

## **КОМБИНАТОРНЫЕ АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ НЕПРЕРЫВНОГО КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА СКВАЖИН**

**Калянов Г.Н.**

*(Институт проблем управления РАН, Москва)*

kalyanov@ipu.ru

**Титов Н.Н.**

*(ООО «НВП МОДЕМ», Москва)*

titov@nvp-modem.ru

**Шибeko В.Н.**

*(Гомельский государственный технический*

*университет, Гомель)*

svn20070809@gmail.com

*Исследована комбинаторная задача формирования согласованных календарных планов работ, обеспечивающих непрерывную загрузку выделяемых трудовых ресурсов на строительство группы скважин. Предложен подход к решению задачи календарного планирования, основанный на разработке адекватных алгоритмов комбинаторного поиска для различных стратегий оптимизации планового задания. Разработаны многоэтапные комбинаторные алгоритмы поиска наилучших вариантов планирования, основанные на методах динамического программирования и агрегирования. Алгоритмы учитывают не только порядок строительства скважин и маршруты переброски буровой техники, но и важные экономические факторы, включая дебит скважин и риски выполнения плановых заданий.*

Ключевые слова: непрерывное календарное планирование, комбинаторный поиск, динамическое программирование, агрегирование, оптимизация распределения ресурсов.

## 1. Введение

Цель календарного планирования строительства новых скважин заключается в составлении согласованного расписания выполнения планового задания с использованием выделенных ресурсов [1,2]. Принципиально важно контролировать не только сроки, но и порядок ввода новых скважин в эксплуатацию, т.к. от этого зависит динамика прироста добычи нефти на месторождении. Другой особенностью задачи календарного планирования является необходимость управления территориальным перемещением (маршрутами) буровых установок по объектам планирования. Подобные задачи не вписываются в классификацию теории расписаний (ТР) по типу искомого решения [3] и поэтому до сих пор малоизучены. Оптимизация очередности выполнения плановых операций сталкивается с анализом большого количества возможных вариантов расписания работ и необходимостью учета существенных временных и экономических факторов. Также требуется не только оптимизировать общую загрузку выделенных ресурсов, но и минимизировать издержки, связанные с организацией производственной деятельности и финансированием работ. Для этого необходимо аргументировано предложить систему показателей эффективности с учетом следующих принципов планирования:

- обеспечение постоянной загрузки исполнителей и контроль нагрузки на технические средства;
- формирование резерва времени на неблагоприятные события;
- ключевые мероприятия плана не должны приходиться на малые промежутки времени;
- соблюдение преемственности и непрерывности в планировании.

В настоящее время при массовом строительстве скважин используются методы «ручного» календарного планирования, основанные на эмпирических правилах составления пригодного расписания работ. Подобный подход заведомо приводит к неэффективным вариантам распределения выделяемых ресурсов.

Сложившаяся ранее методология решения оптимизационных задач нацелена на нахождение единственного решения за приемлемое время, удовлетворяющее математически выверенным критериям оптимальности. В задачах календарного планирования целесообразно искать не только единственное оптимальное решение (по некоторому многоэкстремальному критерию), но и ряд близких альтернативных решений. Такой подход обусловлен с одной стороны неоднозначностью восприятия показателей отдельных решений, с другой стороны рисками «потерять» наилучшее конечное решение. Поиск альтернативных решений довольно просто реализуется в алгоритмах комбинаторного анализа. Кроме того, комбинаторные методы позволяют организовать проверку не одного, а сразу нескольких критериев, что существенно расширяет возможности процесса поиска эффективных решений. Однако дальнейший отбор альтернативных решений сталкивается с проблемой распознавания структурной близости тех или иных плановых решений [4].

## **2. Модель непрерывного календарного планирования**

Базовая модель непрерывного календарного планирования (НКП) задается двумя группами параметров. Разбиение параметров на группы определяется наличием особенностей бизнес-процессов, характерных для организации работ в компаниях, осуществляющих массовое строительство скважин на различных месторождениях [1], [4]. К первой группе относятся общие начальные условия календарного планирования (ОНУКП):

$\{N, M, \Delta\bar{T}, \bar{Q}, \bar{S}, \bar{P}, \bar{\lambda}, \bar{\beta}\}$ , где

- $N$  - заданное количество скважин.
- $M$  - общее количество выделенных буровых бригад.
- $\Delta\bar{T} = (\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_N)$  - вектор оценок времени выполнения работ по строительству каждой скважины среднестатистической бригадой. .

- $\bar{Q} = (Q_1, \dots, Q_N)$  - вектор сложности строительства скважин, который характеризует долю времени работы в условиях требующих квалификации исполнителей ( $0 \leq Q_i \leq 1; i = 1, \dots, N$ ).
- $\bar{S} = (S_1, \dots, S_M)$  - нормированный вектор производительности бригад.
- $\bar{P} = (P_1, \dots, P_M)$  - нормированный вектор временных коэффициентов заработной платы ( $\sum_{j=1}^M P_j / M = 1$ ).
- $\bar{\lambda} = (\lambda_1, \dots, \lambda_N)$  - вектор ожидаемого дебита скважин, который измеряется в тоннах углеводородов за сутки.
- $\bar{\beta} = (\beta_1, \dots, \beta_N)$  - вектор оценок времени освоения новых скважин.

Во второй группе параметров задаются (или рассчитываются) стартовые параметры календарного планирования (СПКП):  $\{K, D, \bar{T}_0\}$ , где

- $K$  - общее количество задействованных буровых установок (станков).
  - $D((K + N) \times (K + N))$  - матрица переброски, элементы которой соответствуют нормативным оценкам времени выполнения всего комплекса обеспечивающих работ по переброске станков между объектами планирования.
- $\bar{T}_0 = (\Delta\tau_1, \Delta\tau_2, \dots, \Delta\tau_M), \Delta\tau_j \geq T_n, j = 1, \dots, M$  -

вектор времен готовности бригад к стартовым работам.

Важнейшей характеристикой, влияющей на формирование календарного плана работ, является оценка времени строительства скважины. Учет рейтинга бригад требует нового подхода к оцениванию этой важнейшей для календарного планирования

временной характеристики. Предположим, что более быстрая работа (скорость бурения) в осложненных условиях является основным преимуществом более квалифицированных и опытных буровых бригад. Тогда, с учетом ранее введенных величин, оценка времени выполнения  $i$  - той работы  $j$  - той бригадой определяется по формуле:

$$t_{ij} = \Delta t_i * (1 + Q_i * (1 - S_j)), i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M .$$

Данную оценку в силу её конструкции назовем мультипликативной. Таким образом, вместо вектора  $\Delta \bar{T}$  рассчитывается матрица времен выполнения работ

$$T_{РАБ}^{Pacu} [N \times M] = \{t_{ij}\}, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M .$$

В других постановках задач календарного планирования матрица времен выполнения работ ( $T_{РАБ} [N \times M]$ ) может не рассчитываться, а просто задаваться. Модель календарного планирования должна допускать возможность принудительного назначения бригад на скважины, которое является основным механизмом «ручного» составления календарных планов.

По типу целевой функции в классификации теории расписаний [3] задачу НКП следует отнести к многокритериальным задачам оптимизации. Математически данная задача относится к классу комбинаторных задач. Требуется предложить комбинаторный алгоритм поиска эффективных решений. Современные вычислительные средства (многопроцессорные скоростные компьютеры) и разработка единой инструментальной среды для прикладных программных комплексов (объектно-ориентированные каркасы [5]) значительно расширили область практического решения подобных комбинаторных задач за разумное время вычислений. Многие комбинаторные вопросы успешно решаются благодаря «продвинутому» алгоритмам и высокоскоростным методам решения [6]. Смешанная стратегия решения комбинаторных задач, основанная на методах динамического программирования и агрегирования, часто приводит к эффективным результатам. При этом не следует бояться потерять наилучшее решение, тем более реально существует проблема нехватки

вычислительных ресурсов из-за большой размерности комбинаторных задач. Из всего многообразия возможных расписаний организации работ только сравнительно небольшая часть заслуживает внимания.

Модель календарного планирования достаточно универсальна и может быть адаптирована для многих приложений, например, массовое строительство территориально-распределенных объектов, проведение плановых дорожных ремонтов с привлечением трудовых и технических ресурсов, организация обслуживания заявок клиентов в транспортно-логистических компаниях. Кроме того, легко трансформировать модель НКП для задач планирования капитальных ремонтов фонда эксплуатационных скважин, которые требуют оптимизации сроков ремонтов, загрузки собственных бригад и минимизации потерь в добычи углеводородов.

### **3. Многоэтапная задача календарного планирования**

Анализируя реальный процесс подготовки календарных планов строительства скважин в крупных компаниях, можно выделить три последовательных этапа. На первом этапе (аналог «объемно-календарного» планирования) решается подзадача распределения новых скважин между исполнителями. Порядок выполнения работ на этом этапе не важен. Фактически необходимо убедиться, что запланированных трудовых ресурсов ( $M$ ) достаточно для выполнения плана и предложить неупорядоченное расписание выполнения работ, под которым понимается разбиение множества  $\{N\}$  на  $M$  непересекающихся подмножеств  $N_1, N_2, \dots, N_M$ . Скважины из множества  $N_j$  приписываются  $j$ -той бригаде.

Календарное планирование подразумевает скорейшее выполнение планового задания с использованием всех бригад. Этому требованию соответствует задача нахождения оптимального по быстродействию расписания, т.е. расписания минимальной длины. Имеем:

$$\min_{\left\{ (N_1, \dots, N_M); \{N\} = \bigcup_{j=1}^M N_j; N_{j_1} \cap N_{j_2} = \emptyset; j_1 \neq j_2 \right\}} \max_{1 \leq j \leq M, i \in N_j} (\sum t_{ij}) = T_{opt} .$$

В качестве еще одного показателя эффективности предлагается

$$\text{взвешенная временная сумма } \bar{T}_{\Sigma} = \sum_{j=1}^M (P_j * R_j) / M ,$$

которая характеризует финансовые затраты на оплату услуг всех бригад (аналог среднего количества «трудодней»). Поэтому, первоначально отбираются расписания с минимальными значениями суммы двух показателей эффективности:  $T_Y = T_{план} + \bar{T}_{\Sigma}$ .

Как и для многих комбинаторных задач, весьма вероятны случаи появления «клонных» (структурно мало отличающихся) решений [6] с близкими значениями показателей эффективности. Предложена процедура отсева «клонных» решений с использованием матрицы расстояний Хэмминга. В результате имеем множество альтернатив первого этапа:

$$\left\{ (N_1, \dots, N_M) : \bigcup_{j=1}^M N_j = \{N\}, N_{j_1} \cap N_{j_2} = \emptyset, j_1 \neq j_2 \right\} .$$

Второй этап планирования заключается в формировании упорядоченного расписания работ для всех альтернатив первого этапа. Раздельная постановка задачи календарного плана инициализирует построение многоальтернативного дерева решений, которое и является предметом целенаправленного комбинаторного поиска. При строительстве скважин целесообразно максимизировать суммарный прирост добычи по мере ввода в эксплуатацию новых скважин. Имеем хронологический порядок строительства скважин  $(t_1^H, t_2^H, \dots, t_N^H)$ . Функция суммарного прироста дебита  $\Delta DEB(T)$  является ступенчатой, монотонно-возрастающей и переходящей в линейную функцию с коэффициентом роста  $\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \lambda_i$ . Суммарный прирост добычи обеспечивается каждой бригадой, поэтому можно решать оптимизационную

задачу упорядочивания строительства для каждой бригады в отдельности и независимо (т.н. «агрегирование» [7]), что существенно уменьшает число возможных вариантов. Зафиксируем

$$T_K(j) = \sum_{i \in N_j} t_{ij} + \max_{i \in N_j} \beta_i. \text{ Легко убедиться, что искомым критерий эквивалентен решению для каждой бригады задачи:}$$

риий эквивалентен решению для каждой бригады задачи:

$$\min_{\{t_i^H, i \in N_j\}} \sum_{i \in N_i} \lambda_i * (T_K(j) - t_i^H)$$

Отбор упорядоченных альтернатив производится по критерию максимального суммарного прироста дебита за счет строительства новых скважин всеми бригадами.

Третий этап планирования (маршрутизация) зависит от конкретной ситуации, которая определяется набором параметров СПКП базовой модели НКП. Каждому упорядоченному расписанию соответствует различное число допустимых вариантов расстановки имеющихся буровых станков. Критерием эффективности расстановки станков по скважинам является минимизация суммарного времени переброски станков для обеспечения выполнения плана ( $T_{nep}^{\Sigma}$  - сумма соответствующих элементов матрицы

переброски  $D$ ). Каждая плановая переброска станков имеет временной резерв на выполнение данной операции

$$Z_i, i = 1, 2, \dots, N. \text{ Обозначим } \Delta Z = \min_{1 \leq i \leq N} Z_i - \text{минимальный резерв времени. Чем больше минимальный временной резерв для упорядоченного расписания работ, тем меньше риски, связанные с задержкой не только операций по переброске, но и основных работ, выполняемых буровыми бригадами.}$$

В работе [1] рассматривалась модель НКП без учета ценности работ. Для этих условий был предложен алгоритм минимизации технической загрузки календарного плана, основанный на двухшаговой процедуре поиска наилучшего порядка выполнения работ. Минимизировалось суммарное время переброски станков

$$T_{nep}^{\Sigma}, \text{ и контролировался минимальный резерв времени на операции по переброске станков } \Delta Z. \text{ В этом алгоритме для}$$

рации по переброске станков  $\Delta Z$ . В этом алгоритме для

отобранных альтернатив первого этапа проводилось упорядочивание с учетом оптимизации маршрутов передвижения станков (по сути, второй и третий этап объединены).

Обобщая результаты проведенных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Существующая практика «ручного» составления календарных планов массового строительства скважин не реализует в полном объеме возможности централизованного распределения выделяемых ресурсов.
2. Формализована базовая модель непрерывного календарного планирования строительства скважин, учитывающая наиболее важные особенности бизнес-процессов организации работ в крупных нефтегазодобывающих компаниях.
3. Предложена мультипликативная формула расчета времени строительства скважины с учетом ее сложности и квалификации буровой бригады.
4. Показано, что задача оптимизации распределения скважин между бригадами по критерию быстродействия математически эквивалентна известной задаче оптимизации планирования многопроцессорных вычислений.
5. С учетом экономической целесообразности и особенностей массового строительства скважин, сформулированы количественные показатели эффективности, позволяющие проводить отбор альтернативных календарных планов. Описана процедура отсева «клонových» решений с использованием матрицы расстояний Хэмминга.
6. В зависимости от наличия информации о дебите новых скважин предложены многоэтапные алгоритмы комбинаторного поиска, основанные на методах динамического программирования и агрегирования. Характерно, что календарные планы, полученные с помощью программно-реализованных комбинаторных алгоритмов поиска, согласуются с общепринятыми приемами составления «ручных» расписаний. Этот факт позволяет контролируемо снижать размерность задач комбинаторного анализа.

## Литература

1. КАЛЯНОВ Г.Н., ТИТОВ Н.Н., ШИБЕКО В.Н. *Поиск эффективных решений задач непрерывного календарного планирования*, // Информационные технологии и вычислительные системы, М.: ,2018, №1, С. 85-98.
2. БАРКАЛОВ С.А., БУРКОВА И.В., ГЛАГОЛЕВ А.В., КОЛПАЧЕВ В.И. *Задачи распределения ресурсов в управлении проектами*, М.:ИПУ РАН, 2002, - 65 с.
3. ЛАЗАРЕВ А.А., ГАФАРОВ Е.Р.. *Теория расписаний. Задачи и алгоритмы*, М.: МГУ, 2011, -222 с.
4. ТИТОВ Н.Н. *Разработка системы поддержки непрерывного календарного планирования: Экономико-математическое обеспечение крупной буровой компании (ISBN 978-3-330-05632-9)*, 2017, - 81 с.
5. АНИЧКИН А.С., СЕМЕНОВ В.А. *Объектно-ориентированный каркас для программной реализации приложений теории расписаний*. /Труды ИСП РАН, том 29, вып. 3, 2017 г., С. 247-296. DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(3)-14.
6. ДОНАЛЬД Э. КНУТ *Искусство программирования. Том 4А / Комбинаторные алгоритмы, часть I*, изд-во «Вильямс», 2013, -955 с.
7. БАРКАЛОВ С.А., БУРКОВ В.Н., ГИЛЯЗОВ И.М, *Методы агрегирования в управлении проектами*. М.:ИПУ РАН, 1999, - 55 с.