

DOI: 10.15593/2499-9873/2020.1.05

УДК 519.1; 519.8

Г.Н. Калянов¹, Н.Н. Титов², В.Н. Шибeko³

¹Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Москва, Россия

²ООО «НВП МОДЕМ», Москва, Россия

³Гомельский государственный технический университет
им. П.О. Сухого, Гомель, Республика Беларусь

НЕПРЕРЫВНОЕ КАЛЕНДАРНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ В УСЛОВИЯХ МАССОВОГО СТРОИТЕЛЬСТВА СКВАЖИН. ЧАСТЬ 2

В первой части работы была описана модель непрерывного календарного планирования строительства группы скважин с использованием выделенных трудовых ресурсов и технических средств. Предложен многоэтапный комбинаторный алгоритм поиска эффективного календарного плана выполнения работ, основанный на методах динамического программирования и агрегирования. В настоящей части на простом числовом примере анализируется практическая эффективность комбинаторных алгоритмов поиска в зависимости от наличия информации о дебите новых скважин. Характерно, что календарные планы, полученные с помощью программно реализованных комбинаторных алгоритмов поиска, согласуются с общепонятными приемами составления «ручных» расписаний. Этот факт позволяет контролируемо снижать размерность задач комбинаторного анализа. Предложена мультипликативная формула расчета времени строительства скважины с учетом ее сложности и квалификации буровой бригады. Сформулированы количественные показатели эффективности, позволяющие проводить отбор альтернативных календарных планов. Описана процедура отсева «клоновых» решений с использованием матрицы расстояний Хэмминга.

Ключевые слова: нефтегазодобывающие предприятия, массовое строительство буровых скважин, непрерывное календарное планирование, комбинаторный поиск, динамическое программирование, агрегирование, многоальтернативные решения, расстояния Хэмминга, оптимизация распределения ресурсов, график движения буровых бригад.

G.N. Kalyanov¹, N.N. Titov², V.N. Shibeko³

¹V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the RAS,
Moscow, Russian Federation

²LTD “NVP MODEM”, Moscow, Russian Federation

³Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Republic of Belarus

CONTINUOUS SCHEDULING IN CONDITIONS OF MASS WELL CONSTRUCTION. PART 2

In the first part of the work, a model of continuous scheduling of the construction of a group of wells using dedicated labor resources and technical means was described. A multi-stage combinatorial algorithm for finding an effective work schedule based on dynamic programming and aggregation methods is proposed. This part uses a simple numerical example to analyze the practical effectiveness of

combinatorial search algorithms depending on the availability of information about the flow rate of new wells. It is characteristic that the calendar plans obtained with the help of software-implemented combinatorial search algorithms are consistent with the generally understood methods of drawing up "manual" schedules. This fact makes it possible to reduce the dimension of combinatorial analysis problems in a controlled way. A multiplicative formula for calculating the well construction time is proposed taking into account its complexity and the skills of the drilling crew. Quantitative performance indicators are formulated that allow the selection of alternative calendar plans. The screening procedure for "clone" solutions using the Hamming distance matrix is described.

Keywords: oil and gas companies, well mass construction, continuous scheduling, combinatorial search, dynamic programming, aggregation, multi-alternative solutions, Hamming distance, optimization of resource allocation, drilling crew schedule.

Введение

В первой части работы была описана модель непрерывного календарного планирования (НКП) массового строительства группы буровых скважин, которая заключалась в составлении согласованного расписания выполнения планового задания с использованием выделенных трудовых ресурсов и технических средств [1, 2]. Целевая функция НКП согласно классификации в теории расписаний [3] относит рассматриваемую задачу к задаче многокритериальной оптимизации. Для решения проблемы распознавания структурной близости возможных решений [4] при отборе альтернативных планов было предложено использовать матрицу расстояний Хемминга [5]. Учет влияния сложности работы на время ее выполнения предлагалось осуществлять с помощью экспертных оценок [6]. Для сокращения числа возможных вариантов предлагается решать задачу упорядочивания отдельно для каждой бригады (так называемое агрегирование [7]). Было показано, что задача оптимизации распределения скважин между бригадами по критерию быстродействия математически эквивалентна известной задаче оптимизации планирования многопроцессорных вычислений [8–10]. В настоящей части на простом числовом примере анализируется практическая эффективность комбинаторных алгоритмов поиска в зависимости от наличия информации о дебите новых скважин.

Пример поиска и отбора эффективных решений задачи календарного планирования строительства скважин

Пусть $N = 10$ – общее количество эксплуатационных скважин, которые необходимо построить.

$M = 3$ – общее количество буровых бригад (ББ), одновременно участвующих в бурении. В качестве перемещаемых станков рассматриваются однотипные буровые установки (БУ).

Предложен следующий ситуационный сценарий:

1. Рассмотрим месторождение с тремя территориальными площадями:

- старая с простыми и сложными скважинами (площадь А);
- старая со сложными скважинами (площадь Б);
- новая, отдаленная с различными типами скважин (площадь В).

2. Недобуренные скважины: для ББ1 из А; для ББ2 и ББ3 из Б.

3. Скважины (1, 3, 5) из А; скважины (4, 8, 9) из Б; скважины (2, 6, 7, 10) из В.

Общие начальные условия календарного планирования базовой модели НКП заданы в двух таблицах (табл. 1, 2).

Таблица 1

Прогнозные параметры новых скважин

Номер скважины	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Площадь бурения*	А	В	А	Б	А	В	В	Б	Б	В
Время строительства Δt^B , в сут	10	12	20	24	30	34	40	42	50	55
Сложность скважины Q	0	0	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4
Оценка дебита скважины $\bar{\lambda}$	10	13	11	15	12	14	14	18	20	15
Оценка времени освоения $\bar{\beta}$	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4

Примечание: * – привязка скважин по площадям бурения.

Таблица 2

Параметры рейтинга бригад

Номер ББ	1	2	3
Начальное положение**	А	Б	Б
Квалификация S_j	0,4	1,0	1,6
Коэффициент зарплаты P_j	0,8	1,0	1,2

Примечание: ** – начальная привязка буровых бригад к площадям бурения.

Тогда расчетная матрица значений времени строительства $T_{РАБ}^{Расч} [10 \times 3]$ примет вид, представленный в табл. 3.

Параметры модели выбраны таким образом, что более сложные скважины имеют большую длительность работ. Оценка дебита скважин (т/сут) зависит от площади бурения и сложности строительства самой скважины. Площадь Б имеет небольшое преимущество по характеристикам дебита новых скважин. Суммарный дебит новых сква-

жин составляет 142 т/сут. Первая бригада является менее квалифицированной, и ее услуги оплачиваются по меньшему тарифу. Третья бригада имеет наибольшую производительность, но ее услуги оплачиваются по максимальному временному тарифу. Время задается в сутках. Календарное планирование работ по строительству скважин требует одновременной загрузки всех буровых бригад.

Таблица 3

Расчетная матрица значений времени строительства

Номер ББ	Номер скважины										Сумма времени	Сумма зарплат
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	10	12	22,4	26,88	35,4	40,12	47,2	49,56	62	68,2	373,76	299,01
2	10	12	20	24	30	34	40	42	50	55	317	317
3	10	12	17,6	21,12	24,6	27,88	32,8	34,44	38	41,8	260,24	312,29

Рассмотрим решение первого этапа поиска (неупорядоченные расписания) для данного примера (53049 – общее число возможных вариантов). На рис. 1 точками нанесен фрагмент всевозможных решений в координатах $T_{\text{план}}$ (ось OX) и $T_{\text{план}} + \check{T}_{\Sigma}$ (ось OY). Отметим, что в интервале $T_{\text{план}} \in [102, 48; 103, 84]$ вообще отсутствуют решения данной задачи, а в интервал $[101, 4; 102, 48]$ попадает всего 12 решений. Дальнейший отбор решений проводим по минимуму значений суммы $T_{\text{план}} + \check{T}_{\Sigma}$.

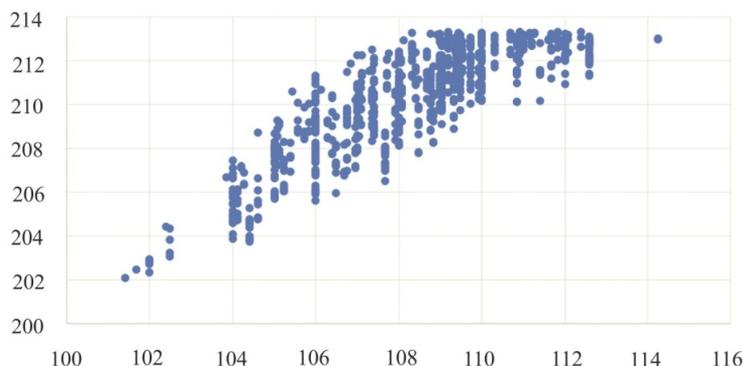


Рис. 1. Всевозможные решения «Первый этап поиска» (фрагмент множества)

В результате поиска имеем табл. 4, которая содержит 20 неупорядоченных расписаний, лучших по критерию минимума $T_{\text{план}} + \check{T}_{\Sigma}$.

Таблица 4

Лучшие неупорядоченные расписания

Вариант	Мини-макс	Трудодни	Сумма	N1	N2	N3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20219	101,4	100,7093	202,1093	4	3	3	2	1	1	1	3	1	2	3	2	3
3689	102	100,3733	202,3733	4	3	3	1	1	2	3	1	1	2	2	3	3
23606	101,68	100,816	202,496	3	4	3	2	1	2	3	2	1	2	1	3	3
20237	102	100,72	202,72	4	3	3	2	1	1	1	3	1	3	2	2	3
7097	102	100,8427	202,8427	4	3	3	1	2	1	1	3	1	2	3	2	3
23588	102	100,8533	202,8533	3	4	3	2	1	2	3	2	1	1	2	3	3
10484	102	100,9493	202,9493	3	4	3	1	2	2	3	2	1	2	1	3	3
2651	102,48	100,576	203,056	4	3	3	1	1	2	1	2	3	3	1	2	3
19913	102,48	100,7733	203,2533	4	3	3	2	1	1	1	1	3	3	2	2	3
2789	104,4	99,344	203,744	4	3	3	1	1	2	1	3	2	2	1	3	3
2771	104,4	99,38133	203,7813	4	3	3	1	1	2	1	3	2	1	2	3	3
26708	102,48	101,3493	203,8293	3	4	3	2	2	1	1	2	3	3	1	2	3
20213	104,4	99,46667	203,8667	4	3	3	2	1	1	1	3	1	2	2	3	3
4733	104	99,87733	203,8773	4	3	3	1	1	3	1	2	2	2	1	3	3
1331	104,4	99,48267	203,8827	4	3	3	1	1	1	2	3	2	2	1	3	3
2717	104,4	99,49333	203,8933	4	3	3	1	1	2	1	3	1	2	2	3	3
1313	104,4	99,52	203,92	4	3	3	1	1	1	2	3	2	1	2	3	3
7091	104,4	99,6	204	4	3	3	1	2	1	1	3	1	2	2	3	3
1817	104	100,0907	204,0907	4	3	3	1	1	1	3	2	2	2	1	3	3
22340	102,48	101,8933	204,3733	3	4	3	2	1	2	1	2	3	3	2	1	3

При отборе альтернатив необходимо учитывать не только отличие в назначении бригад на конкретные скважины, но и отличие в общем количестве скважин. Отметим, что во всех вариантах для третьей бригады достаточно трех скважин, при этом обязательна самая сложная (№ 10). Выберем первые $S_0 = 8$ неупорядоченных расписаний из таблицы и рассчитаем матрицу расстояний Хэмминга, которая является мерой отличия различных вариантов.

Имеем

$$H_0 = \begin{matrix} & 0 & 6 & 7 & 2 & 2 & 8 & 9 & 6 \\ & 6 & 0 & 5 & 6 & 6 & 5 & 5 & 6 \\ & 7 & 5 & 0 & 8 & 9 & 2 & 2 & 7 \\ & 2 & 6 & 8 & 0 & 4 & 7 & 10 & 5 \\ & 2 & 6 & 9 & 4 & 0 & 10 & 7 & 6 \\ & 8 & 5 & 2 & 7 & 10 & 0 & 4 & 8 \\ & 9 & 5 & 2 & 10 & 7 & 4 & 0 & 7 \\ & 6 & 6 & 7 & 5 & 6 & 8 & 7 & 0 \end{matrix}$$

Ранг матрицы $H_0[8, 8]$ равен 7. Нетрудно убедиться, что 4 варианта из 8 отличаются от более перспективных всего на перестановку одной скважины. Варианты № 20237 и № 7097 отличаются от оптимального варианта № 20219 перестановкой одной скважины $7 \leftrightarrow 8$ и $1 \leftrightarrow 2$. Аналогично варианты № 23588 и № 10484 отличаются на перестановку одной скважины: от ранее отобранного решения № 23606, а именно $1 \leftrightarrow 2$ и $7 \leftrightarrow 8$. В результате отбираем 4 альтернативных решения для дальнейшего анализа. Появление клоновых решений объясняется близостью значений времени бурения данных скважин (отличие только на два дня и одинаковая сложность). Имеем следующую «прореженную» матрицу Хэмминга:

$$H[4, 4] = \begin{pmatrix} 0 & 6 & 7 & 6 \\ 6 & 0 & 5 & 6 \\ 7 & 5 & 0 & 7 \\ 6 & 6 & 7 & 0 \end{pmatrix}$$

Ранг матрицы $H[4, 4]$ равен 4.

Таблица альтернативных решений первого этапа поиска – табл. 5.

Таблица 5

Альтернативные решения первого этапа поиска

№ п/п	Номер варианта	Время $T_{\text{план}}$	Трудодни \tilde{T}_{Σ}	Критерий «сумма»	ББ1 (номер скв.)	ББ2 (номер скв.)	ББ3 (номер скв.)	Обозначение	Послед. ББ
1	20219	101,4	100,7093	202,1093	2,3,4,6	1,7,9	5,8,10	Опт.	ББ1
2	3689	102	100,3733	202,3733	1,2,5,6	3,7,8	4,9,10	А1	ББ2
3	23606	101,68	100,816	202,496	2,6,8	1,3,5,7	4,9,10	А2	ББ1
4	2651	102,48	100,576	203,056	1,2,4,8	3,5,9	6,7,10	А3	ББ3

Если не учитывать отличие ББ по заработной плате ($P_1 = P_2 = P_3 = 1$), то выбраны будут те же, но вариант № 20219 уже не будет иметь суммарных временных преимуществ перед вариантом № 3689. Отметим, что улучшение суммарного времени бурения всех скважин в варианте № 3689 было обеспечено за счет более длительного использования квалифицированных бригад.

Время выполнения плана у всех альтернативных решений незначительно отличается от минимаксного значения $T_{\text{онт}} = 101,4$, что указывает на предельно равномерное распределение скважин между бригадами по суммарному времени выполнения планируемых работ. Ввиду этого усло-

вие сохранения начального рассредоточения окончания работ будет заведомо выполняться для всех отобранных альтернативных расписаний.

Можно сделать следующие промежуточные выводы по первому этапу поиска:

$$1. \text{ Вариант № 20219} - \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & 3 & 1 & 2 & 3 & 2 & 3 \end{pmatrix} \text{ обеспе-}$$

чивает оптимальное (минимаксное) неупорядоченное расписание $T_{\text{опт}} = 101,4$.

2. Для дальнейшего анализа отобрано 4 альтернативных неупорядоченных расписания, в которых имеются значимые отличия в распределении скважин между бригадами.

3. Рекомендация 1: Скважину № 10 (самая сложная по времени и осложнениям) целесообразно отдать самой квалифицированной бригаде.

4. Рекомендация 2: Скважину № 2 (простая, без осложнений и более длительная по времени) целесообразно сразу отдать менее квалифицированной бригаде.

5. Если следовать этим рекомендациям, которые часто используют при «ручном» составлении планов, и принудительно распределить скважины №№ 10, 2, то число вариантов уменьшится в 9 раз и составит 5894.

На втором этапе организуем цикл обработки по всем альтернативам первого этапа, но прежде зададим остальные стартовые параметры модели НКП (СПКП):

- $K = K_{\min} = 5$ – количество буровых станков (установок) в наличии;
- $\bar{T}_0 = (1, 12, 24)$ – вектор времени «добуривания» («освобождение» ББ и БУ);
- первоначально две «свободные» (БУ4 и БУ5) находятся на «базе»;
- пусть задана следующая матрица переброски $D(15 \times 15)$:

Номер скв. и площадь	-3	-2	-1	«0»	«0»	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	Б	Б	А	База	База	А	В	А	Б	А	В	В	Б	Б	В	
-3	Б	0	6	12	11	11	14	10	12	5	12	10	12	5	5	11
-2	Б	6	0	11	10	10	12	10	10	5	10	11	12	6	5	12
-1	А	12	11	0	7	7	5	16	5	12	5	17	18	12	11	18
«0»	База	11	10	7	0	0	8	16	7	12	8	17	18	11	10	18
«0»	База	11	10	7	0	0	8	16	7	12	8	17	18	11	10	18
1	А	14	12	5	8	8	0	16	6	13	6	18	18	13	13	19
2	В	10	10	12	16	16	16	0	15	9	15	5	6	11	10	7
3	А	12	10	5	7	7	6	15	0	11	5	16	17	11	11	18
4	Б	5	5	16	12	12	13	9	11	0	11	10	11	5	5	11
5	А	12	10	5	8	8	6	15	5	11	0	16	17	12	11	17
6	В	10	11	17	17	17	18	5	16	10	16	0	5	11	11	6
7	В	12	12	18	18	18	18	6	17	11	17	5	0	13	12	6
8	Б	5	6	12	11	11	13	11	11	5	12	11	13	0	5	12
9	Б	5	5	11	10	10	13	10	11	5	11	11	12	5	0	12
10	В	11	12	18	18	18	19	7	18	11	17	6	6	12	12	0

Предполагается, что изолированных скважин нет и переброска техники носит двусторонний характер (туда и обратно за одинаковое время).

Первоначально рассмотрим неупорядоченное расписание (Опт.), соответствующее оптимальному значению времени выполнения плана ($T_{\text{опт}} = 101,4$). Общее число вариантов упорядоченных расписаний составит $4! * 3! * 3! = 864$. Однако с учетом стартовых параметров модели НКП только 39 вариантов упорядоченных расписаний альтернативы (Опт.) имеют значимый резерв времени на операции по переброске станков $\Delta Z > 2$. В статье [1] для критерия минимальности технической загрузки календарного плана было показано, что вариант № 177:

$$\begin{pmatrix} 6 & 1 & 9 & 8 & 2 & 3 & 10 & 7 & 4 & 5 \\ 1 & 2 & 2 & 3 & 1 & 1 & 3 & 2 & 1 & 3 \\ 4 & 1 & 2 & 5 & 3 & 1 & 4 & 3 & 5 & 1 \end{pmatrix}$$

имеет наилучшие характеристики по расстановке станков: $T_{\text{пер}}^{\Sigma} = 76$ и $\Delta Z = 6$. Первая строка – порядок строительства скважин, вторая – номер буровой бригады, третья – номер бурового станка. Упорядочивание по критерию максимального суммарного прироста добычи (проводится отдельно для каждой буровой бригады) отдает предпочтение варианту № 682 с последующей оптимизацией маршрутов станков (третий этап).

Имеем наилучшее упорядоченное расписание строительства скважин (первая строка), обеспечивающее максимальный прирост добычи:

$$\begin{pmatrix} 2 & 1 & 4 & 9 & 8 & 3 & 5 & 6 & 7 & 10 \\ 1 & 2 & 1 & 2 & 3 & 1 & 3 & 1 & 2 & 3 \\ 4 & 1 & 5 & 2 & 4 & 1 & 5 & 3 & 4 & 1 \end{pmatrix}.$$

На рис. 2 приведена динамика суммарного прироста добычи по мере ввода в эксплуатацию новых скважин для обоих вариантов.

Суммарный прирост добычи на момент окончания планирования для варианта № 177 составил: $\Delta \text{ДЕВ}(T_K = 128,84) = 6861$ т, а для оптимального варианта № 682 $\Delta \text{ДЕВ}(T_K = 128,84) = 7741$ т, но при этом характеристики расстановки станков $T_{\text{пер}}^{\Sigma} = 107$ и $\Delta Z = 0,56$.

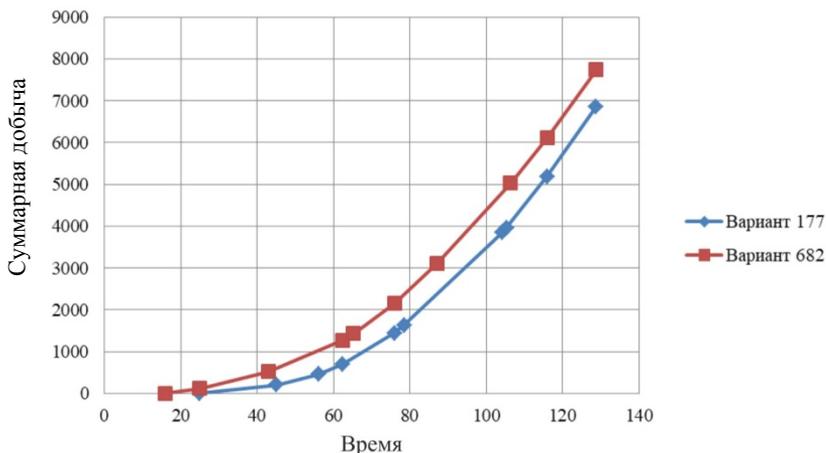


Рис. 2. Динамика роста добычи по мере ввода в эксплуатацию новых скважин

Таким образом, для данных стартовых параметров у оптимального упорядоченного расписания практически отсутствует временной резерв на переброску буровых станков. Потребуется увеличение общего количества буровых станков $K = K_{\min} = 6$ (это плата за получение дополнительных 880 т углеводородов). На рис. 3 показана динамика вклада каждой бригады в суммарный прирост добычи для оптимального варианта строительства скважин (№ 682). Отметим, что порядок строительства скважин для второй бригады в обоих вариантах совпадает ($1 \rightarrow 9 \rightarrow 7$).

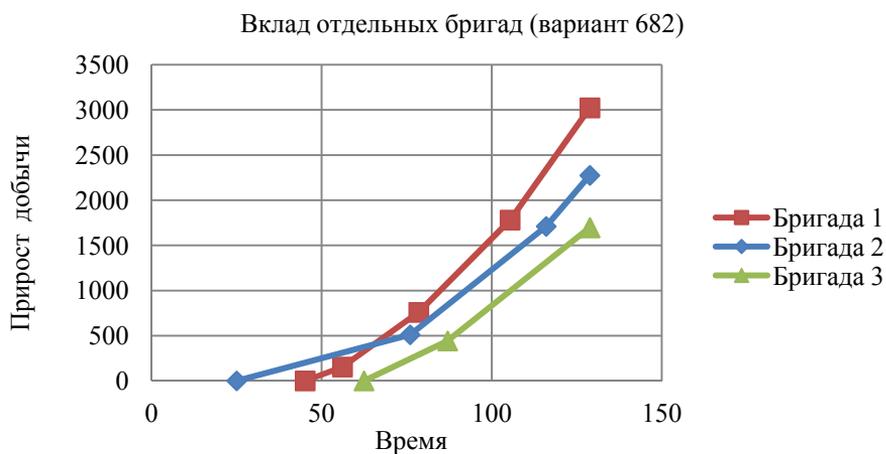


Рис. 3. Динамика бригадного прироста добычи

Если на втором этапе поиска использовать простейший критерий упорядочивания по времени строительства, то наилучшим будет вариант № 749:

$$\begin{pmatrix} 2 & 1 & 3 & 7 & 5 & 4 & 8 & 9 & 6 & 10 \\ 1 & 2 & 1 & 2 & 3 & 1 & 3 & 2 & 1 & 3 \end{pmatrix}.$$

В этом случае суммарный прирост добычи составит 7539 т. Таким образом, недополучено будет 202 т углеводородов по сравнению с вариантом № 682, что эквивалентно временной задержке в планировании на 1,42 дня.

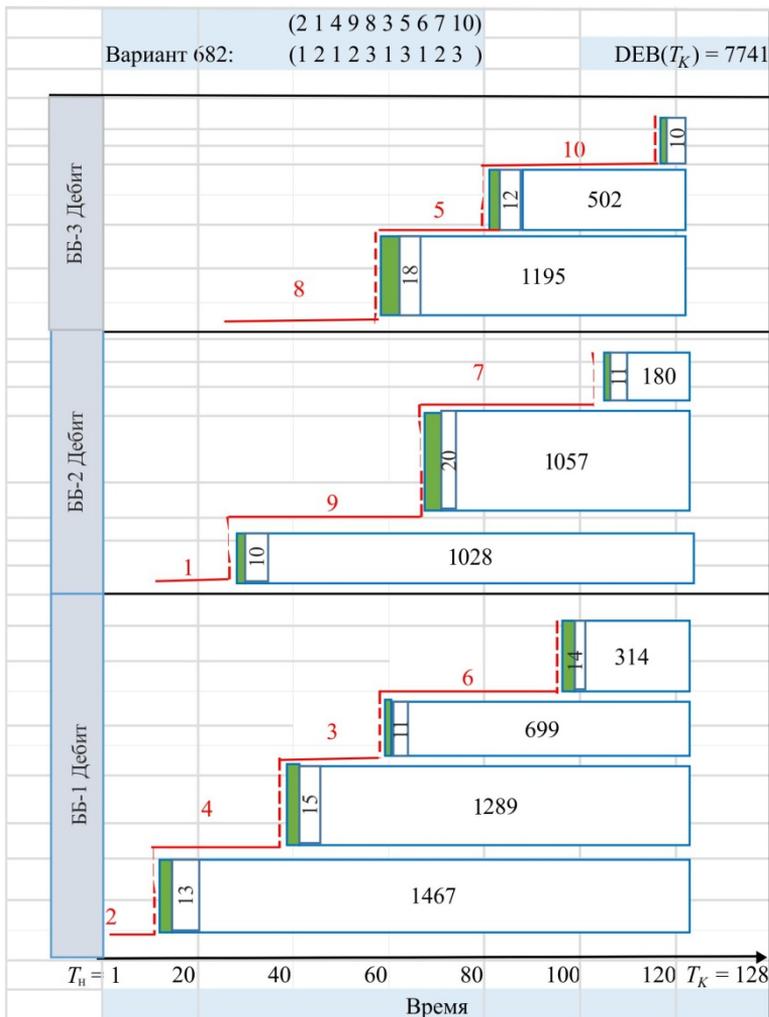


Рис. 4. График движения буровых бригад

Для других альтернативных вариантов неупорядоченных расписаний (А1, А2, А3) упорядоченные расписания и маршруты движения буровых станков имеют худшие показатели. Общее количество проанализированных вариантов (первый и второй этапы алгоритма) с учетом рекомендаций №№ 1, 2 составило $6038 = 5894 + 4 \cdot (4! + 3! + 3!)$ (вместо начальных 239,5 млн). Окончательно получен эффективный календарный план (вариант № 682 для альтернативы «Опт.»). Для визуального восприятия календарного плана рекомендуется использовать двумерный аналог диаграммы Ганта. На рис. 4 изображен вариант 682.

Заключение

Рассмотренная выше модель календарного планирования достаточно универсальна и может быть адаптирована для многих приложений, например массовое строительство территориально распределенных объектов, проведение плановых дорожных ремонтов с привлечением соответствующих 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. Для этого достаточно убрать сложность работ ($Q_i \equiv 0$), ввести «уровниловку» ($P_j \equiv \bar{P}$), не рассматривать перемещение технических средств и дополнительно учесть для каждой скважины оценку дебита до начала капитального ремонта и после его проведения. Понятно, что данная модель будет существенно проще исходной модели непрерывного календарного планирования.

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. Предложен трехэтапный последовательный алгоритм комбинаторного поиска эффективных решений, основанный на методах динамического программирования и агрегирования.

Список литературы

1. Калянов Г.Н., Титов Н.Н., Шибeko В.Н. Поиск эффективных решений задач непрерывного календарного планирования // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2018. – № 1. – С. 85–98.

2. Задачи распределения ресурсов в управлении проектами / С.А. Баркалов, И.В. Буркова, А.В. Глаголев, В.И. Колпачев; ИПУ РАН. – М., 2002. – 65 с.

3. Лазарев А.А., Гафаров Е.Р. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. – М.: Изд-во МГУ, 2011. – 222 с.

4. Титов Н.Н. Разработка системы поддержки непрерывного календарного планирования: Экономико-математическое обеспечение крупной буровой компании. – Саарбрюкен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 80 с.

5. Кнут Д.Э. Искусство программирования. Т. 4А. Комбинаторные алгоритмы. – М.: Вильямс, 2013. – Ч. 1. – 955 с.

6. Калянов Г.Н., Титов Н.Н., Шибeko В.Н. Информационная система поддержки принятия управляющих решений по данным станции контроля параметров бурения // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 4. – С. 61–64.

7. Баркалов С.А., Бурков В.Н., Гилязов И.М. Методы агрегирования в управлении проектами / ИПУ РАН. – М., 1999. – 55 с.

8. Аничкин А.С., Семенов В.А. Объектно-ориентированный каркас для программной реализации приложений теории расписаний // Труды ИСП РАН. – 2017. – Т. 29, вып. 3. – С. 247–296. DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(3)-14

9. Головкин Б.А. Расчет характеристик и планирование параллельных вычислительных процессов. – М.: Радио и связь, 1983. – 272 с.

10. Гончар Д.Р., Фуругян М.Г. Эффективные алгоритмы планирования вычислений в многопроцессорных системах реального времени // Управление большими системами. – 2014. – Вып. 49. – С. 269–296.

References

1. Kalyanov G.N., Titov N.N., Shibeko V.N. The search for effective solutions to the continuous task scheduling. *Information technology and computer systems*, 2018, no. 1, pp. 85-98.

2. Barkalov S.A., Burkova I.V., Glagolev A.V., Kolpachev V.I. Resource allocation problems in project management. Moscow, V.A. Trapeznikov Control Science Institute Russian Academy of Sciences, 2002, 65 p.

3. Lazarev A.A., Gafarov E.R. Scheduling Theory. Problems and algorithms. Moscow, Moscow State University, 2011, 222 p.

4. Titov N.N. Development of continuous scheduling support system: Economic and mathematical support for a large drilling company. Saarbruecken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017, 81 p.

5. Donald E. Knuth "The art of programming. Volume 4A / Combinatorial Algorithms, Part 1", by Pearson Education, Inc., 2011, ISBN 978-0-201-03804-0.

6. Kalyanov G.N., Titov N.N., Shibeko V.N. Information system of decision-making support according to drilling parameters control station. *Automation in industry*, 2014, no. 4, pp. 61-64.

7. Barkalov S.A., Burkov V.N., Gilyazov I.M. Methods of aggregation in project management, Moscow, V.A. Trapeznikov Control Science Institute Russian Academy of Sciences, 1999, 55 p.

8. Anichkin A.S., Semenov V.A. Object-oriented framework for the software implementation of the application of the scheduling theory. The proceedings of ISP RAS, 2017, vol. 29, iss. 3, pp. 247-296, DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(3)-14.

9. Golovkin B.A. Calculation of the characteristics and scheduling of parallel computing processes. Moscow, Radio i Svyaz, 1983, 272 pp.

10. Gonchar D.R., Furugan M.G. Efficient scheduling algorithms of calculations in multiprocessor real-time systems. *Large-Scale Systems Control*, 2014, vol. 49, pp. 269-296.

Получено 17.10.2019

Принято 07.11.2019

Сведения об авторах

Калянов Георгий Николаевич (Москва, Россия) – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории 49 «Автоматизация проектирования и управления многоцелевыми объектами», Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65, e-mail: kalyanov@mail.ru).

Титов Николай Николаевич (Москва, Россия) – кандидат технических наук, исполнительный директор, ООО «НВП МОДЕМ» (121108, Москва, Можайское шоссе, 29, e-mail: nikoltit@yandex.ru).

Шибeko Виктор Николаевич (Гомель, Республика Беларусь) – старший преподаватель кафедры «Информатика», Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого (246746, Гомель, пр. Октября, 48, e-mail: svn20070809@gmail.com).

About the authors

Georgiy N. Kalanov (Moscow, Russian Federation) – Dr. Habil. in Engineering, Professor, Chief Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences (117997, Moscow, Profsoyuznaya st., 65, e-mail: kalyanov@mail.ru).

Nikolay N. Titov (Moscow, Russian Federation) – Ph.D. in Engineering, Executive Director, LTD “NVP MODEM” (121108, Moscow, Mozhaiskoe av., 29, e-mail: nikoltit@yandex.ru).

Victor N. Shibeko (Gomel, Republic of Belarus) – Senior Lecturer, Department of Informatics, Sukhoi State Technical University of Gomel (246746, Gomel, Octyabrya av., 48, e-mail: svn20070809@gmail.com).

Библиографическое описание статьи согласно ГОСТ Р 7.0.100-2018:

Калянов, Г. Н. Непрерывное календарное планирование в условиях массового строительства скважин. Часть 2 / Г. Н. Калянов, Н. Н. Титов, В. Н. Шибeko. – DOI 10.15593/2499-9873/2020.1.05. – Текст : непосредственный // Прикладная математика и вопросы управления = Applied Mathematics and Control Sciences. – 2020. – № 1. – С. 74–87.

Цитирование статьи в изданиях РИНЦ:

Калянов Г.Н., Титов Н.Н., Шибeko В.Н. Непрерывное календарное планирование в условиях массового строительства скважин. Часть 2 // Прикладная математика и вопросы управления. – 2020. – № 1. – С. 74–87. DOI: 10.15593/2499-9873/2020.1.05

Цитирование статьи в references и международных изданиях:

Cite this article as:

Kalyanov G.N., Titov N.N., Shibeko V.N. Continuous scheduling in conditions of mass well construction. Part 2. *Applied Mathematics and Control Sciences*, 2020, no. 1, pp. 74–87. DOI: 10.15593/2499-9873/2020.1.05 (in Russian)