УДК 681.3
Э.И. Ватутин, канд. техн. наук, доцент, кафедра вычислительной техники, ЮЗГУ (e-mail: evatutin@rambler.ru)
Д.О. Бобынцев, аспирант кафедры вычислительной техники, ЮЗГУ (e-mail: daniel8728@yandex.ru)
А.С. Романченко, канд. техн. наук, доцент, начальник учебно-методического управления, ЮЗГУ (e-mail: romanchas@rambler.ru)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТИЧНОГО УПОРЯДОЧИВАНИЯ ПАР И ЛОКАЛЬНОГО УЛУЧШЕНИЯ ОКРЕСТНОСТИ ПАРЫ НА КАЧЕСТВО РАСПИСАНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЖАДНОГО ПОДХОДА

Приведено описание метода построения расписаний с использованием жадной стратегии выбора пар и его модификации, отличающаяся группировкой пар в окрестности с возможностью локального улучшения решения в рамках окрестности. Показано, что рассмотрение пар с использованием γ-окрестностей учебных групп позволяет получать решения более высокого качества по сравнению с жадным формированием решений с различным порядком следования пар. Приведены результаты вычислительного эксперимента, в ходе которого установлено дополнительное повышение качества решений при использовании локального жадного улучшения расписания с рамках γ- и τ-окрестностей текущей пары. Рассмотренный подход к нахождению квазиоптимального решения хорошо поддается распараллеливанию и может быть эффективно реализован с использованием грид-систем.

Ключевые слова: дискретная комбинаторная оптимизация, расписания, грид-системы

***

Одной из задач дискретной комбинаторной оптимизации является задача составления различных расписаний (планирование запуска работ или задач, движение транспорта, графики работ). Задача составления расписаний занятий учебных заведений (школы, университета и т.д.), как известно, является одной из наиболее сложных в своем классе, т.к. требуется вести учет большого числа ограничений, зачастую взаимоисключающих друг друга, и оптимизация ряда частных показателей качества [1]. Для составления расписаний известно достаточно большое количество подходов, основанных как на общих положения комбинаторной оптимизации (различные виды перебора, жадные алгоритмы, генетические алгоритмы, имитация отжига, муравьиные алгоритмы и т.д.), так и учитывающих специфику задачи в ее конкретной постановке. В работе [2] было показано, что изменение порядка рассмотрения пар при жадном подходе оказывает сильное влияние на качество получаемых решений, однако сами решения получаются довольно далекими от оптимума по ряду важных частных показателей качества (например, по числу «окон» в частных расписаниях подгрупп и преподавателей или по числу переходов между корпусами). В данной работе приведено описание результатов, полученных в ходе жадного синтеза решений с использованием ограничения на порядок рассмотрения пар и анализа смежной окрестности устанавливаемой пары с целью локального улучшения расписания в рамках данной окрестности.

Следуя работе [2], постановка задачи может быть представлена в следующем виде. Имеется множество пар $\Theta = \{p_i\}, i = \overline{1, N_\Theta}$, каждая из которых представляет собой кортеж $p_i = \left\langle T(p_i), G(p_i), n(p_i), a(p_i), v(p_i) \right\rangle$, где $T(p_i) \subset T$ – множество преподавателей, проводящих занятие (обычно $\left|T(p_i)\right| = 1$, однако некоторые занятия требуют одновременного присутствия нескольких преподавателей или ассистентов); $T = \{t_i\}, i = \overline{1, N_T}$ – множество всех преподавателей вуза; $G(p_i) \subset G$ – множество учебных групп, объединенных в поток и присутствующих на проводимом занятии; $G = \{g_i\}, i = \overline{1, N_G}$ – множество учебных групп университета; $n(p_i)$ – длительность учебного занятия в академических часах (1 – для занятий, читающихся один раз в две недели; 2 – для занятий, читающихся на регулярной основе каждую неделю); $a(p_i) \in A$ – аудитория, в которой запланировано проведение учебного занятия; $A = \{a_i\}, i = \overline{1, N_A}$ – множество учебных аудиторий (аудиторный фонд); $v(p_i) = \left\langle v^{(d)}(p_i), v^{(t)}(p_i) \right\rangle \in V$ – время проведения занятия (выбирается в виде дискретных значений дня недели $v^{(d)}(p_i) \in \{1, 2, ..., N_D\}$, $N_D = 7$ – число рабочих дней, и номера пары $v^{(t)}(p_i) \in \{1, 2, ..., N_P\}$, $N_P = 8$ – теоретически максимальное число пар в день, с учетом номера недели в двухнедельном цикле); $V = \{v_i\}, i = \overline{1, N_V}$ – множество временн*ы*х позиций, в которые может быть установлена пара (7 рабочих дней по 8 пар с учетом двухнедельного цикла). Учебные аудитории могут находиться в различных учебных корпусах $l_i \in L, i = \overline{1, N_L}$, где $l(a_i) \in L$ – корпус, в котором находится аудитория a_i. При построении расписания необходим учет ряда ограничений. Прежде всего необходим учет «накладок», т.е. пересечений различных пар по преподавателю (преподаватель не может читать две пары одновременно), группе (группа не может одновременно находиться на различных занятиях) или аудитории (в одной аудитории не может проводиться более одной пары одновременно) в одно время:

$$\begin{gathered} \nexists p_i, p_j, i, j = \overline{1, N_P},\ i \neq j: \\ \left[\left(T(p_i) \cap T(p_j) \neq \varnothing \right) \vee \left(G(p_i) \cap G(p_j) \neq \varnothing \right) \vee \left(a(p_i) = a(p_j) \right) \right] \wedge \\ \wedge \left(v(p_i) \cap v(p_j) \neq \varnothing \right); \end{gathered} \tag{1}$$

ограничения на максимальное и минимальное число пар в день для преподавателя и учебной группы:

$$\forall v_i^{(d)}, t_j, i = \overline{1, N_D}, j = \overline{1, N_T} : p_{\min}^{(t)} \leq \left| P\left(v_i^{(d)}, t_j\right) \right| \leq p_{\max}^{(t)}, \tag{2}$$

$$\forall v_i^{(d)}, g_j, i = \overline{1, N_D}, j = \overline{1, N_G} : p_{\min}^{(s)} \leq \left| P\left(v_i^{(d)}, g_j\right) \right| \leq p_{\max}^{(s)}, \tag{3}$$

где $P\left(v_i^{(d)}, t_j\right) = \left\{p_{j_1}, p_{j_2}, ..., p_{j_n}\right\} \subset P$ – множество пар, установленных в день $v_i^{(d)}$ для преподавателя t_j, причем $p_{j_k} \in P\left(v_i^{(d)}, t_j\right) \Leftrightarrow \left(v^{(d)}\left(p_{j_k}\right) = v_i^{(d)}\right) \wedge \left(t_j \in T\left(p_{j_k}\right)\right)$;

$P\left(v_i^{(d)}, g_j\right) = \left\{p_{j_1}, p_{j_2}, ..., p_{j_m}\right\} \subset P$ – множество пар, установленных в день $v_i^{(d)}$ для группы g_j, причем $p_{j_k} \in P\left(v_i^{(d)}, g_j\right) \Leftrightarrow \left(v^{(d)}\left(p_{j_k}\right) = v_i^{(d)}\right) \wedge \left(g_j \in G\left(p_{j_k}\right)\right)$;

ограничение на максимальное число пар в день с учетом «окон» для преподавателей:

$$\max_k v^{(t)}\left(p_{j_k}\right) - \min_k v^{(t)}\left(p_{j_k}\right) + 1 \leq p_{\max}^{(t)},\ p_{j_k} \in P\left(v_i^{(d)}, t_j\right) \tag{4}$$

и студентов

$$\max_k v^{(t)}\left(p_{j_k}\right) - \min_k v^{(t)}\left(p_{j_k}\right) + 1 - \left|P\left(v_i^{(d)}, g_j\right)\right| = 0,\ p_{j_k} \in P\left(v_i^{(d)}, g_j\right). \tag{5}$$

На рабочее время преподавателя и на время обучения группы также возможны ограничения, фактически реализуемые путем исключения из множества V некоторых значений. Кроме того, на практике возможно добавление ряда дополнительных ограничений.

Ограничения (1) и (5) являются наиболее жесткими, в то время как ограничения (2–4) могут быть нарушены в крайнем случае, например, при взаимной противоречивости ограничений и невозможности построения расписания без их ослабления.

Оценка качества результирующего расписания производится с использованием штрафной функции, фактически представляющей собой сумму взвешенных нормированных значений частных показателей качества, к которым по сравнению с [2, 3] добавлены слагаемые, отвечающие за дополнительные пожелания (требования ставить пару первой или последней) и штраф за наличие не установленных в расписание пар:

$$
\begin{gathered}
f(\Theta)=\underbrace{\frac{K_{w}^{(t)} t_{w}(\Theta)}{2 D w_{\max}^{(t)} T}}_{1}+\frac{K_{w}^{(s)} s_{w}(\Theta)}{2 D w_{\max}^{(s)} S}+\frac{K_{wt}^{(t)} t_{wt}(\Theta)}{2 D p_{\max}^{(t)} T}+\frac{K_{wt}^{(s)} s_{wt}(\Theta)}{2 D p_{\max}^{(s)} S}+ \\
+\frac{K_{wt}^{(a)} a_{wt}(\Theta)}{2 D P A}+\frac{K_{a}^{(w)} w_{a}(\Theta)}{|\Theta|}+\frac{K_{gr}^{(w)} w_{gr}(\Theta)}{|\Theta|}+\frac{K_{gr}^{(t)} t_{gr}(\Theta)}{2 D T}+ \\
+\frac{K_{p_{\min}}^{(t)} t_{p_{\min}}(\Theta)}{2 D T}+\frac{K_{p_{\max}}^{(t)} t_{p_{\max}}(\Theta)}{2 D T}+\frac{K_{l_{\max}}^{(t)} t_{l_{\max}}(\Theta)}{2 D T}+ \\
+\frac{K_{p_{\min}}^{(s)} s_{p_{\min}}(\Theta)}{2 D S}+\frac{K_{p_{\max}}^{(s)} s_{p_{\max}}(\Theta)}{2 D S}+\frac{K_{l_{\max}}^{(s)} s_{l_{\max}}(\Theta)}{2 D S}+ \\
+\frac{K_{ed}^{(s)} s_{ed}(\Theta)}{2 D S}+\frac{K_{m}^{(t)} t_{m}(\Theta)}{2 D T \cdot \underbrace{\left(\max m_{ij}+1\right)}_{4}}+\frac{K_{m}^{(s)} s_{m}(\Theta)}{2 D S \cdot\left(\max m_{ij}+1\right)}+ \\
+\frac{K_{lw}^{(t)} t_{lw}(\Theta)}{2 D T \cdot\left(\max m_{ij}+1\right)}+\frac{K_{fl}^{(p)} p_{fl}(\Theta)}{|\Theta|}+\frac{K_{wa}^{(p)} p_{wa}(\Theta)}{|\Theta|}+\frac{K^{\left(\Theta^{*}\right)}\left|\Theta^{*}\right|}{|\Theta|},
\end{gathered}
\qquad (6)
$$

где $K_i^{(j)}$ – соответствующий весовой коэффициент (индекс t – обозначение преподавателя, s – группы, a – аудитории, w – элемента учебной нагрузки, wt – таблицы рабочего времени, gr – пожелания по группировке учебной нагрузки, ed – числа свободных дней, m – числа перемещений между корпусами, $l_{\max}$ – максимального числа лекций в день, $p_{\min}$ и $p_{\max}$ – минимального и максимального числа пар в день, lw – число нарушений пожеланий по корпусу, fl – число нарушений пожелания по установке пары первой или последней во время рабочего дня); $t_x(\Theta)$, $s_x(\Theta)$, $a_x(\Theta)$, $w_x(\Theta)$, $p_x(\Theta)$ – выбранный частный показатель качества для преподавателя, учебной группы, аудитории, элемента нагрузки или пары соответственно; m_{ij} – элемент матрицы удаленности корпусов, равный условной «дистанции» между корпусами, $\Theta^* \subset \Theta$ – множество не установленных в расписание пар. Лучшему расписанию соответствует меньшее значение штрафной функции, коэффициенты которой выбираются экспертным путем. Оценка качества расписания является довольно трудоемкой операцией [1], требующей реализации подсистемы кэширования частных показателей качества с целью избежания их повторного пересчета.

Жадная стратегия составления расписания [2, 4] заключается в выборе очередной пары $p_i \in \Theta^*$ из множества еще не рассмотренных пар Θ^*, определения множество допустимых позиций $V^+(p_i)=\{v_1(p_i), v_2(p_i), ..., v_K(p_i)\}$, в которых она может быть размещена, расчета для каждой из позиций $v_j(p_i) \in V^+(p_i)$ приращения штрафной функции

$$\Delta f\left(v_j(p_i)\right) = f\left(\left(v(p_i) \to v_j\right) \in \Theta\right) - f(\Theta) \tag{7}$$

и выбора позиции $v_{j^+}(p_i)$ с минимальным приращением, где $j^+ = \arg\min_j \Delta f\left(v_j(p_i)\right)$. Для каждой позиции производится поиск лучшей аудитории, пара размещается в выбранной позиции $v_{j^+}(p_i)$ и исключается из множества нерассмотренных пар $\Theta^* := \Theta^* \setminus \{p_i\}$, что повторяется до тех пор, пока не будут рассмотрены все пары $\left(\Theta^* = \varnothing\right)$ – расписание составлено полностью, либо пока в множестве нерассмотренных пар останутся пары, которые невозможно установить из-за нарушения ограничений.

В работе [2] было показано, что в поставленной задаче имеет место сильная зависимость качества получаемых решений от порядка рассмотрения пар в рамках жадной стратегии. Вызывает интерес исследование того, насколько влияет на качество составления расписания наложение ограничения в виде рассмотрения пар по учебным группам или преподавателям. Рассмотрим данную стратегию на примере ограничения на рассмотрение пар по группам. При данном подходе из множества учебных групп G случайным образом выбирается группа $g_i \in G$, для которой формируется подмножество пар с ее участием (γ-окрестность учебной группы): $\Theta^{(\gamma)}(g_i) \subset \Theta$, $\forall p_j \in \Theta^{(\gamma)}(g_i) : g_i \in G(p_j)$. (В случае рассмотрения пар с ограничением на преподавателей аналогичным образом формируется τ-окрестность преподавателя $\Theta^{(\tau)}(t_i) \subset \Theta$, $\forall p_j \in \Theta^{(\tau)}(t_i) : t_i \in T(p_j)$.) Из множества пар γ-окрестности исключаются уже установленные в расписание пары $\left(\Theta^{(\gamma)}(g_i) := \Theta^{(\gamma)}(g_i) \cap \Theta^*\right)$, оставшиеся пары устанавливаются в расписание жадно, минимизируя приращение штрафной функции (7). Подобный порядок рассмотрения пар фактически представляет собой ограничение на мощность множества перестановок пар, используемых для задания порядка их рассмотрения.

В таблице 1 приведены результаты вычислительного эксперимента (весенний семестр 2012 учебного года ЮЗГУ), целью которого было исследование тенденций изменения частных показателей качества в зависимости от рассмотрения пар в случайном порядке [2], с ограничением на порядок рассмотрения учебных групп и преподавателей. Введение ограничений на γ- или τ-окрестности учебной группы или преподавателя соответственно не оказывает существенного влияния на время построения расписания, которое составляет несколько десятков минут для одного решения. Учитывая специфику задачи, отдельные варианты расписания могут быть построены независимо друг от друга с использованием широкого класса параллельных вычислительных средств, наиболее подходящим из которых, учитывая слабую связность задачи, является грид.

Таблица 1. Результаты вычислительного эксперимента

№	t_w	s_w	t_m	s_m	$t_{p_{\min}}$	$t_{p_{\max}}$	$g_{p_{\min}}$	$g_{p_{\max}}$	w_a	$\lvert\Theta^*\rvert$	p_{wa}	f
Случайный порядок, 5 лучших решений из 30												
1	646	16	7765	4600	1499	101	473	0	729	0	234	1,023
2	579	15	9345	4940	1503	106	427	6	725	3	265	1,071
3	653	30	8635	4880	1466	123	527	0	742	0	249	1,111
4	577	23	9105	5185	1542	90	557	8	707	1	234	1,150
5	625	25	8695	5600	1560	97	488	8	739	0	262	1,156
Ограничение на порядок рассмотрения учебных групп, 5 лучших решений из 15												
6	457	2	5950	4290	1200	129	296	3	729	10	302	0,854
7	438	9	5859	4165	1207	130	324	6	728	0	247	0,912
8	422	2	6390	3180	1263	120	316	13	723	12	277	0,945
9	465	6	4610	5065	1216	101	335	10	738	7	282	0,945
10	431	9	6220	4880	1223	106	293	11	727	7	258	0,951
Ограничение на порядок рассмотрения преподавателей, 5 лучших решений из 15												
11	285	39	5425	2805	1031	97	478	4	713	0	259	1,060
12	335	38	4840	5180	1019	107	452	11	732	0	208	1,115
13	312	54	5710	4495	1003	106	490	11	727	0	264	1,219
14	301	31	5215	4215	990	100	520	26	726	0	253	1,245
15	316	46	5830	2875	1036	99	509	18	736	0	283	1,247

Анализ приведенных в таблице данных позволяет сделать вывод о том, что использование ограничения на γ-окрестность позволяет получать решения с близким к нулю количеством «окон» в частных расписаниях учебных групп и меньшим числом «окон» в частных расписаниях преподавателей (420–470 против 570–650 при жадном подходе), при этом также несколько уменьшается суммарное число перемещений между корпусами (4600–6400 против 7700–9400 для преподавателей и 3100–5100 против 4600–5600 для учебных групп) и число нарушений ограничения на минимальное число пар (1200–1300 против 1400–1600 для преподавателей и 290–340 против 420–560) при сопоставимых значениях остальных частных показателей качества. Использование ограничения на τ-окрестность позволяет снизить число «окон» у преподавателей ценой увеличения числа «окон» в частных расписания учебных групп при сопоставимых значениях остальных частных показателей качества, что является неприемлимым. Возможны и другие типы окрестностей, частично изменяющие порядок рассмотрения пар при жадном подходе к составлению расписания, однако, как показали вычислительные эксперименты, приведенные две позволяют получать наилучшие решения.

Дополнительного улучшения качества получаемых решений можно добиться при попытке локального улучшения качества расписания путем перестановки пар, которые имеют непосредственное отношение к текущей рассматриваемой паре p_i. С целью формализации описания данного подхода введем бинарные отношения близости пар по преподавателю (τ) и учебной группе (γ). Будем считать, что пары p_i и p_j, $i \neq j$ находятся в отношении близости по преподавателю $p_i \ \tau \ p_j$, если в множествах преподавателей, закрепленных за выбранными парами, присутствуют одни и те же преподаватели: $T(p_i) \cap T(p_j) \neq \varnothing$. Аналогично можно ввести отношение близости по учебной группе: $p_i \ \gamma \ p_j \Leftrightarrow G(p_i) \cap G(p_j) \neq \varnothing$.

С использованием введенных бинарных отношений можно сформулировать определения окрестностей пары. Под τ-окрестностью пары $\Theta^{(\tau)}(p_i)$ понимается множество пар, которые находятся с парой p_i в отношении близости по преподавателю: $\forall p_j \in \Theta^{(\tau)}(p_i): p_i \ \tau \ p_j$. Аналогичным образом можно ввести понятие γ-окрестности пары: $\forall p_j \in \Theta^{(\gamma)}(p_i): p_i \ \gamma \ p_j$. Несложно показать, что

$$\Theta^{(\gamma)}(p_i) = \left(\bigcup_{\forall g_j \in G(p_i)} \Theta^{(\gamma)}(g_j) \right) \setminus \{p_i\},$$

$$\Theta^{(\tau)}(p_i) = \left(\bigcup_{\forall t_j \in T(p_i)} \Theta^{(\tau)}(t_j) \right) \setminus \{p_i\}$$

и

$$\Theta^{(\gamma)}(g_i) = \bigcup_{\forall p_j : g_i \in G(p_j)} \{p_j\} = \bigcup_{\forall p_j : g_i \in G(p_j)} \Theta^{(\gamma)}(p_j),$$

$$\Theta^{(\tau)}(t_i) = \bigcup_{\forall p_j : t_i \in T(p_j)} \{p_j\} = \bigcup_{\forall p_j : t_i \in T(p_j)} \Theta^{(\tau)}(p_j).$$

Рассмотрим введенную систему отношений и окрестностей на примере. Допустим, множество учебных групп состоит из двух групп ВМ-01 (большая численность, на лабораторных работах разбивается на подгруппы, обозначенные римскими цифрами) и ВМ-02 (малая численность, на лабораторных работах не разбивается на подгруппы). У указанных групп читается программирование, подразумевающее наличие лекционных занятий (сокр лк, читаются в потоке), а также лабораторных (сокр. лб) и практических занятий (сокр. пр, не разбиваются на подгруппы в независимости от числа студентов в группе). Тогда бинарное отношение близости по учебной группе может быть представлено в следующем виде (таблица 2).

Таблица 2. Иллюстрация к понятию отношения близости и построения γ-окрестностей (знаком «+» отмечено соответствие групп парам)

Пара \ Группа	ВМ-01 I (g_1)	ВМ-01 II (g_2)	ВМ-02 (g_3)
Программирование (лб) (p_1)	+		
Программирование (лб) (p_2)		+	
Программирование (лб) (p_3)			+
Программирование (пр) (p_4)	+	+	
Программирование (пр) (p_5)			+
Программирование (лк) (p_6)	+	+	+

Для приведенного примера $\Theta^{(\gamma)}(g_1)=\{p_1, p_4, p_6\}$, $\Theta^{(\gamma)}(g_2)=\{p_2, p_4, p_6\}$, $\Theta^{(\gamma)}(g_3)=\{p_3, p_5, p_6\}$; $\Theta^{(\gamma)}(p_1)=\{p_4, p_6\}$, $\Theta^{(\gamma)}(p_2)=\{p_4, p_6\}$, …, $\Theta^{(\gamma)}(p_6)=\{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\}$. Нетрудно убедиться в том, что $\Theta^{(\gamma)}(p_1)=\Theta^{(\gamma)}(g_1)\setminus\{p_1\}=\{p_1, p_4, p_6\}\setminus\{p_1\}=\{p_4, p_6\}$, $\Theta^{(\gamma)}(p_6)=\left(\Theta^{(\gamma)}(g_1)\cup\Theta^{(\gamma)}(g_2)\cup\Theta^{(\gamma)}(g_3)\right)\setminus\{p_6\}=\{p_1, ..., p_6\}\setminus\{p_6\}=\{p_1, ..., p_5\}$, а $\Theta^{(\gamma)}(g_1)=\Theta^{(\gamma)}(p_1)\cup\Theta^{(\gamma)}(p_4)\cup\Theta^{(\gamma)}(p_6)=\{p_4, p_6\}\cup\{p_1, p_6\}\cup\{p_1, p_6\}=\{p_1, p_4, p_6\}$.

С учетом введенных бинарных отношений жадное построение расписания с улучшением окрестностей можно производить следующим образом: выбрать очередную пару p_i и установить ее в расписание в соответствии с жадным подходом (выбор пар может производиться как в случайном порядке, так и с использованием ограничения на γ- или τ-окрестность учебной группы и преподавателя соответственно). Сформировать для нее γ- и τ-окрестности ($\Theta^{(\gamma)}(p_i)\setminus\Theta^*$ и $\Theta^{(\tau)}(p_i)\setminus\Theta^*$) из уже установленных в расписание пар. Для всех пар p_j, входящих в состав сформированных окрестностей $\left(p_j\in\Theta^{(\gamma)}(p_i)\setminus\Theta^*\right)\vee\left(p_j\in\Theta^{(\tau)}(p_i)\setminus\Theta^*\right)$, попытаться переставить пару на другое место так, чтобы приращение штрафной функции при этом было отрицательным (другими словами, происходило максимально возможное уменьшение значения функции штрафа):

$$\Delta f\left(v_j(p_i), v(p_i)\right)=f\left(\left(v(p_i)\to v_j\right)\in\Theta\right)-f\left(v(p_i)\in\Theta\right)\to\min,$$

$$\Delta f\left(v_j(p_i), v(p_i)\right)<0.$$

Если имеет место уменьшение значения штрафной функции в ходе перестановки пары, можно говорить о локальном повышении качества расписания для текущего множества установленных пар. При этом вычислительные затраты на построение одного решения существенно возрастают по отношению к жадному построению расписания, т.к. в дополнение к размещению самой пары итеративно производится улучшение расположения уже установленных пар, входящих в состав γ- и τ-окрестностей текущей пары. Так на компьютере с процессором Intel Core i7 4770 3,5 ГГц время построения одного решения занимает 6–8 часов. Аналогичный подход, связанный с учетом отношения смежности, может быть использован при решении других задач комбинаторной оптимизации [5, 6].

С целью анализа результирующего качества получаемых решений был поставлен вычислительный эксперимент, в ходе которого были получены 40 расписаний отталкиваясь от различного порядка рассмотрения групп. Для его реализации потребовалось около 300 часов машинного времени, результаты эксперимента приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты вычислительного эксперимента, направленного на жадное построение расписание с ограничением на порядок рассмотрения групп и улучшением γ- и τ-окрестностей текущей пары

№	t_w	s_w	t_m	s_m	$t_{p_{\min}}$	$t_{p_{\max}}$	$g_{p_{\min}}$	$g_{p_{\max}}$	w_a	$\lvert\Theta^*\rvert$	p_{wa}	f
Ограничение на порядок рассмотрения учебных групп, 5 лучших решений из 40, с улучшением окрестностей текущей пары												
1	352	7	395	165	1144	0	152	0	846	4	676	7,033
2	351	5	345	170	1167	0	168	0	865	0	645	7,131
3	332	1	525	215	1240	0	162	0	928	4	636	7,145
4	358	0	305	320	1160	0	182	0	841	1	702	7,256
5	382	1	365	345	1167	0	167	0	893	6	614	7,697

Примечание. В ходе эксперимента был установлен запрет на установку пар свыше разрешенного количества, поэтому $t_{p_{\max}} = t_{g_{\max}} = 0$ для всех решений. При расчете интегрального показателя качества f был взят модифицированный набор весовых коэффициентов, увеличивающих штраф при оптимизации показателей $g_{p_{\min}}$ и s_w, поэтому прямое сравнение значения интегрального показателя с предыдущими экспериментами некорректно.

Анализ полученных результатов позволяет сделать ряд выводов. Прежде всего, изменение порядка рассмотрения учебных групп по-прежнему целесообразно и оказывает существенное влияние на качество решений. Улучшение окрестностей последней установленной в расписание пары дает ощутимый прирост в степени минимизации частных показателей качества решений, заключающийся в уменьшении числа «окон» в частных расписаниях преподавателей до 330–380, в расписаниях учебных групп – почти до нуля, почти на порядок уменьшается число перемещений между корпусами как для преподавателей, так и для учебных групп, снижается число нарушений минимально числа пар у учебных групп (до 150–180). Негативным эффектом, требующим дополнительного анализа, является увеличение числа пар, установленных с нарушением пожеланий и без аудиторий. С ростом числа проанализированных решений следует ожидать дальнейшего повышения качества, однако для этого потребуются существенно б*о*льшие вычислительные затраты.

Список литературы

1. http://en.wikipedia.org/wiki/Block_scheduling
2. Ватутин Э.И., Романченко А.С., Титов В.С. Исследование влияния порядка рассмотрения пар на качество расписаний при использовании жадного подхода // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 1 (46). С. 58–64.
3. Ватутин Э.И., Ватутин В.И., Романченко А.С. Оценка качества расписания вуза с использованием весовой функции // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации (Распознавание – 2012). Курск: изд-во КурскГТУ, 2012. С. 136–138.
4. Ватутин Э.И., Бобынцев Д.О., Романченко А.С. Программа для жадного построения расписаний учебных занятий вуза // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013618554 от 11.09.13.
5. Ватутин Э.И. Проектирование логических мультиконтроллеров. Синтез разбиений параллельных граф-схем алгоритмов. Saarbrucken: Lambert Academic Publishing, 2011 г. 292 с. ISBN 978-3-8433-1728-3.
6. Ватутин Э.И., Леонов М.Е. Использование смежной окрестности при жадном последовательном формировании блоков разбиения граф-схем параллельных алгоритмов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 6. С. 30–35.