ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СХЕМ РАЗМЕЩЕНИЯ СКВАЖИН НА ЗАЛЕЖАХ НЕФТИ И ГАЗА НА ОСНОВЕ СИНТЕЗА АЛГОРИТМОВ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ И СЛУЧАЙНОГО ПОИСКА

Ермолаев А.И.,
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия
ermolaev.a@gubkin.ru
Латипов А.Р.
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия
latipov257@gmail.com

Аннотация. Предлагаются алгоритмы оптимальной расстановки скважин на залежах нефти и газа, позволяющие заменить решение исходной задачи дискретного программирования большой размерности решением серии задач линейного программирования транспортного типа. Для сокращения числа решаемых задач предлагается использовать алгоритмы случайного поиска.

Ключевые слова: алгоритм, вероятность, критерий, модель, оптимизация, проверка гипотез, размещение скважин, целевая функция.

Введение

Поиск рационального размещения скважин относится к числу ключевых задач проектирования разработки месторождений нефти и газа и газового конденсата. Решение этой проблемы вызывает необходимость в учете большого числа технологических (управляющих) параметров и природных характеристик, значения которых известны лишь с низкой точностью, что вызывает необходимость привлечения формализованных алгоритмов формирования и выбора рационального размещения скважин.

Основными достоинствами существующих моделей и алгоритмов по рациональному размещению скважин (см., например, обзор [1]) являются возможность учета неоднородности продуктивных пластов и «просмотра» огромного числа вариантов размещения скважин, генерируемых алгоритмами оптимизации в процессе решения задач. Однако при этом возникают затруднения вычислительного характера, связанные с необходимостью решения задач большой размерности, что является типичной ситуацией при проектировании схем размещения скважин для реальных объектов добычи углеводородного сырья. Низкая эффективность известных моделей и алгоритмов оптимального размещения нефтяных и газовых скважин при решении задач большой размерности вызвана необходимостью многократного обращения к программным комплексам по гидродинамическому моделированию (гидродинамическим симуляторам) для проведения сложных расчетов с целью определения значений выходных показателей эффективности (например, коэффициентов извлечения газа и нефти, чистого дисконтированного дохода и т.п.). Число таких обращений пропорционально числу итераций, необходимых алгоритму оптимизации для поиска окончательного решения. Учитывая сложность с вычислительной точки зрения алгоритмов оптимизации и гидродинамических расчетов, можно прогнозировать низкую эффективность таких вычислительных процедур при их применении для реальных объектов добычи углеводородного сырья. Кроме этого, средства оптимизации, встроенные в программные комплексы по гидродинамическому моделированию, рассчитаны на решение широкого круга задач математического программирования. Однако это приводит к тому, что такие общие методы оптимизации плохо учитывают специфику решаемых задач, что также снижает их эффективность.

В данной статье представлены алгоритмы оптимального размещения скважин, применение которых направлено на снижение негативного влияния отмеченных выше недостатков известных методов оптимальной расстановки скважин на залежах нефти и газа. Предлагаемые алгоритмы используют математическую формулировку задачи расстановки заданного числа скважин в виде моделей линейного булева программирования, рассмотренных в статьях [2÷4], и представляют собой комбинацию алгоритмов линейного программирования и методов случайного поиска. Их применение направлено на сокращение перебора допустимых решений задачи за счет проверки статистических гипотез о значении целевой функции в оптимальном решении. При этом используется специфика исходной задачи, которая заключается в том, что, во-первых, множество её искомых переменных можно представить квадратной матрицей; во-вторых, если из каких-либо соображений задать допустимые значения элементам главной диагонали этой матрицы, то исходная задача преобразуется к классической транспортной задаче с правильным балансом по критерию стоимости [6].

1. Постановка и математическая формулировка задачи оптимального размещения скважин

В задачах расстановки нефтяных (газовых) скважин, рассмотренных в работах [2÷4], целевая функция представляет собой формализацию эвристических правил рационального размещения скважин, проверенных многолетней практикой разработки месторождений нефти и газа. Выполнение этих правил направлено на формирование вариантов разработки, обладающих приемлемыми значениями показателей технологической (коэффициенты извлечения нефти и газа) и экономической эффективности систем разработки месторождений. В соответствие с этими правилами размещение заданного числа скважин (точнее забоев скважин) должно обеспечивать [2]:

- *как можно меньшее расстояние скважин до любой точки пласта и примерное равенство областей дренирования скважин, что направлено на максимально возможный охват пласта заданным количеством скважин;*
- *максимально возможное приближение скважин к участкам пласта, имеющим более высокие значения запасов.*

Рассмотрим модель размещения, которая применяется в случае, когда залежь аппроксимируется двумерной областью. Следует уточнить, что в этом случае расстановка скважин равносильна лишь выбору участка залежи, в котором целесообразно расположить скважину. При этом не выбирается зона перфорации для вертикальной скважины или положение горизонтального участка скважины относительно кровли и подошвы пласта. В этом состоит ограниченность ниже рассмотренной модели. Однако после выбора участков (блоков), содержащих скважины, можно перейти к поиску наилучшего размещения скважины внутри участка, добавляя координату по вертикали, т.е. рассматривать разрез продуктивного пласта. На содержательном уровне задача рационального размещения скважин ставится следующим образом [2]:

пусть залежь разбита на блоки, в каждом из которых возможно размещение забоя скважины; число размещаемых скважин задано; требуется определить набор блоков, содержащих забои скважин, при котором в максимальной степени обеспечивается выполнение эвристических правил рациональной расстановки скважин (пункты А и Б).

В качестве математической формулировки задачи размещения добывающих скважин рассмотрим модель, предложенную в статье [2]. Пусть залежь разбита на блоки (участки). Каждый блок представляет собой прямоугольную призму. Основания призмы - квадраты, одинаковые для всех блоков, а высота равняется нефте- или газонасыщенной толщине, которую имеет пласт на этом участке. Таким образом, продуктивная площадь покрыта совокупностью одинаковых квадратов. Предварительно считается, что при размещении скважины в каком-либо квадрате координаты забоя скважины совпадают с центром этого квадрата. Максимальное количество блоков и, соответственно, минимальную площадь блока, можно найти, исходя из минимально допустимого расстояния между скважинами. Минимально допустимая длина стороны квадрата будет совпадать с этим расстоянием. Если предполагается использование горизонтальных скважин, то размеры блока должны позволять размещение горизонтального участка скважины, длина которого считается заданной.

В первоначальное множество блоков, составляющих залежь, включаются блоки, для которых геологические запасы (нефте- или газонасыщенные толщины) имеют значения, не меньшие заданной допустимой величины.

Введем исходные параметры. Пусть s - число добывающих скважин, n - число блоков, $n \geq s \geq 1$. Будем считать, что n делится без остатка на s. Введем параметр k – число блоков, приходящихся на одну скважину, т.е. $k=n/s$.

Пусть λ_j - параметр, характеризующий продуктивность («важность», «полезность») j-го блока или потенциальную эффективность скважины, размещенной в этом блоке. Рассмотрим наиболее простой способ оценки λ_j. Пусть, например, V_j - геологические запасы j-го блока, $V_j \geq 0$, а $V \equiv \max\{V_j\} > 0$, $j=1,\ldots,n$. Тогда формула для оценки λ_j будет иметь вид: $\lambda_j = V_j/V$ (данные о запасах каждого блока содержаться в геолого-гидродинамической модели залежи, построенной с использованием данных о пробной эксплуатации разведочных скважин). Параметр λ_j отражает степень приемлемости блока для размещения в нем забоя скважины.

Пусть R_{ij} - расстояние между центрами i-го и j-го блоков, $R_{ij} \geq 0$, $R_{ii}=0$, $R \equiv \max\{R_{ij}\} > 0$, $i=1,\ldots,n$, $j=1,\ldots,n$. Пусть $r_{ij}=R_{ij}/R$.

Определим параметр c_{ij} – «взвешенное расстояние» между i-м и j-м блоками:

$$c_{ij} = \begin{cases} (\lambda_j)^{1-\gamma} \cdot (r_{ij})^{\gamma}, i \neq j \\ 0, \qquad\qquad\qquad i = j \end{cases}, \tag{1}$$

где γ- экспертная оценка важности показателя «расстояние» по отношению к показателю «вес», $0 \le \gamma \le 1$. Следует отметить, что выбор γ для нефтяных и газовых может различаться. Например, если выбирается расстановка газовых скважин, то, учитывая, значительно более высокую подвижность газа по сравнению с нефтью, γ для газовых залежей будет иметь меньшие значения. Параметр c_{ij} можно трактовать, как штраф за нарушение правил *А* и *Б* за включение j-го блока в область влияния скважины, расположенной в i-м блоке. Под областью влияния понимается некоторая совокупность блоков вокруг скважины, из которых скважина получает основной приток пластовых флюидов.

Для повышения адекватности моделей расстановки скважин в качестве расстояния между любой парой блоков можно использовать не евклидово расстояние, выраженное в единицах длины, а параметры, характеризующие сопротивление фильтрации продвижению потока пластовых флюидов от одного блока к другому (подробное описание такой замены можно найти в статье [3]).

Введем искомые переменные - x_{ij}: $x_{ij}=1$, если j-й блок входит в область влияния (питания) скважины, находящейся в i-м блоке, и $x_{ij}=0$ в ином случае. Из определения x_{ij} следует: если $x_{ii}=1$, то в i-м блоке находится скважина, в ином случае: $x_{ii}=0$.

С учетом сформулированного выше понятия рациональности (пункты *А* и *Б*) формирование наилучшей схемы размещения скважин сводится к поиску таких x_{ij}, что

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} c_{ij} x_{ij} \to \min_{x}, \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ii} = s \tag{3}$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = k x_{ii}, \qquad i = \overline{1,n}\,, \tag{4}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1, \qquad j = \overline{1,n}\,, \tag{5}$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i = \overline{1,n},\ j = \overline{1,n}, \tag{6}$$

В модели (2)-(6): целевая функция в критерии (2) - суммарный штраф за нарушение правил *А* и *Б*; ограничение (3) - ограничение на число скважин; ограничения (4) – условия: каждая область влияния состоит из одинакового количества блоков; ограничения (5) - условия: любой блок может принадлежать только одной область влияния. Если k – число блоков, приходящихся на одну скважину, окажется не целым, то можно добавить фиктивные блоки, имеющие нулевые запасы, в количестве, необходимом для выполнения условия: $k=n/s$ – целое число. Т.к. по условию $c_{ij}=0$ при $j=i$ (1), то в целевой функции (2) переменные x_{ij} при $j=i$ отсутствуют.

Оптимальное решение задачи (2)-(6), не гарантирует формирования вариантов расстановки скважин, соответствующих максимальным значениям коэффициентов извлечения газа или нефти (соответственно, КИГ и КИН), которые являются целевыми функциями в гидродинамических симуляторах. Тем не менее, критерий (2), являясь количественным выражением правил рациональной расстановки скважин (*пункты А и Б*), будет обеспечивать величину коэффициентов извлечения газа или нефти, близкую к максимально возможному значению. Главное достоинство модели (2)-(6) в другом: из-за того, что алгоритмы решения задачи (2)-(6) не требуют обращения к гидродинамическому симулятору время формирования варианта расстановки скважин с их помощью значительно (радикально) меньше времени, необходимого для формирования варианта расстановки скважин с помощью средств, вынужденных на каждой итерации процесса оптимизации обращаться гидродинамическому симулятору.

2. Алгоритмы оптимизации схем размещения скважин

Решение задачи (2)-(6) может быть получено одним из стандартных методов дискретной оптимизации [5]. Другой подход к решению этой задачи предложен в работе [4] представляет собой комбинацию алгоритмов линейного программирования и алгоритмов случайного поиска. Такая комбинация основана на том, что при определенном фиксированном размещении скважин, т.е. при известных допустимых значениях переменных x_{ii} задача (2)-(6) становится классической транспортной задачей с правильным балансом по критерию стоимости [6].

Продемонстрируем преобразование задачи (2),(4)-(6) в транспортную задачу (Т-задачу) для элементов главной диагонали матрицы $\{x_{ij}\}_{n\times n}$, удовлетворяющих ограничениям (3) и (6):

$$x_{ii} = 1, i = \overline{1,s},\ x_{ii} = 0, i = \overline{s+1,n}. \qquad (7)$$

С учетом соотношений (4),(5),(7) задача (2)-(6) принимает вид:

$$\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=s+1}^{n} c_{ij}x_{ij} \to \min_{x}, \qquad (8)$$

$$\sum_{j=s+1}^{n} x_{ij} = k-1, \quad i = \overline{1,s}, \qquad (9)$$

$$\sum_{i=1}^{s} x_{ij} = 1, \quad j = \overline{s+1,n}, \qquad (10)$$

$$x_{ij} \ge 0, \quad i = \overline{1,s}, j = \overline{s+1,n}. \qquad (11)$$

В задаче (8)-(11) с учетом того, что $k=n/s$ является целым числом, сумма правых частей уравнений (9) и сумма правых частей уравнений (10) равняются (n–s). В силу ограничения (10) и условий (11) значения искомых переменных не могут оказаться больше 1. Т.к. правые части ограничений (9) и (10) являются строго положительными целыми числами, и введено условие (11), то «автоматически» будет выполняться условие (6) [5]. Поэтому возникает возможность при заданных значениях x_{ii}, где $i\in\{1,2,\ldots,n\}$, получать значения x_{ij}, где $i = \overline{1,s}, j = \overline{s+1,n}$, с помощью алгоритмов линейного программирования, более эффективных при решении задач большой размерности по сравнению с алгоритмами дискретного программирования. Остальные искомые переменные исходной задачи (2)-(6) полагаются равными нулю для выполнения ограничений задачи (2)-(6).

Поиск искомых переменных x_{ij}, где $i\neq j$, при заданных x_{ii}, где $i\in\{1,2,\ldots,n\}$, необходим для расчета целевой функции (2). Это позволяет формируемые случайным образом варианты размещения скважин ранжировать по эффективности с точки зрения критерия (2). По сути дела, решение серии задач (8)-(11) дает возможность не привлекать гидродинамический симулятор в процессе оптимизации.

Как выше было отмечено, в работе [4] был предложен случайный перебор вариантов размещения скважин, которые отличались друг от друга допустимыми наборами элементов главной диагонали матрицы искомых переменных. Каждый вариант размещения может быть сформирован с помощью датчика случайных чисел. Для каждого такого набора, решая задачу, подобную задаче (8)-(11), можно определить значение целевой функции (2) в оптимальном решении. Назовем получение этого значения при некотором варианте размещения скважин итерацией случайного поиска. После проведения нескольких итераций один из сформированных случайным образом вариантов размещения может иметь меньшее (рекордное) значение целевой функции (2) среди всех уже проверенных вариантов. Возникает вопрос: сколько *дополнительно* необходимо выполнить подряд итераций, в которых это значение целевой функции должно оставаться меньшим, чтобы с заданной доверительной вероятностью можно было бы утверждать, что рекордное значение и в последующих итерациях не будет улучшено, т.е. вариант, обладающий рекордным значением, является оптимальным решением задачи (2)-(6)? Назовем такие дополнительные итерации «контрольными».

В статье [4] предлагается определять верхнюю оценку числа контрольных итераций, используя формулу, приведенную в монографии [6]. В согласии с этой формулой верхнюю оценку числа контрольных итераций можно получить из следующих соображений. Пусть число всех допустимых наборов $\{x_{ii}\}$, т.е. вариантов размещения скважин, равняется N, а L число лучших по значению целевой функции (2) оптимальных решений Т-задач, аналогичных задаче (8)-(11). Будем считать, что оптимальное решение, входящее во множество L лучших решений, можно принять за окончательное решение исходной задачи (2)-(6). Обозначим через $D(L)$ – множество L лучших оптимальных решений. Тогда вероятность того, что оптимальное решение Т-задачи при некотором варианте размещения скважин принадлежит $D(L)$ будет равняться L/N. Пусть K – верхняя оценка необходимого числа контрольных итераций, а P – доверительная вероятность того, что, хотя бы один из K тестируемых наборов $\{x_{ii}\}$ будет обладать оптимальным решением Т-задачи, принадлежащим $D(L)$. При известном значении N и заданных значениях P и L оценку K можно получить из равенства [6]:

$$P = 1-(1-L/N)^K,$$

откуда

$$K = \ln(1-P)/\ln(1-L/N).$$

Пусть, например, P=0,95, а L/N=0,01. Тогда $K\approx 298$. Полученное значение числа контрольных итераций вполне приемлемо при расчетах на современных вычислительных средствах. Однако, учитывая, что N может достигать порядка нескольких миллионов даже при небольшом числе скважин, можно прогнозировать значение L порядка нескольких десятков тысяч при L/N=0,01. Это означает, что в качестве окончательного решения исходной задачи может быть выбран вариант размещения скважин, который будет уступать по значению целевой функции десяткам тысяч вариантов.

Ниже предлагается иной подход к оценке числа контрольных итераций при случайном выборе варианта размещения скважин, который позволяет уменьшить число контрольных итераций за счет учета вероятностных характеристик целевой функции (2) при случайном выборе вариантов размещения скважин. Подход основан на применении последовательного критерия отношения вероятностей (ПКОВ) [7]. С использованием последовательных измерений случайной величины ПКОВ устанавливает принадлежность случайной величины одной из двух плотностей распределений. Следуя [7], рассмотрим случайную величину Y и её реализации $y_1, y_2, \ldots, y_k$. Исследуются две гипотезы. Первая гипотеза – H_1: плотностью распределения (функцией плотности вероятности) Y является $f_1(y)$. Вторая гипотеза – H_2: плотностью распределения Y является $f_2(y)$. Вводятся вероятности ложного распознавания: e_{12} – вероятность принять H_1, когда на самом деле верна H_2, и e_{21} - вероятность принять H_2, когда на самом деле верна H_1. Определяются два порога: A и B:

$$\mathrm{A} = (1 - \mathrm{e}_{21})/\mathrm{e}_{(12)}, \quad \mathrm{B} = \mathrm{e}_{(21)}/\left(1 - \mathrm{e}_{(12)}\right) \tag{12}$$

Вводится отношение правдоподобия – δ_k:

$$\delta_k = \prod_{i=1}^{k} \frac{f_1(y_i)}{f_2(y_i)}. \tag{13}$$

Если выполняется $\delta_k \geq A$, то истинной считается H_1. Если выполняется $\delta_k \leq B$, то истинной считается H_2. Если же $B < \delta_k < A$, то необходимо получить x_{k+1}, затем по формуле (13) вычислить δ_{k+1} и снова сравнить δ_{k+1} с порогами A и B и т.д.

Применим ПКОВ для ответа на вопрос: можно ли принять в качестве оптимального решения задачи (2)-(6) оптимальное решение Т-задачи (8)-(11), соответствующее некоторому варианту размещения скважин и обладающее меньшим значением целевой функции (2) среди всех оптимальных решений Т-задач вида (8)-(11), полученных при случайном переборе вариантов размещения?

Для этого, прежде всего, определим y_{min} и y_{max} – соответственно, нижнюю и верхнюю оценки целевой функции (2). Нижняя оценка можно0 получить, решая задачу (2)-(5) с условием: $x_{ij} \geq 0$ вместо условия целочисленности искомых переменных (6). Такую задачу линейного программирования можно решить, например, симплекс-методом. Верхнюю оценку можно получить, решая задачу с ограничениями (3)-(5), условием $x_{ij} \geq 0$ и целевой функцией (2), которую требуется максимизировать. И для решения этой задачи линейного программирования можно применить симплекс-метод.

Таким образом, значения целевой функции (2) в допустимых решениях задачи (2)-(6) принадлежат отрезку $[y_{min}, y_{max}]$.

Далее, перебирая случайным образом допустимые значения x_{ii} – элементов главной диагонали матрицы искомых переменных задачи (2)-(6), что равносильно перебору вариантов расстановки скважин (пусть число таких вариантов равняется m), и, решая для каждого такого варианта расстановки Т-задачу вида (8)-(11), можно определить m значений целевой функции (2), т.е. m реализаций случайной величины Y, которой становится целевая функция (2). Обозначим полученные реализации через $y_1, y_2, \ldots, y_m$, причем реализации пронумерованы в порядке убывания: $y_1 \geq y_2 \geq \ldots \geq y_m$ и также принадлежат отрезку $[y_{min}, y_{max}]$. Если окажется, что $y_m = y_{min}$, то оптимальное решение Т-задачи вида (8)-(11), при котором целевая функция (8) имеет значение y_m становится оптимальным решением задачи (2)-(6) а оптимальным вариантом расстановки скважин будет m-й вариант.

Перейдем к исследованию ситуации, когда $y_m > y_{min}$. Ориентируясь на результаты численных экспериментов, представленные в работе [4], можно в качестве закона распределения случайной величины Y выбрать усеченное нормальное распределение. Если известно, что случайная величина Y принадлежит отрезку $[a,b]$, то плотность вероятности усеченного нормального распределения имеет вид [8]:

$$(y, \mu, \sigma, a, b) = \frac{1}{\sigma} \frac{\varphi((y-\mu)/\sigma)}{F((b-\mu)/\sigma) - F((a-\mu)/\sigma)}, \; a \leq Y \leq b, \tag{14}$$

f=0, в ином случае,

где $\varphi(\xi)$ – плотность вероятности стандартного нормального распределения:

$$\varphi(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\xi^2/2),$$

а функция $F(\eta)$ имеет вид:

$$F(\eta) = \left[1 + \mathrm{erf}(\eta/\sqrt{2})\right]/2.$$

Теперь, используя метод максимального правдоподобия, определим параметры μ и σ для плотности вероятности усеченного нормального распределения для двух ситуаций: 1) $a=y_m$, $b=y_{\max}$; 2) $a=y_{\min}$, $b=y_{\max}$. Для этого необходимо решить две задачи:

$$\prod_{i=1}^{m} f(y_i, \mu, \sigma, y_m, y_{max}) \to \max_{\mu,\sigma}, \qquad (15)$$

$$\prod_{i=1}^{m} f(y_i, \mu, \sigma, y_{min}, y_{max}) \to \max_{\mu,\sigma}, \qquad (16)$$

где функция $f(\cdot)$ определяется формулами (14).

Обозначим оптимальные решения задач (15) и (16), соответственно, через наборы $\{\mu_1,\sigma_1\}$ и $\{\mu_2,\sigma_2\}$. Пусть

$$f_1(y) = f(y, \mu_1, \sigma_1, y_m, y_{max}), \qquad (17)$$

$$f_2(y) = f(y, \mu_2, \sigma_2, y_{min}, y_{max}). \qquad (18)$$

После получения функций $f_1(y)$ и $f_2(y)$ по формулам (17) и (18) можно перейти к проверке гипотез H_1 и H_2 с помощью ПКОВ. Для этого с помощью датчика случайных чисел формируется новый $(m+1)$-й вариант размещения скважин, для этого варианта определяется y_{m+1}, вычисляется отношение правдоподобия δ_{m+1} (формула (13)) и сравнивается с порогами A и B (соотношения (12)). После этого либо продолжается формирование новых вариантов размещения (если $B<\delta_k<A$), либо при выполнении условия $\delta_{m+1}\geq A$ (верна гипотеза H_1) в качестве оптимального варианта расстановки скважин принимается $(m+1)$-й вариант). Если же выполняется условие $\delta_{m+1}\leq B$ (верна H_2), т.е. $y_{min}< y_{m+1}< y_m$ и $f_1(y)=0$), то необходимо найти новые значения μ_1 и σ_1, решая задачу (15). После этого операции повторяются.

3. Заключение

Рассмотренная в данной статье задача относится к задачам проектирования крупномасштабных систем. Предлагаемый подход к формированию схем размещения скважин на залежах нефти и газа, используя специфику задачи, заменяет решение исходной задачи булева программирования решением серии однотипных задач линейного программирования, для которых разработаны эффективные алгоритмы, приспособленные для решения задач большой размерности. Сокращение числа решаемых задач линейного программирования достигается проверкой статистических гипотез о значении целевой функции исходной задачи на основе последовательного критерия отношения вероятностей. Полученные с помощью такого подхода приближенные (в общем случае) решения, но близкие к оптимальным, можно рассматривать в качестве начальных (стартовых) решений, которые затем можно уточнить с помощью средств оптимизации программных комплексов по гидродинамическому моделированию, не затрачивая при этом значительные временные ресурсы.

Следует отметить, что значительные погрешности в исходной информации, необходимой для решения поставленной задачи, снижают ценность получения ее точного решения, что делает оправданным отказ от гарантированного получения оптимального (точного) решения исходной задачи.

Предлагаемую комбинацию алгоритмов линейного программирования и случайного поиска можно рассматривать в качестве одного из методов решения задач большой размерности.

Литература

1. *AlQahtani G.D.* Well Optmization Strategies in Conventional Reservoirs / G.D. AlQahtani, R. Vadapalli, S. Siddiqui, S. Bhattacharya. – 2012, SPE 160861.
2. *Ермолаев А.И., Ибрагимов И.И.* Модели рационального размещения скважин при разработке газовых и газоконденсатных месторождений // Труды Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – М.: ИПУ РАН, 2006. –Т. XXVII. – С. 118-123.
3. *Ermolaev A.I., Kuvichko A.M.* HPC-Based Optimal Well Placement // Proceedings of the EAGE Conference (ECMOR XIII). – Biarritz, France, 2012.

4. *Arsenyev-Obraztsov S.S.* Optimal sea floor placement of the oil/gas production equipment // S.S. Arsenyev-Obraztsov, A.I. Ermolaev, A.M. Kuvichko. – IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Vol. 700(1), 012011. – 2019.
5. *Корбут А.А.* Дискретное программирование / А.А. Корбут, Ю.Ю. Финкельштейн. – М.: Наука, 1969. – 368 с.
6. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Высшая школа, 1998. – 576 с.
7. *Фу, К.* Последовательные методы в распознавании образов и обучении машин / К. Фу. – М.: Наука, 1971. – 256 с.
8. *Линч С.* Введение в прикладную байесовскую статистику и оценку для социологов / Нью-Йорк: Спрингер, 2007. – ISBN 978-1-4419-2434-6.