ограничениями (19) зададим допустимое множество управляющих воздействий (13) таким образом:

$$\tilde{\Omega}_d = \{\overline{\mathbf{u}} \in E^{Nl} : \left|\frac{1}{s}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{s} q_i[j+(\nu-1)s] - q_z\right| \leqslant \Delta q_z \quad \forall \nu \in [0,l]\}. \tag{20}$$

Тогда допустимое начальное приближение будем искать как решение системы нелинейных уравнений

$$\frac{1}{s}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{s} q_i[j+(\nu-1)s] = q_z \quad \forall \nu \in [0,l]. \tag{21}$$

Система (21) является существенно нелинейной, поскольку она рассматривается совместно с уравнениями математической модели (12), в которой переменные $q_i[n]$ зависят от выбора управляющего воздействия $\overline{\mathbf{u}}$. Система (21) состоит из l уравнений и содержит Nl неизвестных. Ее решение может существовать и быть неединственным, а может его и не быть. Это зависит в том числе от выбора скорости добычи q_z и степени выработанности скважин.

Пусть $\overline{\mathbf{u}}_0$ — решение системы (21). Тогда оно принадлежит допустимому множеству $\tilde{\Omega}_d$ и в дальнейшем используется в качестве начальной точки для оптимизации. Если же решения нет, то необходимо изменить некоторые параметры задачи, например величину q_z, шаг постоянства управления ΔT, горизонт планирования T.

Отметим, что для решения системы (21) могут применяться известные численные методы решения систем нелинейных уравнений.

4.2. Алгоритм синтеза оптимального управления. С учетом формул (15), (17) и (20) опишем следующую упрощенную задачу оптимизации:

$$J = J(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, ..., \mathbf{u}_N) \to \max_{\overline{\mathbf{u}} \in \tilde{\Omega}_d \in E^{Nl}}, \tag{22}$$

которая в отличие от (17) рассматривается на допустимом множестве (20). Отметим, что задача оптимизации (22) также является задачей нелинейного программирования, в которой целевая функция зависит от Nl переменных, а число ограничений равно $2l$.

Для решения задачи (22) могут использоваться различные современные вычислительные методы нелинейного программирования, в частности метод последовательного квадратичного программирования (Sequential quadratic programming — SQP). При этом в качестве начальной точки спуска выступает допустимое начальное приближение $\overline{\mathbf{u}}_0$. В соответствии с (13) оптимальное решение задачи (22) задается вектором

$$\overline{\mathbf{u}}^* = (\mathbf{u}_1^*, \mathbf{u}_2^*, ..., \mathbf{u}_N^*)\,,$$

где

$$\mathbf{u}_i^* = \left[P_z^{i*}(0), P_z^{i*}(\Delta T), ..., P_z^{i*}((l-1)\Delta T)\right], \ \ i = \overline{1, N}.$$

Данное решение определяет оптимальную стратегию управления забойными давлениями на скважинах газоконденсатного месторождения.

Важно отметить, что размерность задачи оптимизации (22) при решении практических задач управления скважинами обычно составляет несколько сотен. Это связано с тем, что число скважин, как правило, не менее 10, а горизонт планирования — не меньше года. Поэтому вычислительные затраты на решение задачи оптимизации (22) достаточно велики. Дополнительной трудностью, возникающей в связи с существенной нелинейностью целевой функции и ограничений, является наличие локальных экстремумов.

4.3. Упрощенный подход к синтезу управления. Очевидное решение, позволяющее сократить сложность вычислительных процедур при решении задачи (22), — переход к одношаговой процедуре выбора управления. При этом полагается, что $l = 1$, и проводится поиск оптимального задания давлений на скважинах, обеспечивающий максимизацию добычи газового конденсата для одного периода планирования. Тогда размерность задачи (22) уменьшается до N, а число ограничений — до двух. Естественно, что время поиска экстремума при этом значительно сокращается, в связи с чем в дальнейшем данный алгоритм будем называть «жадным». Однако качество процессов управления может существенно понизиться, поскольку горизонт планирования сужен до одного шага дискретности управления ΔT.

Учет данного управления позволяет спрогнозировать изменение пластового давления на скважинах, что, в свою очередь, обеспечивает возможность решения задачи (22) с $l = 1$ для следующего этапа планирования.

5. Пример. Рассмотрим $N = 5$ скважин с различными функциями КГФ вида (6) и горизонт планирования добычи, равный 1 году. При этом шаг дискретности управления ΔT и период дискретизации t_s в системе (12) примем равными 1 месяцу и 1 суткам соответственно, которым отвечают величины целочисленных параметров $l = 12$ и $s = 30$. Тогда размерность задачи оптимизации (22) равна $Nl = 60$, а количество неравенств, формирующих допустимое множество (20), $2l = 24$.

Зададим следующие значения желаемой средней скорости добычи сырья на интервале ΔT и допустимой погрешности в неравенствах (19):

$$q_z = 2.3103 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{сут}, \ \ \Delta q_z = 0.02 q_z = 4.6207 \cdot 10^4. \tag{23}$$

Указанной скорости соответствует общий объем добычи за месяц, равный

$$s q_z = 69.310 \text{ млн м}^3. \tag{24}$$

На рис. 1 слева показана добыча газовой смеси в течение года, разделенная по периодам дискретности управления длиной в 1 месяц, а справа — свойственная этому добыча газового конденсата. Представленные на рис. 1 процессы соответствуют равномерному линейному снижению забойного давления на скважинах, при котором с учетом формулы (1) дебит газоконденсатной смеси возрастает. Горизонтальной линией на рисунке слева отмечен уровень добычи за месяц (24), соответствующий желаемой средней скорости (23). Из рисунка видно, что начальное приближение не является допустимым решением. Отметим, что здесь и далее отдельными блоками в столбцовых диаграммах показаны объемы добычи по каждой из пяти скважин.

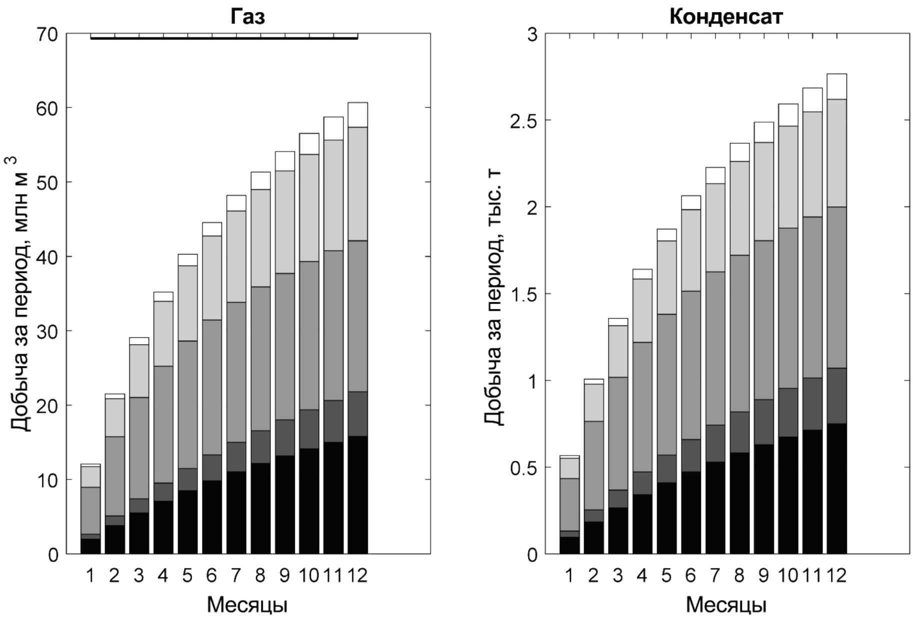

Рис. 1. Начальное приближение

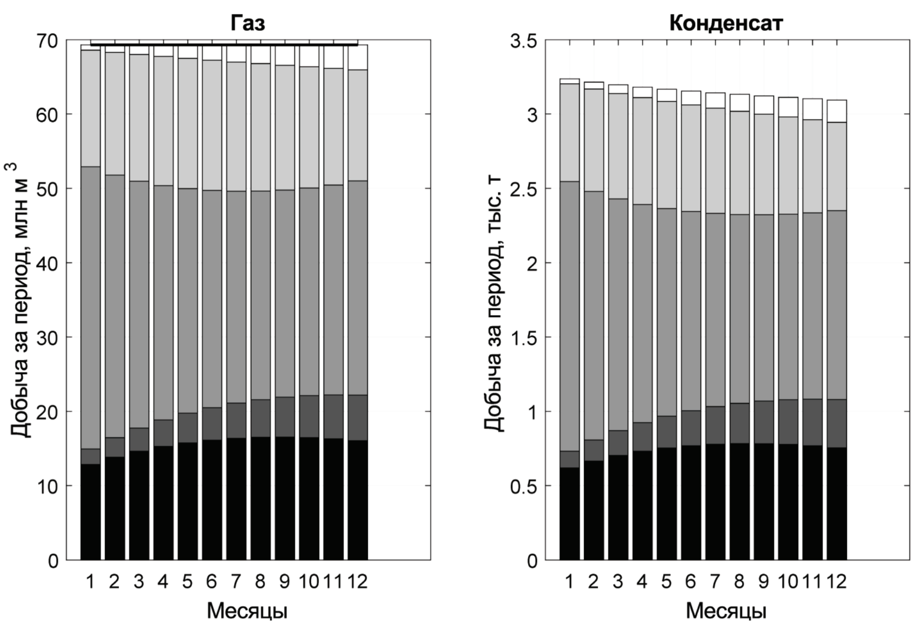

Рис. 2. Допустимое начальное приближение

Рисунок 2 иллюстрирует результат поиска допустимого начального приближения, т. е. допустимого управления $\overline{\mathbf{u}}_0 \in \tilde{\Omega}_d$, удовлетворяющего ограничениям-равенствам (21). Данное управление обеспечивает заданную среднюю скорость добычи сырья (23) и соответствующий объем добычи за месяц (24).

На рис. 3 приведен результат решения задачи нелинейного программирования

(22). В качестве начальной точки спуска использовалось допустимое решение $\overline{\mathbf{u}}_0$. На рис. 4 показаны результаты работы «жадного» алгоритма управления.

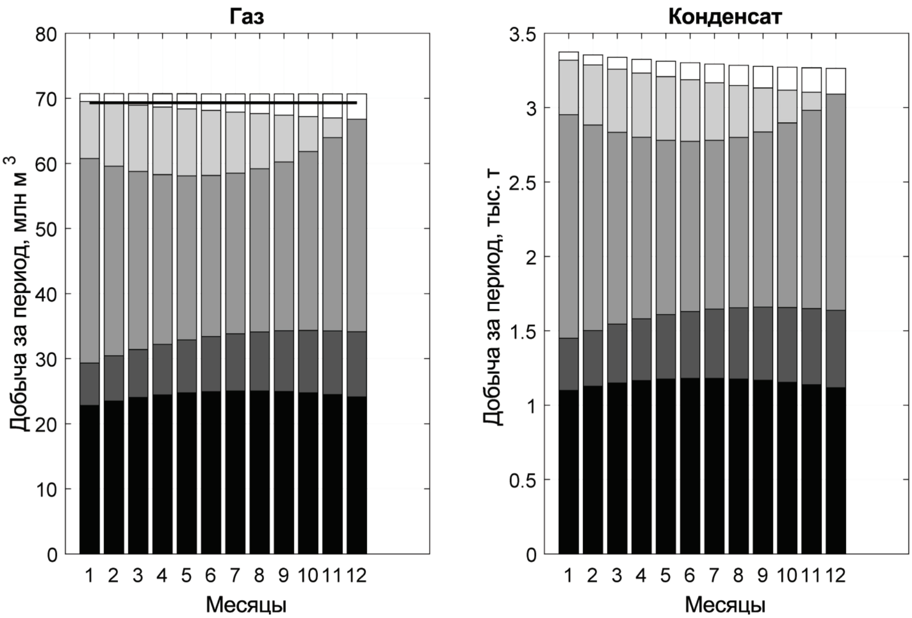

Рис. 3. Оптимальное решение

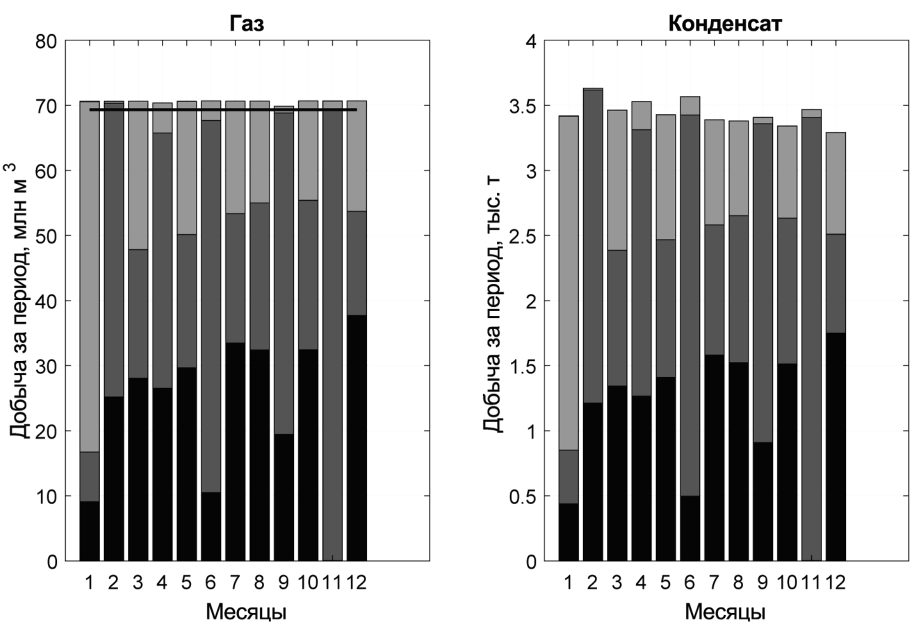

Рис. 4. «Жадное» решение

В таблице для каждого процесса представлены суммарные добыча газа и конденсата за один год. Из нее видно, что суммарное количество добытого конденсата

Таблица. **Показатели добычи для различных алгоритмов управления**

Алгоритм управления	Газ, млн м^3	Конденсат, тыс. т.
Начальное приближение	512.26	23.631
Допустимое начальное приближение	831.72	37.850
Оптимальное управление	848.20	39.661
«Жадное» управление	846.66	41.305

наибольшее для «жадного» алгоритма управления. Однако этот результат достигается за счет существенно неравномерного использования мощностей скважин, вплоть до полного прекращения добычи на некоторых из них в течение нескольких периодов. Данный факт может оказаться определяющим при выборе алгоритма управления. Эксперименты, проведенные для больших горизонтов планирования, также иллюстрируют характерную естественную особенность «жадного» алгоритма — отсутствие гарантий сохранения допустимых ограничений (19) по объемам добычи газа.

Важно отметить, что полученный в экспериментах результат свидетельствует также о достижении локального минимума при решении задачи оптимизации (22). При выборе иной допустимой начальной точки спуска результат может оказаться лучшим по сравнению с «жадным» алгоритмом.

6. Заключение. Рассмотрена задача моделирования добычи газоконденсатной смеси и предложены алгоритмы оптимизации добычи газового конденсата. Моделирование добычи конденсата осуществляется в предположении наличия информации о содержании тяжелых фракций в газоконденсатной смеси в зависимости от задания давлений в устье скважин. Предложены два алгоритма управления добычей на основе дискретизированной модели, использующие методы решения оптимизационных задач нелинейного программирования. Приведены результаты имитационного моделирования, иллюстрирующие существенно различные свойства обоих подходов, что позволяет облегчить выбор того или иного варианта.

Литература

1. *Sotnikova M. V., Sevostyanov R. A.* Optimal control of output variables within a given range based on a predictive model // Communications in Computer and Information Science. 2022. Vol. 1661. P. 272–285.

2. *Сотникова М. В., Севостьянов Р. А.* Цифровое управление контролируемыми переменными в заданном диапазоне с учетом запаздывания // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2021. Т. 17. Вып. 4. С. 449–463. https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2021.412

3. *Ермолаев А. И., Некрасов А. А., Трубачева И. А.* Распределение заданного суммарного отбора газа по скважинам газоконденсатной залежи по критерию минимума потерь пластовой энергии // Наука и техника в газовой промышленности. 2019. Т. 78. № 2. С. 57–67.

4. *Басниев К. С., Дмитриев Н. М., Розенберг Г. Д.* Нефтегазовая гидромеханика. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. 544 с.

5. *Ермилов О. М., Ремизов В. В., Ширковский А. И., Чугунов Л. С.* Физика пласта, добыча и подземное хранение природного газа. М.: Наука, 1996. 541 с.

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2023 г.
Статья принята к печати 26 декабря 2023 г.

Контактная информация:

Коровкин Максим Васильевич — канд. физ.-мат. наук; m.korovkin@spbu.ru

Сотникова Маргарита Викторовна — д-р физ.-мат. наук, доц.; m.sotnikova@spbu.ru

Жабко Наталия Алексеевна — канд. физ.-мат. наук; n.zhabko@spbu.ru

Лепихин Тимур Андреевич — канд. физ.-мат. наук; t.lepihin@spbu.ru

Севостьянов Руслан Андреевич — r.sevostianov@spbu.ru

Бабин Владимир Маркович — hello@nedra.digital

Гимазов Азат Альбертович — ntc_odo@gazpromneft-ntc.ru

Synthesis of pressure control laws at wells to optimize gas condensate mining*

M. V. Korovkin[1], *M. V. Sotnikova*[1], *N. A. Zhabko*[1], *T. A. Lepikhin*[1], *R. A. Sevostyanov*[1], *V. M. Babin*[2], *A. A. Gimazov*[3]

[1] St. Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation
[2] Nedra Digital, 4, Uralskaya ul., St. Petersburg, 199178, Russian Federation
[3] Gazpromneft Science & Technology Centre, 75–79, nab. reki Moyki, St. Petersburg, 190000, Russian Federation

For citation: Korovkin M. V., Sotnikova M. V., Zhabko N. A., Lepikhin T. A., Sevostyanov R. A., Babin V. M., Gimazov A. A. Synthesis of pressure control laws at wells to optimize gas condensate mining. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2024, vol. 20, iss. 1, pp. 79–90. https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2024.107 (In Russian)

The paper is devoted to the problem of optimizing gas condensate mining in the process of developing a given number of wells in a field. The essence of the problem is such a distribution of control actions, which are wells pressures, at which, for a given fixed rate of gas mixture mining, maximum gas condensate extraction is ensured at a certain planning horizon. A formalized formulation of the problem is carried out and it is shown that it reduces to a nonlinear programming problem with essentially nonlinear objective function and constraints. Two different approaches to finding the optimal solution are proposed. The first of them is based on solving the original optimization problem, and the second one — on simplifying it in order to reduce the computational costs of finding a solution. A numerical example of gas condensate mining for five wells is presented and a comparison of the obtained modeling results for these two algorithms is performed.

Keywords: digital control, optimization, gas condensate mining, nonlinear programming.

References

1. Sotnikova M. V., Sevostyanov R. A. Optimal control of output variables within a given range based on a predictive model. *Communications in Computer and Information Science*, 2022, vol. 1661, pp. 272—285.

2. Sotnikova M. V., Sevostyanov R. A. Tsifrovoye upravleniye kontroliruyemymi peremennymi v zadannom diapazone s uchetom zapazdyvaniya [Digital control of output variables in a given range considering delay]. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2021, vol. 17, iss. 4, pp. 449–463. https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2021.412 (In Russian)

3. Yermolayev A. I., Nekrasov A. A., Trubacheva I. A. Raspredeleniye zadannogo summarnogo otbora gaza po skvazhinam gazokondensatnoy zalezhi po kriteriyu minimuma poter' plastovoy energii [Distribution of a given total gas extraction among wells of a gas-condensate deposit according to the criterion of minimum reservoir energy losses]. *Science and Technology in the Gas Industry*, 2019, vol. 78, no. 2, pp. 57–67. (In Russian)

* This work was supported by St. Petersburg State University (project ID: 94062114).

4. Basniyev K. S., Dmitriyev N. M., Rozenberg G. D. *Neftegazovaya gidromekhanika* [*Oil and gas fluid mechanics*]. Moscow, Izhevsk, Institute of computer research Publ., 2005, 544 p. (In Russian)

5. Yermilov O. M., Remizov V. V., Shirkovskiy A. I., Chugunov L. S. *Fizika plasta, dobycha i podzemnoye khraneniye prirodnogo gaza* [*Reservoir physics, extraction and underground storage of natural gas*]. Moscow, Nauka Publ., 1996, 541 p. (In Russian)

Received: November 27, 2023.
Accepted: December 26, 2023.

Authors' information:

Maxim V. Korovkin — PhD in Physics and Mathematics; m.korovkin@spbu.ru

Margarita V. Sotnikova — Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Associate Professor; m.sotnikova@spbu.ru

Natalia A. Zhabko — PhD in Physics and Mathematics; n.zhabko@spbu.ru

Timur A. Lepikhin — PhD in Physics and Mathematics; t.lepihin@spbu.ru

Ruslan A. Sevostyanov — r.sevostianov@spbu.ru

Vladimir M. Babin — hello@nedra.digital

Azat A. Gimazov — ntc_odo@gazpromneft-ntc.ru