

Оглавление

Введение	6
1 Элементы комбинаторики	11
1.1 Подсчёт и комбинаторные тождества	11
1.2 Формула включений и исключений	13
1.3 Принцип Дирихле	15
1.4 Комбинаторика булева куба	18
1.5 Подсчёт двумя способами	20
1.6 Комбинаторные покрытия. А.Я. Канель	22
1.7 Подсказки	24
1.8 Указания	25
2 Основы теории графов	43
2.1 Основные определения	43
2.2 Перечисление деревьев	46
2.3 Графы с точностью до изоморфизма	49
2.4 Плоские графы	51
2.5 Эйлеровы пути и циклы	55
2.6 Гамильтоновы пути и циклы	59
2.7 Экстремальные задачи (теорема Турана)	61
2.8 Теорема Менгера	63
2.9 Простое доказательство теоремы Куратовского	64
2.10 Метод минимального контрпримера. А. Канель	70
2.11 Степенные последовательности. В.А. Волков, М.Н. Вялый и А.Б. Скопенков	72
2.12 Гамильтоновость: задачи для исследования. А.Ю. Веснин, Д.А. Пермяков, А.Б. Скопенков	75
2.13 Подсказки	77

	2.14	Указания	81
3		Раскраски графов и многочлены	100
	3.1	Раскраски графов	100
	3.2	Хроматические число и индекс	102
	3.3	Хроматический многочлен и многочлен Татта	104
	3.4	Подсказки	106
	3.5	Указания	107
4		Основы теории Рамсея	110
	4.1	Двухцветные числа Рамсея	110
	4.2	Многоцветные числа Рамсея	111
	4.3	Числа Рамсея для гиперграфов	113
	4.4	Результаты рамсеевского типа	114
	4.5	Числа Рамсея для подграфов	116
	4.6	Подсказки	117
	4.7	Указания	120
5		Системы множеств (гиперграфы)	132
	5.1	Пересечения подмножеств	132
	5.2	Системы общих представителей	133
	5.3	Системы различных представителей	135
	5.4	Перманент	138
	5.5	Размерность Вапника-Червоненкиса	139
	5.6	Подсолнухи	140
	5.7	Лемма Виссера и теоремы о возвращении	143
	5.8	Структуры на конечном множестве	145
	5.9	Подсказки	148
	5.10	Указания	150
6		Аналитические и вероятностные методы	161
	6.1	Асимптотики	161
	6.2	Независимость и доказательства существования	165
	6.3	Случайные графы	183
	6.4	Подсказки	189
	6.5	Указания	191
7		Алгебраические методы	205
	7.1	Линейно-алгебраический метод в комбинаторике	205
	7.2	Матрицы Адамара	209
	7.3	Подсказки	211

7.4	Указания	212
8	Теоремы об инцидентностях в геометрии	217
8.1	Задачи	217
8.2	Подсказки	219
8.3	Указания	219
9	Аддитивная комбинаторика (А.А. Глибичук)	222
9.1	Задачи	222
9.2	Подсказки	225
9.3	Указания	226
	Предметный указатель	227
	Литература	231
10	Программа курса ДА 2014-17 уч. годов	238

Введение

Зачем эта книга?

Мы приводим подборки задач по комбинаторным разделам математики. Эти задачи подобраны так, что в процессе их решения читатель (точнее, решатель) освоит основы важных теорий — как классических, так и современных. Ср. [S4], [ZSS], [J]. Книга будет полезна руководителям и участникам кружков для старшеклассников и младшекурсников (в частности, ориентированных на олимпиады). Некоторые приводимые красивые задачи и важные темы малоизвестны в традиции кружков по математике, но полезны как для математического образования, так и для подготовки к олимпиадам.

Решение этих задач (т. е. изучение соответствующих теорий) будет полезно также всем, кто хочет стать математиком, специалистом по computer science или программистом, работающим в наукоёмких отраслях информационных технологий. Именно таких специалистов мы готовим на факультете инноваций и высоких технологий Московского Физико-Технического Института. Приведенные задачи используются при изучении курсов дискретных структур и дискретного анализа на этом факультете. Эти курсы читают А.Б. Дайняк и А.М. Райгородский, а остальные авторы ведут семинары по этим курсам. Некоторые материалы основаны на занятиях, проведенных А.Б. Скопенковым в Кировской летней математической школе (до 2016), Московской выездной олимпиадной школе (с 2004), а также на кружках «Математический семинар» (1994-2013) и «Олимпиады и математика» (с 2003, в школе «Интеллектуал» с 2015).

Комбинаторика — один из самых красивых разделов современной математики. Постановки задач этого раздела зачастую доступны школьникам. А результаты, тем не менее, носят фундаментальный характер и важны как для развития других разделов математики, так и для приложений в информатике, биологии, экономике и др. Мы постараемся рассказать о тех мощных современных методах, благодаря которым кристаллизуется серьезная научная дисциплина — комбинаторика. Среди этих методов, помимо более или менее стандартных, вероятностный и линейно-алгебраический ме-

тоды. Они лежат в основе самых продвинутых комбинаторных результатов, полученных за последние десятилетия.

Параграфы второй половины книги дают экскурс в активно развивающиеся области математики. Хотя здесь изучаются только самые простые результаты и методы, они дают некоторое представление об основных направлениях научных исследований в соответствующих областях. Этому посвящены *замечания*, которые не используются ни в формулировках, ни в решениях задач. Важные факты выделены словом «теорема» или «следствие».

Используемый материал.

Формулировки большинства задач доступны старшеклассникам, интересующимся математикой; ¹ мы приводим все определения, не так часто изучаемые на кружках. Без определения используются только простейшие определения и результаты теории чисел [О, §§8-§9], [Vi, §§1-3], [ZSS, §§2.1-2.6, 3.1 и 3.3]. Если в некотором разделе для понимания условий или для решения задач нужны дополнительные сведения (или консультация специалиста), то в начале соответствующего раздела приводятся ссылки.

При этом многие задачи трудны: для их решения нужно предварительно прорешать другие приведенные задачи на данную тему.

Как устроена книга.

Эту книгу не обязательно читать (точнее, прорешивать) подряд. Параграфы и разделы книги практически независимы друг от друга (кроме разделов в §3 и §4, которые желательно прорешивать подряд). Если в задаче одного из разделов все-таки используется материал другого раздела, то либо эту задачу можно игнорировать, либо посмотреть конкретно указанный материал другого раздела. Основные обозначения приведены в конце введения. Основные понятия и обозначения теории графов введены в §2.1.

При этом параграфы расположены примерно в порядке возрастания сложности материала.

¹Часть материала (например, §1.1) на некоторых кружках и летних школах изучается даже 6-классниками. Однако приводимые подсказки, указания и решения рассчитаны на читателей с некоторой математической культурой (необходимой для освоения большей части книги). Разбирать эти решения с 6-классниками нужно по-другому, см., например, [GIF].

К важнейшим задачам приводятся подсказки, указания и решения. Подсказки и указания расположены в конце каждого параграфа. Однако к ним стоит обращаться после прорешивания каждой задачи.

Общие замечания к формулировкам задач.

Задачи обозначаются жирными цифрами. Если в условии задачи написано «найдите», то нужно дать ответ без знака суммы и многоточия. Если же условие задачи является формулировкой утверждения, то в задаче требуется это утверждение доказать. Как правило, мы приводим *формулировку* утверждения перед его *доказательством*.² В таких случаях для доказательства утверждения могут потребоваться следующие задачи. Это всегда явно оговаривается в подсказках, а иногда и прямо в тексте. (На занятии задача-подсказка выдается только тогда, когда школьник или студент немного подумал над самой задачей.)

Большинство задач не оригинальны, но установить первоисточник не представляется возможным. Многие задачи взяты из [IKRS], [ZSS], [L] и из неопубликованных материалов кафедры дискретной математики ФИВТ МФТИ.

О литературе.

В список литературы не вошли многие хорошие *стандартные учебники* по комбинаторике и теории графов (ввиду необъятности их количества). Мы цитировали те из них, которые по тем или иным причинам чаще используем в преподавании. Мы цитировали всю известную нам *более продвинутую* учебно-научную литературу. Но этот список тоже не претендует на полноту, поскольку мы можем не знать о некоторых публикациях.

В списке литературы [Ga, GKP, Har, Hal, K, M, R1, R2, R3, R4, S1, S2, VS, 8] и [AM, I, Ja, J, KZP, KR, O, P, Vi, R5, R6, S3, S5] — базовые учебники и статьи по темам этой книги и по связанным темам, [AS, B, Bo, G, L, S7, So] — более продвинутая литература.

²Часто происходит обратное: формулировки красивых результатов и важных проблем, ради которых была придумана теория, приводятся только *после* продолжительного изучения этой теории (или не приводятся совсем). Это способствует появлению представления о математике как науке, изучающей немотивированные понятия и теории. Такое представление принижает ценность математики.

Основные обозначения

- $[x]$ — (нижняя) целая часть числа x .
- $d \mid n$ — число n делится на число d (для целых d и n).
- \mathcal{R}_n — множество $\{1, 2, \dots, n\}$.
- $\mathbb{R}, \mathbb{Q}, \mathbb{Z}$ — множества всех действительных, рациональных и целых чисел, соответственно.
- \mathbb{Z}_2 — множество $\{0, 1\}$ остатков от деления на 2 с операциями сложения и умножения по модулю 2.
- \mathbb{Z}_m — множество $\{0, 1, \dots, m - 1\}$ остатков от деления на m с операциями сложения и умножения по модулю m .
- $\binom{n}{k}$ — количество k -элементных подмножеств n -элементного множества (другое обозначение: C_n^k).
- $\binom{X}{k}$ — множество всех k -элементных подмножеств множества X .
- $|X|$ — число элементов во множестве X .
- $A \setminus B = \{x \mid x \in A \text{ и } x \notin B\}$ — разность множеств A и B (не путайте этот знак с /).
- $A \sqcup B$ — дизъюнктивное объединение множеств A и B . Оно равно $A \cup B$, если $A \cap B = \emptyset$.
- $A \subset B$ — «множество A содержится в множестве B ». (В некоторых других книгах это обозначают $A \subseteq B$, а $A \subset B$ означает «множество A содержится в множестве B и не равно B ».)
- фраза «обозначим $x = a$ » сокращается до $x := a$.

1 Элементы комбинаторики

1.1 Подсчёт и комбинаторные тождества

1.1.1. (a) $\binom{n}{k} = \binom{n}{n-k}$. (b) Найдите сумму $\binom{n}{0} + \dots + \binom{n}{n}$.

1.1.2. (a) *Правило Паскаля.* $\binom{n+1}{k+1} = \binom{n}{k+1} + \binom{n}{k}$, если $0 \leq k \leq n-1$. (Подсказка приведена после задачи 1.1.4.а.)

(b) $\left\{ \begin{matrix} n+1 \\ k+1 \end{matrix} \right\} = (k+1) \left\{ \begin{matrix} n \\ k+1 \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} n \\ k \end{matrix} \right\}$. Здесь $\left\{ \begin{matrix} n \\ k \end{matrix} \right\}$ — количество разбиений n -элементного множества на k частей (т. е. непустых подмножеств); разбиения считаются неупорядоченными, т. е. разбиение множества $\{1, 2, 3\}$ на части $\{1, 2\}$ и $\{3\}$ и разбиение того же множества на части $\{3\}$ и $\{1, 2\}$ считаются одинаковыми. Ср. с задачей 1.4.7.е.

Замечание. Числа $\left\{ \begin{matrix} n \\ k \end{matrix} \right\}$ называются *числами Стирлинга второго рода*; подробнее о них см., например, [GKP, с. 287].

1.1.3. (a) Во скольких подмножествах множества \mathcal{R}_{11} не найдётся двух подряд идущих чисел?

(b) То же для *трёх* подряд идущих чисел.

1.1.4. (a) $\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} = \frac{n(n-1)\dots(n-k+1)}{k!}$.

(b) *Бином Ньютона.* $(a+b)^n = \sum_{j=0}^n \binom{n}{j} a^j b^{n-j}$.

Как решать задачи этого раздела? Мы предлагаем три метода, которые продемонстрируем на примере трех доказательств правила Паскаля 1.1.2.а. (Большинство задач этого раздела решаются несколькими методами из трех предложенных. Но, конечно, не каждый метод применим к каждой задаче. Обычно в указаниях для краткости приводится только один способ решения.)

Первое доказательство: комбинаторные рассуждения. Неформально говоря, идея в следующем: чтобы выбрать $k+1$ футболистов, нужно либо выбрать $k+1$ полевых, либо вратаря и k полевых. Приведем строгое изложение этой идеи.

и в субботу, и в воскресенье для каждого вида работ на работе был специалист по нему.

Замечание. Понятно, что при данном числе k специалистов (в задаче 1.5.7 $k = 8$) для малого числа видов работ так распределить выходные всегда можно. А при большом числе l видов работ это может уже не получиться. В следующей задаче мы находим асимптотическую оценку снизу для такого числа l .

Вот более ученая формулировка (обобщения) задачи 1.5.7. Имеется $l = 2^{k-1}$ подмножеств некоторого множества, в каждом из которых ровно k элементов. Тогда элементы этого множества можно раскрасить в два цвета так, чтобы никакое из l подмножеств не было одноцветно. Ср. с задачей 6.2.1.а.

1.5.8. (а) Если для некоторого чётного n

$$\left(1 - 2 \frac{\binom{n/2}{k}}{\binom{n}{k}}\right)^l 2^n < 1,$$

то в n -элементном множестве найдётся l таких k -элементных подмножеств, что при любой раскраске элементов этого множества в два цвета хотя бы одно из этих l подмножеств одноцветно.

(b) Существует такое $c > 0$, что для любого k существует не более чем $ck^2 2^k$ таких k -элементных подмножеств некоторого множества, что при любой раскраске элементов этого множества в два цвета одно из этих подмножеств одноцветно.

1.6 Комбинаторные покрытия. А.Я. Канель

Данная подборка посвящена прежде всего использованию покрытий как метода решения. В большинстве случаев рассматриваются *связи* между объектами и эти связи покрываются.

ИМО-2001,3. 21 девочка и 21 мальчик участвовали в олимпиаде. Оказалось, что

каждый участник решил не более 6 задач;

для любых мальчика и девочки найдется задача, которую они оба решили.

Докажите, что некоторую задачу решило не менее трех мальчиков и не менее трех девочек.

ИМО-2005, 6. На математической олимпиаде участникам было предложено 6 задач. Оказалось, что каждая пара задач была решена более чем $2/5$ от общего числа участников, но никто не решил все 6 задач. Докажите, что найдутся по крайней мере два участника, каждый из которых решил ровно 5 задач.

ИМО-2002, 6. Пусть $n \geq 3$ и C_1, \dots, C_n — круги единичного радиуса такие, что любая прямая пересекает не более трех из них. Докажите, что
$$\sum_{1 \leq i < j \leq n} \frac{1}{|O_i O_j|} \leq \frac{(n-1)\pi}{4}.$$

2003, 1. Пусть A есть 100-элементное подмножество множества $S = \{1, 2, \dots, 10^6\}$. Докажите, что для некоторых натуральных $\{t_1, \dots, t_{100}\} \subseteq S$ множества $A_j = \{x + t_j \mid x \in A\}$, $j = 1, \dots, 100$, попарно не пересекаются.

2006, 2. Каждой стороне b выпуклого многоугольника P поставлена в соответствие наибольшая из площадей треугольников, содержащихся в P , одна из сторон которых совпадает с b . Докажите, что сумма площадей, соответствующих всем сторонам многоугольника P , не меньше удвоенной площади многоугольника P .

Указания и решения

1.6.ИМО-2001.3. Каждая задача рассматривается как "связь" между мальчиками и девочками. Свяжем с ней пару (a, b) , где a — число решивших мальчиков, а b — девочек. Если заключение нашей задачи не выполнено, то для каждой задачи либо $a \leq 2$, либо $b \leq 2$. Рассматриваемая задача покрывает $a \times b$ пар мальчик—девочка (всего пар 21^2). Кроме того, $\sum a_i \leq 6 \cdot 21$ и $\sum b_i \leq 6 \cdot 21$. Решение задачи завершается подсчетом.

Похожим образом решается ??**.ИМО-2005.6.**

1.6.ИМО-2002.6. Рассмотрите *фазовое пространство* прямых. С использованием идеи фазового пространства рекомендуем познакомиться по решению задачи 4.6 (об альпинистах), опубликованном в №6 Математического Просвещения, стр. 150-151, или по книге В. И. Арнольд, "Обыкновенные дифференциальные уравнения", 1.1.2, где разбирается задача Н. Н. Константинова о возах.

1.6.2003.1. Последовательность $\{t_j\}$ строится поэтапно, возможность построения осуществляется исходя из соображения покры-

2 Основы теории графов

2.1 Основные определения

Графом $G = (V, E)$ называется конечное множество $V = V(G)$, некоторые двухэлементные подмножества (т. е. неупорядоченные пары несовпадающих элементов) которого выделены. Множество выделенных подмножеств обозначается $E = E(G)$. Таким образом, $E \subset \binom{V}{2}$.

Элементы данного множества V называются *вершинами*. Выделенные пары вершин называются *рёбрами*. Хотя эти пары неупорядоченные, в теории графов их традиционно обозначают круглыми скобками. Вершина, принадлежащая ребру, называется *его вершиной*. Если вершины a и b соединены ребром, они называются *соседними* или *смежными*, а само ребро (a, b) называется *проходящим* через вершину a и вершину b или *инцидентным* вершине a и вершине b .

Общепринятый термин для понятия графа, данного здесь — *граф без петель и кратных рёбер* или *простой граф*.

Если не оговорено противное, то через n и e обозначаются количества вершин и рёбер рассматриваемого графа, соответственно.

Граф можно представлять себе как набор точек (например, на плоскости), некоторые пары которых соединены ломаными. См. рис. 3, 4, 5, 8, 9, 16 и 17 ниже. При этом только концы каждой ломаной являются вершинами графа и каждая пара вершин не соединена более чем одной ломаной. Точки называются *вершинами* графа, а ломаные — *рёбрами*. Ломаные могут пересекаться, но точки пересечения «не считаются», т.е. не являются вершинами.

Путем P_n называется граф с вершинами $1, 2, \dots, n$ и ребрами $(i, i + 1)$, $i = 1, 2, \dots, n - 1$. *Циклом* C_n называется граф с вершинами $1, 2, \dots, n$ и ребрами $(1, n)$ и $(i, i + 1)$, $i = 1, 2, \dots, n - 1$. (Не путайте эти графы с *путем в графе* и *циклом в графе*, определенными ниже.) Граф с n вершинами, любые две из которых соединены ребром, называется *полным* и обозначается K_n . Если вершины графа можно разделить на две части так, что нет рёбер, соединяющих вершины из одной и той же части, то граф называется *двудольным*,

а части называются *долями*. Через $K_{m,n}$ обозначается двудольный граф с долями из m и из n вершин, в котором имеются все mn рёбер между вершинами разных долей.

2.1.1. В любом графе есть двудольный подграф, содержащий не менее половины рёбер графа.

Степенью $\deg v$ вершины v графа называется число выходящих из нее рёбер. *Изолированной вершиной* называется вершина, из которой не выходит ни одного ребра.

Грубо говоря, *подграф* данного графа — это его часть. Формально, граф G называется *подграфом* графа H , если каждая вершина графа G является вершиной графа H , и каждое ребро графа G является ребром графа H . При этом две вершины графа G , соединённые ребром в графе H , не обязательно соединены ребром в графе G .

k -*кликой* в графе называется его подграф с k вершинами, являющийся полным. *Независимым множеством* или *антикликой* в графе называется набор его вершин, между которыми нет рёбер.

Путем в графе называется последовательность $v_1e_1v_2e_2 \dots e_{n-1}v_n$, в которой для любого i ребро e_i соединяет вершины v_i и v_{i+1} . Число $n - 1$ называется *длиной* пути. (Рёбра e_1, e_2, \dots, e_{n-1} не обязательно попарно различны.)

Циклом в графе называется последовательность $v_1e_1v_2e_2 \dots e_{n-1}v_n e_n$, в которой для любого $i < n$ ребро e_i соединяет вершины v_i и v_{i+1} , а ребро e_n соединяет вершины v_n и v_1 . Циклы считаются одинаковыми, если они отличаются циклическим сдвигом последовательности. Число n называется *длиной* цикла. *Несамопересекающимся* называется цикл, для которого вершины v_1, v_2, \dots, v_n попарно различны и рёбра e_1, e_2, \dots, e_n попарно различны. Стандартный термин (менее удобный для начинающего) — *простой* цикл.

2.1.2. (а) Любой цикл, не проходящий ни по одному ребру дважды, содержит несамопересекающийся цикл.

(b) Любой цикл нечётной длины содержит несамопересекающийся цикл обход нечётной длины.

(c) Справедливо ли аналогичное утверждение для циклов чётной длины, не проходящих ни по одному ребру дважды?

(d) В графе есть несамопересекающийся цикл, проходящий через рёбра a и b , а также есть несамопересекающийся цикл, проходящий через рёбра b и c . Тогда есть несамопересекающийся цикл, проходящий через рёбра a и c .

Граф называется *связным*, если любые две его вершины можно соединить путём, и *несвязным* иначе.

2.1.3. Если степень каждой из n вершин графа больше $\frac{n}{2} - 1$, то граф связан.

Ясно, что «соединённость некоторым путём» является отношением эквивалентности на множестве вершин графа. *Связной компонентой* графа называется любой класс этой эквивалентности.

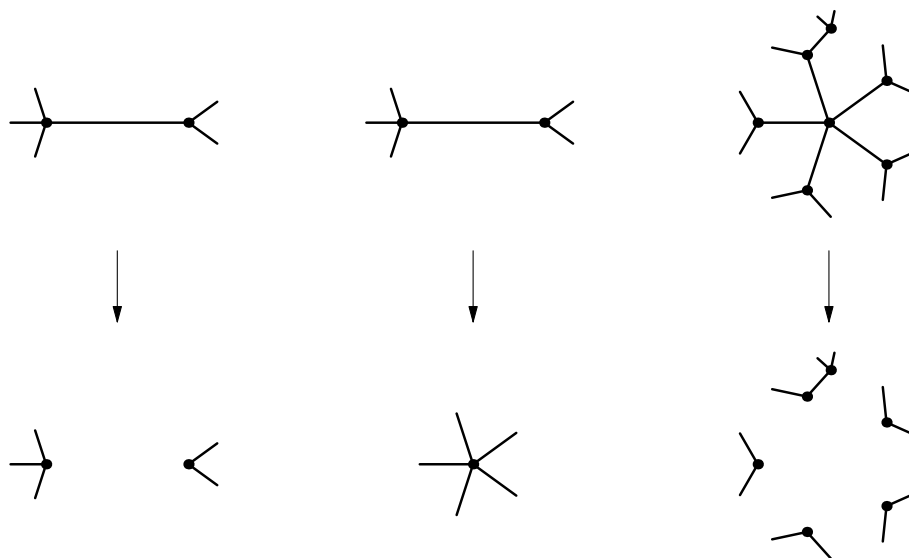


Рис. 2: Удаление ребра $G - e$, стягивание ребра G/e и удаление вершины $G - x$

Определение операций удаления ребра и удаления вершины ясно из рис. 2. Операция *стягивания ребра* (рис. 2) удаляет из графа это ребро и заменяет вершины A и B этого ребра на одну вершину D , а все рёбра, выходящие из вершин A и B в некоторые вершины, заменяет на рёбра, выходящие из вершины D в те же вершины. (Эта операция отличается от стягивания ребра в мультиграфах, см. §2.5, тем, что каждое получившееся ребро кратности больше 1 заменяется на ребро кратности 1.) Например, если граф — цикл с четырьмя

вершинами, то при стягивании любого его ребра получится цикл с тремя вершинами.

Ориентированным графом (без петель и кратных рёбер) $G = (V, E)$ называется конечное множество $V = V(G)$, некоторые упорядоченные пары несовпадающих элементов которого выделены. Множество выделенных пар обозначается $E = E(G)$. Таким образом, $E \subset \{(x, y) \in V \times V \mid x \neq y\}$. Если выделены и пара (a, b) , и пара (b, a) , то это ребро не называется кратным.

Ориентированный путь в ориентированном графе — такая последовательность вершин, что в каждую следующую вершину ведет ориентированное ребро из предыдущей.

2.1.4. Пусть дан ориентированный граф G , у которого на каждом ребре u написан вес $f(u)$. (Этот вес можно понимать как работу, которую нужно затратить для того, чтобы пройти по ребру от начала до конца.) Функция $p : V(G) \rightarrow \mathbb{R}$ («потенциал») такая, что $f(x, y) = p(x) - p(y)$ для любого ребра $u = (x, y)$, существует тогда и только тогда, когда сумма весов рёбер любого ориентированного цикла равна нулю (при прохождении ребра по циклу в направлении, противоположном ориентации, вес в сумму берётся с отрицательным знаком).

Турниром называется ориентированный граф, любые две вершины которого соединены ребром. (Т.е. для любых двух вершин v, w турнира среди его ребер есть (v, w) или (w, v) , но не оба ребра сразу.)

Некоторые другие определения приведены в начале каждого раздела.

2.2 Перечисление деревьев

Граф называется *деревом*, если он связан и не содержит несомпересекающихся циклов. *Остовом графа* называется любой его подграф, являющийся деревом и содержащий все вершины графа.

2.2.1. (а) В любом дереве найдется *лист*, т.е. вершина степени 1.

(б) В любом дереве с n вершинами $n - 1$ ребро.

(b) *Теорема Менгера (вершинная)*. Если вершины a и b мультиграфа G , не соединённые ребром, остаются в одной компоненте связности после удаления любых $k - 1$ других вершин, то a и b можно соединить k путями, пересекающимися только в этих двух вершинах.

2.8.6. Вершины A и B графа назовем *эквивалентными*, если существует такая последовательность вершин $A = A_0, A_1, \dots, A_n = B$, что любые две соседние вершины A_i и A_{i+1} можно соединить k путями, не имеющими общих промежуточных вершин. Тогда любые две эквивалентные вершины можно соединить k путями, не имеющими общих рёбер.

2.9 Простое доказательство теоремы Куратовского

Приводимое доказательство в основном принадлежит Ю. Макарычеву (он придумал свое доказательство, еще будучи школьником!) [Ма97], ср. [Th81, §5]. Некоторые упрощения, сделаны А. Заславским, В. Прасоловым, А. Скопенковым и А. Телишевым. По видимому, это доказательство является наиболее простым.

Необходимость в теореме Куратовского следует из утверждения 2.4.3.а. Приведем доказательство достаточности. Ее достаточно доказать для графов без петель и кратных ребер. Поэтому будем рассматривать только такие графы. Под стягиванием ребра будем понимать стягивание ребра вместе с заменой каждого получившегося ребра кратности больше 1 на ребро кратности 1.

2.9.1. Утверждение. *Если связный граф G не изоморфен ни K_5 , ни $K_{3,3}$, и для любого ребра e графа G оба графа $G - e$ и G/e планарны, то G планарен.*

Доказательство достаточности в теореме Куратовского с использованием Утверждения. Используем индукцию по количеству ребер в графе. Свойство «граф G содержит подграф, гомеоморфный графу H » будем сокращенно записывать в виде « $G \supset H$ ». Шаг индукции следует из Утверждения, поскольку если

$$G - e \supset K_5 \quad \text{или} \quad G - e \supset K_{3,3} \quad \text{или} \quad G/e \supset K_5 \quad \text{или} \quad G/e \supset K_{3,3}$$

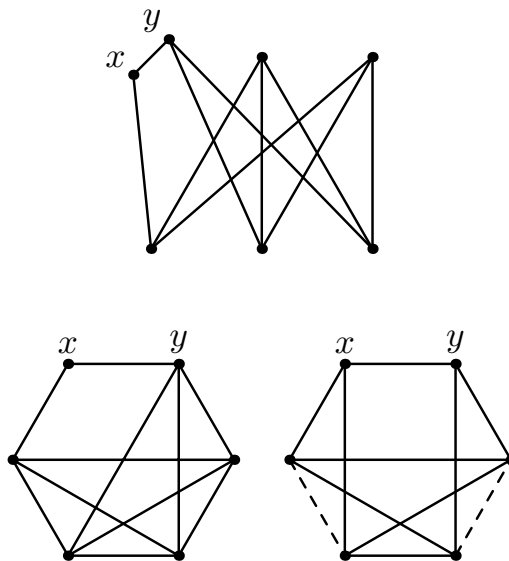


Рис. 10: «Растягивание ребра» в графах Куратовского

для некоторого ребра e графа G , то $G \supset K_5$ или $G \supset K_{3,3}$. «Для $G - e$ » выделенное курсивом утверждение очевидно. Если $G/xy \supset K_{3,3}$, то $G \supset K_{3,3}$, а если $G/xy \supset K_5$, то $G \supset K_5$ или $G \supset K_{3,3}$ (рис. 10). \square

Назовем θ -подграфом подграф, гомеоморфный $K_{3,2}$.

2.9.2. Лемма о графах Куратовского. Для произвольного графа K следующие три условия равносильны:

(1) Для любого ребра xy графа K граф $K - x - y$ не содержит θ -подграфа, и из каждой вершины графа $K - x - y$ выходит не менее двух ребер.

(2) Для любого ребра xy графа K граф $K - x - y$ является циклом (содержащим $n \geq 3$ вершин).

(3) K изоморфен K_5 или $K_{3,3}$.

Импlications (3) \Rightarrow (2) \Rightarrow (1) в лемме о графах Куратовского очевидны и не используются в доказательстве теоремы Куратовского.

Доказательство импликации (1) \Rightarrow (2) в лемме о графах Куратовского. Ввиду (1) в графе $K - x - y$ существует «висячий» цикл, т.е. цикл C , имеющий с остальным графом только одну общую вершину v (ибо граф $K - x - y$ представляет собой одно или

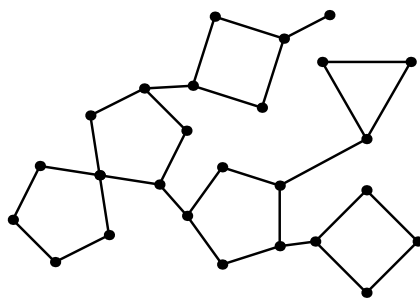


Рис. 11: «Дерево» из циклов

несколько «деревьев», «вершинами» которых служат циклы, рис. 11; формально говоря, каждым блоком графа $K - x - y$ является цикл). В этом цикле C есть еще по крайней мере две вершины p и q . Так как в графе K нет вершин, из которых выходит менее трех ребер, то каждая из этих вершин p и q соединена либо с x , либо с y . Поэтому в объединении цикла C и ребер графа K , соединяющих вершины x, y, p, q , можно выделить θ -подграф. Значит, по (1) каждое ребро графа $K - x - y$ имеет конец на цикле C . Поскольку по (1) граф $K - x - y$ не содержит висячих вершин, то $K - x - y = C$. \square

Доказательство импликации (2) \Rightarrow (3) в лемме о графах Куратовского. При $n = 3$ для любых двух вершин b и c цикла $K - x - y$ граф $K - b - c$ является циклом, поэтому оставшаяся вершина цикла $K - x - y$ соединена (ребром) в K и с x , и с y . Поэтому $K = K_5$.

При $n \geq 4$ возьмем любые четыре соседние вершины a, b, c, d цикла $K - x - y$. Поскольку граф $K - b - c$ является циклом, то в K одна из вершин a и d соединена с x (и не соединена с y), другая соединена с y (и не соединена с x), а отличные от a, b, c, d вершины цикла $K - x - y$ (которых нет при $n = 4$) не соединены ни с x , ни с y . При $n \geq 5$ получаем противоречие. При $n = 4$ получаем, что четыре вершины цикла $K - x - y$ соединены с x и y попеременно, откуда $K = K_{3,3}$. \square

Доказательство утверждения. Так как G не изоморфен ни K_5 , ни $K_{3,3}$, то по лемме о графах Куратовского существует ребро $e = (xy)$ графа G , для которого в графе $G - x - y$ найдется либо вершина степени меньше 2 (в $G - x - y$), либо θ -подграф.

Если в графе G из некоторой вершины выходит одно или два его ребра, то при стягивании одного из них получается планарный

граф, значит, и граф G планарен. Поэтому далее будем считать, что из каждой вершины графа G выходит не менее трех его ребер.

Поэтому в графе $G - x - y$ нет изолированных вершин, и если есть висячая вершина p , то она соединена и с x , и с y в графе G . Нарисуем граф $G - (xy)$ на плоскости без самопересечений. Так как в графе G из p выходит три ребра, то «с одной стороны» от пути xry из p не выходит ребер. «Подрисуем» ребро xy вдоль пути xry «с этой стороны» от пути. Получим изображение графа G на плоскости без самопересечений.

Рассмотрим теперь случай, когда в графе $G - x - y$ найдется θ -подграф.

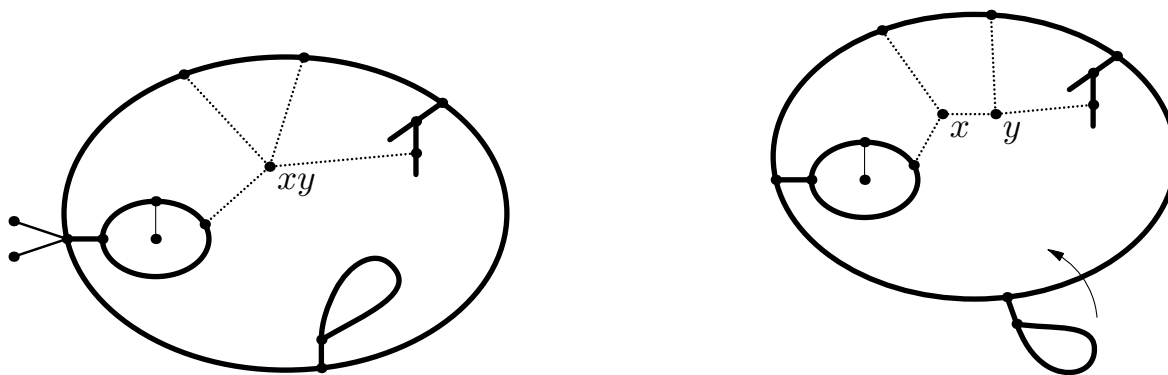


Рис. 12: Изображение на плоскости графов G/xy и G

Нарисуем без самопересечений на плоскости граф G/xy (рис. 12 слева). Изображение графа $G - x - y = G/xy - xy$ на плоскости получается стиранием ребер графа G/xy , выходящих из вершины xy . Обозначим через \bar{C} границу той грани (изображения) графа $G/xy - xy$, которая содержит вершину xy графа G/xy . (Определение грани приведено в п. 2.4.)

Заметим, что *граница грани не может содержать θ -подграфа.*

(Это утверждение можно вывести из теоремы Жордана. Другое доказательство получается от противного: если граница грани содержит θ -подграф, то возьмем точку внутри этой грани и соединим ее тремя ребрами с тремя точками на трех «дугах» θ -подграфа. Получим изображение графа $K_{3,3}$ на плоскости без самопересечений. Противоречие.)

Поэтому $G - x - y \neq \overline{C}$. Тогда ребра графа $G - x - y - \overline{C}$ ⁴ находятся в грани (изображения) графа $G - x - y = G/xy - xy$, не содержащей вершины xy . Значит, граф \overline{C} разбивает плоскость. Поэтому найдется цикл $C \subset \overline{C}$, относительно которого вершина xy лежит (не уменьшая общности) внутри, а некоторое ребро графа $G - x - y - \overline{C}$ — вне.

Обозначим через R объединение всех ребер графа G/xy , лежащих вне цикла C . (Возможно, $G - x - y - \overline{C} \neq R$.) Можно считать, что R — подграф в G (а не только в $G - x - y$).

Граф $G - R$ можно нарисовать на плоскости без самопересечений (рис. 12 справа). Можно считать, что ребра графа G , выходящие из x или y , на изображении графа $G - R$ лежат *внутри* цикла C .

Каждая компонента связности графа $G - x - y - R - C$ пересекается с C не более чем по одной точке.

(Если это не так, то в $G - x - y - R - C$ есть путь, соединяющий две точки на C . На изображении графа G/xy соответствующий путь лежит внутри цикла C . Значит, этот путь разбивает внутреннюю часть цикла C на две части, одна из которых содержит xy , а другая не лежит в грани, ограниченной \overline{C} . Поэтому $C \not\subset \overline{C}$ — противоречие.)

Поэтому можно перекинуть внутрь цикла C каждую компоненту связности графа $G - x - y - R - C$ (см. стрелочку на рис. 12 справа). Значит, граф $G - R - C$ можно нарисовать внутри цикла C . Нарисуем R вне C , как для изображения графа G/xy (рис. 12 слева). Получим изображение графа G на плоскости без самопересечений. □

Запрещенные подсистемы

Завершим этот пункт формулировками некоторых версий теоремы Куратовского.

Начнем с неформального изложения идеи. Если некоторая подсистема системы N не реализуема в другой системе M , то и N не реализуема в M . Естественная идея — попытаться найти список «запрещенных» систем, не реализуемых в M , со следующим свой-

⁴Удаление подграфа — удаление всех его ребер и всех вершин, из которых выходят только ребра этого подграфа. Заметим, что удаление вершины — не то же самое, что удаление подграфа из этой вершины.

ством: для того, чтобы система N была реализуема в M необходимо и достаточно, чтобы N не содержал ни одной из этих «запрещенных» подсистем.

Классический пример теоремы такого рода — теорема Куратовского. Аналогично описание графов, вложимых в данную поверхность [RS90], а также других классов графов или более общих объектов [C137] (например, графы и даже пеановские континуумы, базисно вложимые в плоскость [Sk95, Ku00]).⁵ Приведем формулировки некоторых результатов такого рода (доказательства оставляем читателю в качестве задач).

2.9.3. Теорема Шартрана-Харари. *Граф G можно нарисовать на плоскости без самопересечений так, чтобы он был границей некоторой одной грани тогда и только тогда, когда G не содержит θ -подграфа.*

Назовем несамопересекающийся цикл C в связном графе G *граничным*, если существует изображение без самопересечений графа G на плоскости, при котором цикл C изображается границей некоторой грани.

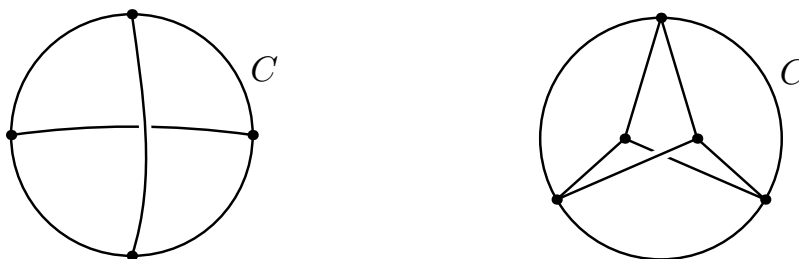


Рис. 13: Цикл C не может быть границей внешней грани

⁵Заметим, что список запрещенных подграфов для вложимости графа в лист Мебиуса содержит целых 103 графа [GHW79]. Даже существование такого конечного списка для произвольной поверхности доказывается сложно [АН89, RS90]. Список запрещенных полиэдров бесконечен для вложимости двумерных полиэдров в \mathbb{R}^3 или n -мерных полиэдров в \mathbb{R}^{2n} , где $n \geq 2$ [Sa91]. Поэтому интересны другие препятствия к вложимости. Одно из самых полезных препятствий строится с помощью *конфигурационного пространства* упорядоченных пар различных точек данного пространства [Sk08, §5].

2.9.4. Относительная версия теоремы Куратовского. Цикл C является граничным тогда и только тогда, когда граф G планарен и цикл C не содержится в подграфе графа G , как на рис. 13.

Этот результат можно вывести из теоремы Куратовского.

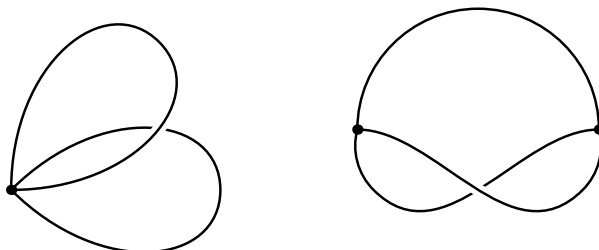


Рис. 14: Графы с циклическими порядками, не реализуемыми на плоскости

2.9.5. Теорема о θ и θ . Граф G с заданными циклами ребер, выходящих из каждой вершины, можно так изобразить без самопересечений на плоскости, чтобы указанные циклы шли по часовой стрелке, тогда и только тогда, когда G не содержит «восьмерки» или «буквы θ » с циклами, изображенными на рис. 14.

А этот результат проще доказать, не используя теорему Куратовского (подробнее см. [S3, глава 1]).

2.10 Метод минимального контрпримера. А. Канель

При решении многих задач используется так называемый *метод минимального контрпримера* (разновидность *принципа крайнего* или *метода спуска*). Он заключается в следующем. Пусть надо доказать, что объекта, удовлетворяющего некоторым свойствам, не существует. Предположим противное — тогда найдется (в некотором смысле) *минимальный* контрпример. После чего строят еще «меньший» контрпример и получают противоречие. Понятие «меньше» подбирается в процессе доказательства.

Особенно распространен такой метод решения в задачах на графы. Простейшие примеры — доказательства теорем Эйлера 2.4.2 о плоских графах [P], Куратовского (п. 2.4 и 2.9) и Менгера (п. 2.8

и [Sk12]). Более содержательный пример — следующая знаменитая теорема Дилуорса о частично упорядоченных множествах.

2.10.1. Множество A с отношением \prec называется *частично упорядоченным*, если отношение \prec удовлетворяет следующим свойствам:

- (1) $a \not\prec a$,
- (2) $a \not\prec b$ либо $b \not\prec a$, и
- (3) если $a \prec b$ и $b \prec c$, то $a \prec c$.

Если $a \prec b$ или $b \prec a$, то элементы a и b называются *сравнимыми*. Если же $a \not\prec b$ и $b \not\prec a$, то они называются *несравнимыми*. *Цепью* называется множество попарно сравнимых элементов, а *антицепью* — попарно несравнимых. *Диаметром* частично упорядоченного множества называется максимальный размер антицепи.

(а) Количество цепей, на которые можно разбить частично упорядоченное множество, не меньше его диаметра.

(б) *Теорема Дилуорса.* Количество цепей, на которые можно разбить частично упорядоченное множество, равно его диаметру.

2.10.2. (Задача зонального этапа Всероссийской олимпиады 1994 г.) В каждый город ведет 3 дороги: красная, синяя и белая. В зависимости от цветов входящих дорог, считая по часовой стрелке, города разделяются на два типа КСБ и КБС. Докажите, что разность количеств городов разных типов делится на 4.

2.10.3. (а) (ИМО, 2004, Shortlist) С графом разрешается производить следующую операцию: выбрать произвольный цикл длины 4 и выбросить из него произвольное ребро. Какое минимальное число ребер можно оставить с помощью этой операции из полного графа с n вершинами?

(б) (ИМО, 2001, Shortlist) Если в графе любые две 3-клики имеют общую вершину и нет 5-клик, то существуют две вершины, удаление которых разрушает все 3-клики.

2.10.4. (ИМО, 1992, Longlist) Для любых $m < n$ любой граф с n вершинами содержит подмножество из $m + 1$, вершины степени которых отличаются не больше чем на $m - 1$.

2.11 Степенные последовательности. В.А. Волков, М.Н. Вялый и А.Б. Скопенков

2.11.1. (а) При каких e и n существует граф с n вершинами и e ребрами, каждая вершина которого имеет степень 3? (Такие графы называют *кубичными* или *правильными степени 3*.)

(б) При каких n и d существует граф с n вершинами, каждая вершина которого имеет степень d ?

2.11.2. Последовательность n целых положительных чисел является последовательностью степеней вершин некоторого дерева тогда и только тогда, когда сумма её членов равна $2n - 2$.

2.11.3. Даны целые положительные числа n, d_1, \dots, d_n . При каких условиях существует

(а) мультиграф (возможно, имеющий петли и кратные ребра)

(б) мультиграф без петель

(с)* граф

с n вершинами степеней d_1, \dots, d_n , соответственно?

Последовательность целых неотрицательных чисел называется *степенной* (графической), если она является последовательностью степеней вершин некоторого графа. *Основной вопрос*: какие последовательности являются степенными? Ср. с задачей 2.11.3.с; неотрицательность введена для удобства индуктивных построений.

2.11.4. Является ли степенной последовательность

(а) $(4^3, 1^6)$, (б) $(6^4, 2^3)$, (с) $(5^3, 3^3)$,

(д) $(18^{10}, 12^3, 6^8)$, (е) $(15^8, 10^6, 3^4)$?

(Мы используем «экспоненциальную» запись невозрастающих целочисленных последовательностей: a^k означает, что k последовательных членов последовательности равны a .)

2.11.5. Для любой степенной последовательности d_1, \dots, d_n

(а) $d_i \leq n - 1$;

(б)
$$\sum_{i=1}^k d_i \leq k(k-1) + \sum_{i=k+1}^n \min(k, d_i)$$
 для любого $k = 1, \dots, n - 1$.

2.11.6. (а) Приведите пример числа n и не степенной последовательности из n чисел, лежащих в промежутке $[1000, n/1000]$, сумма которых четна.

(б) Любая последовательность из n чисел, меньших $\sqrt{n}/2$, сумма которых четна — степенная.

2.11.7. Последовательность целых положительных чисел — степенная тогда и только тогда, когда последовательность, полученная из нее следующим преобразованием — степенная.

(а) Выкинем максимальное число d и отнимем по единице от следующих по возрастанию d чисел.

(б) Отнимем по единице от наибольшего и наименьшего из чисел.

Каждый из двух пунктов этой задачи дает алгоритм распознавания того, является ли данная последовательность степенной. Имеется и «явный» ответ, см. подсказку к задаче 2.11.3.с.

2.11.8. Пусть a, b, c, d — различные вершины графа, причем (ab) , (cd) — ребра, а (ac) , (bd) — не ребра. Назовем *обменом* преобразование графа, состоящее в удалении ребер (ab) , (cd) и добавлении ребер (ac) , (bd) .

Пусть G_1, G_2 — два графа с одинаковыми (упорядоченными по неубыванию) последовательностями степеней вершин. Докажите, что обменами можно перевести граф G_1 в граф G_2 .

2.11.9. Пусть для последовательности $d_1 \geq \dots \geq d_n > 0$ (не обязательно степенной) выполнены неравенства из задачи 2.11.5.б.

(а) Тогда $d_1 \leq n - 1$.

(б) Переставим по невозрастанию последовательность, полученную преобразованием из задачи 2.11.7.а. Докажите неравенства из задачи 2.11.5.б с заменой d на полученную последовательность c :

$$\sum_{i=1}^k c_i \leq k(k-1) + \sum_{i=k+1}^n \min\{k, c_i\} \text{ для любого } k = 1, \dots, n-1.$$

Сделайте это для

(b1) $k \geq d_1$; (b2) таких k , что $c_i = d_{i+1} - 1$ при любом $i \leq k$;

(b3) остальных случаев.

2.11.10. Пусть для последовательности $d_1 \geq \dots \geq d_n > 0$ (не обязательно степенной) выполнены неравенства из задачи 2.11.5.b. Переставим по невозрастанию последовательность, полученную преобразованием из задачи 2.11.7.b. Докажите неравенства из задачи 2.11.5.b с заменой d на полученную последовательность c при

- (a) $k \geq t := \min\{i : d_i > d_{i+1}\}$; (b) $d_k \leq k - 1 \leq t - 2$;
 (c) $d_k = k \leq t - 1$; (d) $d_k \geq k + 1 \leq t$.

В заключение приведем несколько задач для исследования.

2.11.11. (a,b,c) То же, что в задаче 2.11.3, для *связных* графов.

(a',b',c') Сформулируйте и решите аналог задачи 2.11.3 для *ориентируемых* графов.

(a'',b'',c'') То же, что в задаче 2.11.3 для *планарных* графов.

(a''',b''',c''')* То же, что в задаче 2.11.3, для графов, реализуемых на торе (рис. 7).

(a''''b''''c''''*) То же, что в задаче 2.11.3, для графов, реализуемых на ленте Мебиуса (рис. 7).

Необходимые определения можно найти в п. 2.4. Для тора и ленты Мебиуса будет полезно неравенство Эйлера [Sk15, §2].

Задачи 2.11.11.(a'',b'',c'') при помощи конструкции *двойственного* графа связаны со следующими задачами. Даны целые положительные числа n, d_1, \dots, d_n . При каких условиях существует

- (a) мультиграф (возможно, имеющий петли и кратные ребра)
 (b) мультиграф без петель
 (c)* граф

нарисованный без самопересечений на плоскости, имеющий n граней, в границе которых d_1, \dots, d_n ребер, соответственно?

Аналогичное замечание справедливо для реализуемости на торе и на ленте Мебиуса. Все эти задачи интересно обобщить на сферу с g ручками и на диск с t листами Мебиуса [Sk15, §2].

2.11.12. * (a) Можно ли опустить какие-нибудь неравенства из задачи 2.11.5.b так, чтобы достаточность (т.е. теорема из подсказки к задаче 2.11.3.c) осталась верной? Если да, то попробуйте найти минимальный набор неравенств.

(b) Если слить две степенные последовательности, то получится степенная последовательность. А какие степенные последовательности нельзя разбить на две степенные последовательности?

2.12 Гамильтоновость: задачи для исследования. А.Ю. Веснин, Д.А. Пермяков, А.Б. Скопенков

Пусть H — граф. Граф X называется H -гамильтоновым, если в X существует подграф, содержащий все вершины графа X и гомеоморфный графу H .

Например, гамильтоновость равносильна K_3 -гамильтоновости.

Следующая задача (кроме (g)) проста и приводится для того, чтобы помочь решателю войти в курс дела. Задачи, отмеченные звездочкой, являются нерешенными. Обычно при решении сложной задачи полезно рассмотреть частные случаи, попытаться решить близкие задачи. Это позволяет заметить закономерности, которые можно сформулировать в виде гипотез и затем доказать. Мы не будем подсказывать эти гипотезы, а предлагаем вам самим исследовать нерешенные задачи и высказывать ваши предположения.

Обозначим $\theta := K_{3,2}$.

2.12.1. (a) Любой гамильтонов граф, отличный от цикла, является θ -гамильтоновым.

(b) Существует θ -гамильтонов граф, не являющийся гамильтоновым.

(c) Существует ли гамильтонов граф, отличный от цикла, не гомеоморфный графу θ и не являющийся K_4 -гамильтоновым?

(d) Существует ли K_4 -гамильтонов граф, не являющийся θ -гамильтоновым?

(e) Для любого ли графа G существует граф, не являющийся G -гамильтоновым?

(f) Для любых ли графов G и H существует G -гамильтонов граф, не являющийся H -гамильтоновым?

(g)* Опишите «иерархию» графов по их гамильтоновости: когда H -гамильтонов граф является G -гамильтоновым?

2.12.2. (a) Постройте не гамильтонов граф многогранника.

$(b, c^*, d^*, e^*, f^*, g^*)$ То же, что в задаче 2.12.1, для графов многогранников.

Граф Погорелова — граф выпуклого многогранника в трехмерном пространстве,

(1) из каждой вершины которого исходит три ребра,

(2) каждая замкнутая несамопересекающаяся ломаная на поверхности многогранника, разделяющая какие-либо две его грани, пересекает по крайней мере пять ребер многогранника.

Из (2) вытекает, что в границе каждой грани не менее пяти ребер.

2.12.3. (a) Правильный додекаэдр является графом Погорелова.

(b) Граф с рис. 9 является графом Погорелова.

(c)* Охарактеризуйте графы Погорелова в теоретико-графских терминах (подобно характеристике Штейница графов многогранников).

Негамильтонов граф Погорелова с рис. 9 является θ -гамильтоновым (задача 2.12.2.b).

2.12.4. $(c^*, d^*, e^*, f^*, g^*)$ То же, что в задаче 2.12.1, для графов Погорелова.

2.12.5. * Постройте минимальный (по числу граней) граф Погорелова,

(a) являющийся K_4 -гамильтоновым, но не θ -гамильтоновым.

(b) не являющийся K_4 -гамильтоновым.

(c) не являющийся H -гамильтоновыми ни для какого подграфа H данного графа G . (Например, для $G = K_4$.)

См. подробнее [Ve].

Ориентированный граф называется *сильно связным*, если от любой его вершины можно добраться до любой другой, двигаясь по направлению стрелок на ребрах.

2.12.6. (a) Турнир сильно связан тогда и только тогда, когда в нем есть гамильтонов ориентированный цикл (т.е. несамопересекающийся цикл, идущий по направлениям стрелок на ребрах и проходящий по всем вершинам).

2.8.5. (b) Пусть G — минимальный по числу рёбер контрпример к теореме Менгера (b) для $k = 3$. Докажите, что вершины a и b оказываются в разных компонентах после удаления некоторых трёх вершин x, y, z , две из которых соединены ребром.

2.11.2. Индукция с откидыванием висячей вершины.

2.11.3. Обозначим $e := (d_1 + \dots + d_n)/2$.

Ответы: (a) e целое. (b) e целое и $d_i \leq e$ для любого i .

(c) **Теорема.** *Невозрастающая последовательность является степенной тогда и только тогда, когда сумма ее членов четна и выполнены неравенства задачи 2.11.5.b.*

2.11.5. (b) Оцените сверху количество ребер, выходящих из первых k вершин (и снизу количество ребер, выходящих из последних $n - k$ вершин).

2.11.7. Используйте обмены (определенные в задаче 2.11.8).

(b) Удалим ребро между вершиной наибольшей степени и вершиной наименьшей степени, если это возможно.

2.11.8. *Первый способ.* Рассмотрите вершину наибольшей степени и ребра (в графах G_1 и G_2), выходящие из нее.

Второй способ. Рассмотрим граф с теми же вершинами. Его красные ребра — те, которые есть в G_1 , но не в G_2 . Его синие ребра — те, которые есть в G_2 , но не в G_1 . Докажите, что в нем есть цветочередующийся цикл.

2.11.11. (a', b', c') См., например, [Ru].

(a'', b'', c'') Используйте формулу Эйлера 2.4.2.

(a''', b'''), (a'''' , b''''), (a'''' , b'''')) Следующие ответы для сферы с g ручками (или диска с t листами Мебиуса) получены в [Mo]. Здесь g, t даны вместе с n и d_1, \dots, d_n .

(a) e целое и $e \geq n - 1 + 2g$ (или $e \geq n - 1 + t$).

(b) e целое, $e \geq \max d_i$ и $e \geq n - 1 + 2g$ (или $e \geq n - 1 + t$).

2.12.2. (a) См. рис. 9.

(b) *Отредактировать или убрать!* Рассмотрим минимальный контрпример. Пусть C — цепь диаметра D . Тогда каждый элемент множества $M - D$ либо больше некоторого элемента из D , либо строга его меньше. Таким образом, $M - D$ есть несвязное объединение двух частей M' (выше D) и M'' (ниже D).

Если $M' \cup D$ и $M'' \cup D$ разбиваются на d цепей, то и все M разбивается на d цепей (каждая цепь склеивается из верхней и нижней половин).

Если

$$M' \neq \emptyset \quad \text{и} \quad M'' \neq \emptyset, \quad \text{то} \quad \#(M' \cup D) < \#M \quad \text{и} \quad \#(M'' \cup D) < \#M.$$

Мы осуществили спуск. В противном случае имеется не более двух максимальных антицепей: верхняя (если $M' = \emptyset$) и нижняя (если $M'' = \emptyset$). Рассмотрим случай наличия только верхней антицепи (случай наличия только нижней антицепи симметричен).

Пусть имеется единственная максимальная антицепь D и $x \in D$. Тогда $M - \{x\}$ имеет диаметр $d - 1$ и в силу минимальности контрпримера разбивается на $d - 1$ цепь C_1, \dots, C_{d-1} . Поэтому $x \cup \{C_i\}_{i=1}^{d-1}$ есть искомое разбиение на d цепей.

Пусть имеются две максимальные антицепи D_1 и D_2 . Легко показать, что найдется пара элементов $x \in D_1$ и $y \in D_2$ таких, что $x \prec y$. Тогда диаметр множества $M - \{x, y\}$ строго меньше диаметра M и доказательство завершается аналогично.

2.11.1. (a) *Ответ:* такой граф существует при $(V, E) = (2k, 3k)$ для произвольного целого $k > 1$.

Рассмотрим произвольный кубический граф: каждая его вершина имеет степень 3. Сумма степеней всех вершин есть $2E$. Поэтому $3V = 2E$. Тогда пары чисел (V, E) имеют вид $(2k, 3k)$ для некоторого натурального k . Так как нет петель и кратных ребер, то $k = 1$ невозможно.

При $k > 1$ условию удовлетворяют, например, $2k$ -угольник с проведенными в нем диагоналями, соединяющими i -тые и $(i + k)$ -тые вершины.

(b) *Ответ:* такой граф существует при $d \in \{0, 1, \dots, n - 1\}$ и dn четном.

Для доказательства достаточности расположим вершины графа в вершинах правильного n -угольника. Соединим ребрами вершины, расстояние между которыми по окружности не превосходит $d/2$. Для четного d построение графа закончено. Для нечетного d число n четно, поэтому можно и нужно добавить большие диагонали.

2.11.3. (b) *Доказательство (написано А. Руховичем).* Необходимость целочисленности e вытекает из того, что e равно числу ребер в графе. Второе условие необходимо, поскольку в графе нет петель, а значит степень каждой вершины не больше суммы степеней остальных вершин.

Докажем достаточность индукцией по e . База индукции: утверждение для $e = 0$ очевидно. Докажем шаг индукции. Пусть утверждение для $e < k$. Докажем, что оно верно и для $e = k \geq 1$. Из $k \geq 1$ и условия $d_i \leq e$ следует, что найдутся хотя бы две вершины ненулевой степени. Можно считать, что $d_1 \geq d_2 \geq \dots \geq d_n$. Рассмотрим набор $d_1 - 1, d_2 - 1, d_3, \dots, d_n$. Условия теоремы для него выполнены, поскольку сумма степеней вершин уменьшилась на 2, а степень каждой вершины понизилась не более, чем на 1. Поэтому можно воспользоваться предположением индукции: существует граф для набора $d_1 - 1, d_2 - 1, d_3, \dots, d_n$. В этом графе соединим ребром вершины 1 и 2. Поскольку эти вершины различны, то петель не появилось. Следовательно, новый граф не содержит петель. Ясно, что набор степеней его вершин — $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$. QED

2.11.4. *Ответы:* (a,c) да. (b,d,e) нет.

2.11.7. (b) Докажем часть ‘только тогда’. Возьмем граф, реализующий исходную последовательность. Если в нем вершина M наибольшей степени и вершина O наименьшей степени соединены ребром, то удалим это ребро. Иначе имеется ребро OX с $X \neq M$.

Пусть X не соединена с M . Тогда среди вершин, соединенных с M , есть вершина N , не соединенная с X . Добавим ребро NX и удалим ребра MN и OX .

Случай, когда X соединена с M , также легко рассматривается.

Приведем два доказательства теоремы о степенных последовательностях из подсказки к задаче 2.11.3.c (они включают решение задач 2.11.3.c, 2.11.9 и 2.11.10).

Доказательство С.А. Чоудамы. Индукция по $\sum d_i$. Случай, когда все d_i равны, рассмотрен в задаче 2.11.1.b. Пусть теперь не все d_i равны. Можно считать, что $d_n > 0$.

Определим последовательность c , как в задаче 2.11.10. Более формально, обозначим $t = \min\{i : d_i > d_{i+1}\}$ и определим последовательность

$$c = (c_1, c_2, \dots, c_n) \quad \text{формулой} \quad c_i := \begin{cases} d_i, & i \neq t, n, \\ d_i - 1, & i = t, n. \end{cases}$$

Обозначим $S_k = \sum_{i=1}^k d_i$, $S'_k = \sum_{i=1}^k c_i$. По задаче 2.11.7.b достаточно доказать неравенства

$$(*) \quad S'_k \leq k(k-1) + \sum_{i=k+1}^n \min\{k, c_i\}.$$

При $k \geq t$

$$S'_k = S_k - 1 \leq k(k-1) + \sum_{i=k+1}^n \min\{k, d_i\} - 1 \leq k(k-1) + \sum_{i=k+1}^n \min\{k, c_i\}.$$

Пусть теперь $k \leq t - 1$. Тогда $S'_k = S_k = kd_k$.

Для $d_k \leq k - 1$ неравенство (*) тривиально.

Для $d_k = k$

$$\begin{aligned} S'_k - k(k-1) &= k^2 - k(k-1) = k \stackrel{(3)}{=} d_{k+1} \stackrel{(4)}{\leq} \\ &\leq d_{k+1} + \left(\sum_{i=k+2}^n d_i - 2 \right) \stackrel{(5)}{=} \sum_{i=k+1}^n \min\{k, c_i\}, \quad \text{где} \end{aligned}$$

- равенство (3) выполнено, поскольку $k \leq t - 1$;
- неравенство (4) очевидно, если $k + 2 < n$; если же $k + 2 = n$, то $d = ((n-2)^{(n-1)}, d_n)$ и $d_n \geq 2$ в силу четности суммы $d_1 + d_2 + \dots + d_n$.
- равенство (5) выполнено, поскольку $\min\{k, c_i\} = c_i$ при $i \geq k + 1$.

Случай $d_k \geq k + 1$. Если $d_n \geq k + 1$, то $\min\{k, d_i\} = \min\{k, c_i\} = k$ при $i \geq k + 1$ и неравенство (*) следует из аналогичного для S_k .

Пусть теперь $d_n \leq k$. Имеем

$$\min\{k, c_i\} = \begin{cases} \min\{k, d_i\} & k+1 \leq i < n \\ \min\{k, d_n\} - 1 & i = n \end{cases}.$$

В нашем случае $S'_k = S_k$, поэтому достаточно показать, что

$$(**) \quad S_k \leq k(k-1) + \sum_{i=k+1}^n \min\{k, c_i\} = k(k-1) + \sum_{i=k+1}^n \min\{k, d_i\} - 1.$$

Учитывая, что $d_{k+1} = d_k \geq k+1$, получаем

$$\begin{aligned} S_{k+1} &= (k+1)d_k = \frac{k+1}{k} S_k \stackrel{(3)}{\leq} (k+1)(k-1) + \frac{k+1}{k} \sum_{i=k+1}^n \min\{k, d_i\} = \\ &= (k+1)(k-1) + (k+1) + \frac{k+1}{k} \sum_{i=k+2}^n \min\{k, d_i\} \stackrel{(5)}{>} \\ &> (k+1)k + \sum_{i=k+2}^n \min\{k+1, d_i\} \geq S_{k+1}. \end{aligned}$$

Неравенство (5) выполнено, так как при всех $k+2 \leq i < n$ имеем нестрогое неравенство и при $i = n$ строгое. Значит, в (3) неравенство строгое. Отсюда вытекает (**).

Другое доказательство. Первый абзац такой же, как в предыдущем доказательстве. Определим последовательность d' , как в задаче 2.11.9. По задаче 2.11.7.а достаточно доказать неравенства из задачи 2.11.5.б для последовательности d' .

Выполнение этих неравенств несложно проверить для $k \geq d_1$.

Докажем неравенства для тех k , для которых $d'_i = d_{i+1} - 1$ при любом $i \leq k$.

Обозначим $S := \sum_{j=k+1}^{n-1} \min(k, d'_j)$.

Случай 1. Среди чисел $d_{k+2}, d_{k+3}, \dots, d_n$ более $d_1 - k$ чисел, больших k . Тогда

$$\sum_{i=1}^k d'_i \leq kd_1 = k(k-1) + k(d_1 - k + 1) \leq k(k-1) + S.$$

Первое неравенство выполнено, так как каждое слагаемое в первой сумме не больше d_1 . Последнее неравенство выполнено, так как среди чисел $d'_{k+1}, d'_{k+2}, \dots, d'_{n-1}$ более $d_1 - k$ чисел, не меньших k .

Случай 2. Среди чисел $d_{k+2}, d_{k+3}, \dots, d_n$ не более $d_1 - k$ чисел, больших k . Тогда

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^k d'_i &= -d_1 - k + \sum_{i=1}^{k+1} d_i \leq k(k+1) - d_1 - k + \sum_{j=k+2}^n \min(k+1, d_j) \leq \\ &\leq k^2 - d_1 + S + d_1 - k = k(k-1) + S. \end{aligned}$$

Первое и четвертое равенства очевидны. Второе неравенство — известное для старой последовательности. Докажем третье неравенство. Среди чисел $d_{k+2}, d_{k+3}, \dots, d_n$ ровно $d_1 - k$ чисел было уменьшено на 1 при переходе к новой последовательности. Поэтому в сумме $\sum_{j=k+2}^n \min(k+1, d_j)$ при переходе к S первые $d_1 - k$ слагаемых уменьшились на 1, а остальные не изменились.

Докажем неравенства для оставшихся случаев???

2.11.11. (a,b) *Ответы:* то же, что в соответствующих пунктах задачи 2.11.3, с добавлением условия $n - 1 \leq e$.

Доказательство п. (b) (предложено А. Руховичем). Для доказательства необходимости обозначим через e количество ребер в графе. Необходимость условий (1), (2) и (3) легко проверяется.

Для доказательства достаточности рассмотрим граф, полученный по ответу к задаче 2.11.3.b. Обозначим через s количество компонент связности этого графа.

Докажем, что если $s > 1$, то можно уменьшить количество компонент связности, не меняя степеней вершин. Из условия (3) получаем $e \geq n - 1 > n - s$. Поэтому хотя бы в одной компоненте связности есть цикл. Тогда можно взять ребро a_1a_2 этого цикла и ребро b_1b_2 из другой компоненты связности. Удалим эти ребра, и вместо них добавим ребра a_1b_1 и a_2b_2 (ср. с задачей 2.11.8). Тогда степени вершин сохранятся, а количество компонент связности уменьшится на 1.

Таковыми операциями можно понизить количество компонент связности до 1. Получится связный граф без петель с заданными степенями вершин. QED

4 Основы теории Рамсея

4.1 Двухцветные числа Рамсея

4.1.1. (33') Среди пяти человек может не найтись ни трёх попарно знакомых, ни трёх попарно незнакомых.

(33) Среди любых шести человек найдётся либо трое попарно знакомых, либо трое попарно незнакомых.

(43) Среди любых десяти человек найдётся либо четверо попарно знакомых, либо трое попарно незнакомых.

(439) Среди любых девяти человек найдётся либо четверо попарно знакомых, либо трое попарно незнакомых.

(43') Среди восьми человек может не найтись ни трёх попарно знакомых, ни четверых попарно незнакомых.

(44) Среди любых 18 человек найдётся либо 4 попарно знакомых, либо 4 попарно незнакомых.

(35) Среди любых 14 человек найдётся либо 5 попарно знакомых, либо 3 попарно незнакомых.

Числом Рамсея $R(m, n)$ называется минимальное из таких целых положительных чисел x , что выполнено любое из следующих эквивалентных условий:

- среди любых x человек найдётся либо m попарно знакомых, либо n попарно незнакомых.
- в любом графе с x вершинами найдётся либо m -клика, либо n -антиклика.
- для любой раскраски рёбер графа K_x в синий и красный цвета найдётся либо синяя m -клика, либо красная n -клика.

Например, очевидно, что $R(1, n) = 1$ и $R(2, n) = n$ для любого n . В задаче 4.1.1 доказано, что $R(3, 3) = 6$, $R(3, 4) = 9$, $R(4, 4) \leq 18$ и $R(3, 5) \leq 14$. Но не очевидно, что такое число существует для любых m, n .

4.1.2. (а) Если числа $R(m - 1, n)$ и $R(m, n - 1)$ существуют, то число $R(m, n)$ существует и $R(m, n) \leq R(m - 1, n) + R(m, n - 1)$. Это утверждение обычно коротко записывают в виде « $R(m, n) \leq R(m - 1, n) + R(m, n - 1)$ ». Далее аналогичные утверждения записываются только в кратком виде.

$$(b) \quad R(m, n) \leq \binom{m+n-2}{m-1}.$$

(c) $R(m, n) \leq R(m-1, n) + R(m, n-1) - 1$, если числа $R(m-1, n)$ и $R(m, n-1)$ чётны.

$$(d) \quad R(5, 5) \leq 62.$$

4.1.3. (a) Если в графе с 13 вершинами нет ни треугольника, ни 5-антиклики, то степень каждой вершины равна 4.

(b) Если в графе с 18 вершинами нет ни треугольника, ни 6-антиклики, то степень каждой вершины равна 5.

(Во избежание порочного круга, при решении этой и других задач не используйте без доказательства ни равенства $R(3, 6) = 18$, ни других фактов, которые не умеете доказывать.)

$$4.1.4. \quad (a) \quad R(4, 4) \geq 18. \quad (b) \quad R(3, 5) \geq 14.$$

$$4.1.5. \quad (a) \quad R(n, n) > (n-1)^2.$$

(b) **Теорема Эрдеша.** $R(n, n) > n2^{(n-3)/2}$, начиная с некоторого n .

(Более точно, теорема Эрдеша утверждает, что $R(n, n) \gtrsim n2^{n/2}/e$. Знак \gtrsim определен в п. 6.1. Доказать эту теорему вы сможете после решения следующих пунктов.)

$$(c) \quad \text{Если } \binom{r}{n} < 2^{\binom{n}{2}-1}, \text{ то } R(n, n) > r.$$

$$(d) \quad \text{Если } \binom{r}{n} < s2^{\binom{n}{2}-1}, \text{ то } R(n, n) > r - s.$$

$$(e) \quad R(n, n) > r - \binom{r}{n}2^{1-\binom{n}{2}} - 1 \text{ для любого } r.$$

4.1.6. В любом турнире с 4^n вершинами можно выбрать вершины A_1, \dots, A_n так, чтобы каждое ребро между ними было направлено от большего номера к меньшему.

4.1.7. При любой раскраске рёбер графа K_n в два цвета в нём найдётся гамильтонов цикл, состоящий из двух одноцветных путей (цвета путей могут быть и одинаковы, и различны).

4.2 Многоцветные числа Рамсея

4.2.1. (a) На плоскости отметили 17 точек и соединили каждые 2 из них цветным отрезком: красным, желтым или зеленым. Тогда

есть одноцветный треугольник.

(b) Придумайте 9 точек на плоскости и раскраску в 3 цвета всех соединяющих их отрезков, для которой нет одноцветного треугольника.

(c) То же, что в п. (b), для 16 точек.

Числом Рамсея $R(m_1, \dots, m_k)$ называется минимальное из таких целых положительных чисел x , что для любой раскраски рёбер графа K_x в k цветов для некоторого i найдётся m_i -клик i -ого цвета (т.е. m_i вершин, попарно соединённых рёбрами цвета i).

Например, очевидно, что $R(1, m, n) = 1$ и $R(2, m, n) = R(m, n)$ для любых m, n . В задаче 4.2.1 доказано, что $R(3, 3, 3) \leq 17, \geq 10$ и ≥ 17 . Но не очевидно, что такое число существует для любых m_1, \dots, m_k .

4.2.2. (a) $R(m, n, p) \leq R(R(m, n), p)$.

(b) $R(m_1, m_2, \dots, m_k) \leq$

$\leq R(m_1 - 1, m_2, \dots, m_k) + R(m_1, m_2 - 1, \dots, m_k) + \dots + R(m_1, m_2, \dots, m_k - 1)$.

(c) Найдите оценку на $R(m_1, m_2, \dots, m_k)$ через полиномиальные коэффициенты.

4.2.3. Если рёбра графа K_{31} раскрашены в синий, белый и красный цвета так, что нет ни синей 4-клики, ни белой 3-клики, ни красной 3-клики, то из каждой вершины выходит 14, 15 или 16 синих рёбер.

4.2.4. Теорема. Для любого целого $m > 0$ существует такое $M > 0$, что для любого простого числа $p > M$ сравнение $x^m + y^m \equiv z^m \pmod{p}$ имеет ненулевое решение. (Доказать эту теорему вы сможете после решения двух следующих задач.)

4.2.5. Сравнение $x^m + y^m \equiv z^m \pmod{p}$ имеет ненулевое решение для (a) $m = 2, p = 89$; (b) $m = 3, p = 89$; (c) $m = 4, p = 83$; (d) $m = 3, p = 97$; (e) $m = 9, p = 97$.

4.2.6. Теорема Шура. Для любой раскраски натурального ряда в конечное число цветов найдётся одноцветное решение уравнения $x + y = z$.

Более точно, для любого целого $k > 0$ существует такое целое $r > 0$, что для любой раскраски первых r натуральных чисел в k цветов найдётся одноцветное решение уравнения $x + y = z$.

4.2.7. (a,b) Найдите нижние оценки на $R(\underbrace{n, \dots, n}_k)$, аналогичные утверждениям 4.1.5.ab.

4.3 Числа Рамсея для гиперграфов

4.3.1. Среди любых четырёх из 8000 студентов имеется слаженная тройка (т. е. тройка, составляющая слаженную команду на олимпиаду по программированию). Докажите, что можно выбрать 5 студентов, любая тройка из которых является слаженной.

4.3.2. (a) Среди любых 5 точек общего положения на плоскости найдётся выпуклый 4-угольник.

(b) Найдётся 8 точек общего положения на плоскости, среди которых нет выпуклого 5-угольника.

(c) Среди любых 9 точек общего положения на плоскости найдётся выпуклый 5-угольник.

(d) **Теорема Эрдеша-Секереша.** Для некоторого n среди любых n точек общего положения на плоскости найдётся выпуклый 10-угольник. (Ср. с задачей 4.4.4.)

Числом Рамсея для гиперграфов $R_l(m_1, \dots, m_k)$, $m_1, \dots, m_k \geq l$, называется минимальное из таких целых положительных чисел x , что для любой раскраски всех l -элементных подмножеств x -элементного множества в k цветов найдутся i и подмножество размера m_i , у которого все l -элементные подмножества покрашены в i -й цвет. («Число Рамсея для гиперграфов» — единый термин, определённый выше; знание термина «гиперграф» не нужно для его понимания.)

Например, очевидно, что $R_2(m_1, \dots, m_k) = R(m_1, \dots, m_k)$ и $R_3(3, n) = n$. В задаче 4.3.1 требуется доказать, что $R_3(5, 4) \leq 8000$. А при решении задачи 4.3.2.d требуется доказать, что $R_3(10, 10)$ или $R_4(5, 10)$ существует.

4.3.3. (a) Число $R_l(m_1, \dots, m_k)$ существует для любых m_1, \dots, m_k . (Это не очевидно!)

- (b) $R_l(m_1, \dots, m_k) \leq R_l(R_l(m_1, m_2), m_3, \dots, m_k)$.
 (c) $R_l(m, n) \leq R_{l-1}(R_l(m-1, n), R_l(m, n-1)) + 1$.

4.3.4. (a) Если $\binom{r}{n} < 2^{\binom{n}{3}-1}$, то $R_3(n, n) > r$.

(b) Найдётся такое число $c > 0$, что $R_3(n, n) \geq 2^{cn^2}$.

(c) Найдите нижние оценки на $R_l(\underbrace{n, \dots, n}_k)$, аналогичные утверждениям 4.1.5.ab (ср. с задачей 4.2.7).

Заметим, что $R_l(\underbrace{n, \dots, n}_{r^{2r}+1}) \geq (l-1)r^{r^{\dots^r}}$ (степенная башня высотой n). Доказательство этого факта выходит за рамки этой книги.

4.4 Результаты рамсеевского типа

4.4.1. Верно ли, что для любой раскраски точек плоскости в два цвета найдётся

- (a) одноцветный равносторонний треугольник со стороной 1 или $\sqrt{3}$?
 (b) одноцветный равносторонний треугольник со стороной 1?
 (c) одноцветный треугольник со сторонами $\sqrt{2}, \sqrt{6}, \pi$?

4.4.2. При любой раскраске точек плоскости в три цвета найдутся две точки одного цвета на расстоянии 1.

4.4.3. (a) Найдётся такое n , что для любой раскраски пространства \mathbb{R}^n (определение см. в §7) в 9 цветов найдётся прямоугольник с одноцветными вершинами и сторонами 1 и 2.

(b) Верно ли, что для любого параллелограмма P с неперпендикулярными сторонами найдётся такое n , что для любой раскраски точек пространства \mathbb{R}^n в 4 цвета найдётся равный P параллелограмм с одноцветными вершинами?

4.4.4. Назовем m -чашкой (m -шапкой) подмножество из m точек графика выпуклой вниз (вверх) функции. Обозначим через $f(k, l)$ минимальное число n , такое что среди любых n точек на плоскости, никакие три из которых не лежат на прямой, есть либо k -чашка,

либо l -шапка. (Не очевидно, что такое число существует. Поэтому о формулах из этой задачи справедливо замечание, аналогичное сделанному в задаче 4.1.2.а.)

(а) Среди любых $f(m, m)$ точек на плоскости найдётся выпуклый m -угольник. (Ср. с задачей 4.3.2.)

(b) $f(k, l) \leq f(k-1, l) + f(k, l-1) - 1$.

(c) $f(k, l) \leq \binom{k+l-4}{k-2} + 1$.

(d) $f(k, l) = \binom{k+l-4}{k-2} + 1$.

4.4.5. (а) При любой раскраске чисел $1, \dots, 9$ в 2 цвета найдётся одноцветная трёхчленная арифметическая прогрессия.

(b) Аналог предыдущего пункта для чисел $1, \dots, 8$ неверен.

(c) Существует такое целое W , что при любой раскраске чисел $1, \dots, W$ в 2 цвета найдётся либо трёхчленная арифметическая прогрессия первого цвета, либо четырёхчленная — второго.

(d) Существует такое целое W , что при любой раскраске чисел $1, \dots, W$ в 3 цвета найдётся одноцветная трёхчленная арифметическая прогрессия.

(e) То же, что в предыдущем пункте, для r цветов.

(f)* **Теорема Ван дер Вардена.** Для любых k, r при любой раскраске натурального ряда в r цветов найдётся одноцветная k -членная арифметическая прогрессия. (Ср. с теоремой Шура 4.2.6.)

4.4.6. (а) Из любых 5 точек на плоскости можно выбрать две такие непересекающиеся пары точек, что отрезок, соединяющий точки в первой паре, пересекает отрезок, соединяющий точки во второй паре.

(а') Для любых 5 точек общего положения на плоскости количество пересечений отрезков, не имеющих общих концов, каждый из которых соединяет данные точки, нечетно.

(Набор точек на плоскости называется набором *общего положения*, если никакие 3 из них не лежат на одной прямой.)

(b) **Теорема Конвея–Гордона–Закса для линейных вложений.** Для любых 6 точек общего положения в пространстве найдутся два зацепленных треугольника с вершинами в этих точ-

как (т.е. таких, что объединение сторон первого пересекает второй двумерный треугольник в единственной точке.)

(Набор точек в пространстве называется набором *общего положения*, если никакие 4 из них не лежат в одной плоскости.)

(с) **Теорема ван Кампена–Флореса для линейных вложений.** Из любых 7 точек в четырехмерном пространстве можно выбрать две такие непересекающиеся тройки точек, что образованные этими тройками двумерные треугольники пересекаются.

Подробнее см. [G].

4.5 Числа Рамсея для подграфов

4.5.1. Для любых графов G и H существует целое положительное число x , для которого при любой раскраске рёбер графа K_x в два цвета найдётся либо подграф первого цвета, изоморфный G , либо подграф второго цвета, изоморфный H .

Наименьшее из таких чисел x обозначается $R(G, H)$.

4.5.2. $R(G, H) \geq (\chi(G) - 1)(c(H) - 1) + 1$, где $\chi(G)$ — хроматическое число графа G , $c(H)$ — число вершин в наибольшей компоненте связности.

4.5.3. Обозначим через T_m дерево на m вершинах.

(a) $R(T_m, K_n) = (m - 1)(n - 1) + 1$.

(b) Если $m - 1$ делит $n - 1$, то $R(T_m, K_{1,n}) = m + n - 1$.

4.5.4. Обозначим через nK_3 граф из n непересекающихся (по вершинам) треугольников.

(a) $R(nK_3, nK_3) \geq 5n$.

(b) Рёбра графа раскрашены в синий и красный цвета. Если в графе есть синий и красный треугольники, то среди их вершин есть пять вершин A, B, O, C, D , для которых треугольник AOB синий, а треугольник COD красный.

(c) $R(nK_3, nK_3) \leq 5n + 1$.

(d)* $R(2K_3, 2K_3) = 10$.

(e)* $R(nK_3, nK_3) = 5n$ для любого $n > 1$.

4.5.5. Найдите $R(K_3, C_n)$, где C_n — цикл с n вершинами (см. п. 2.1).

5 Системы множеств (гиперграфы)

5.1 Пересечения подмножеств

Когда речь идет о множестве подмножеств, употребляют синонимы «система», «семейство» или «набор» подмножеств.

5.1.1. В любом семействе попарно пересекающихся подмножеств n -элементного множества не более 2^{n-1} подмножеств.

5.1.2. Пусть $2 \leq t \leq n - 2$.

(а) Постройте семейство из 2^{n-t} подмножеств n -элементного множества, любые два из которых пересекаются не менее, чем по t элементам.

(б) Существует ли такое семейство из $2^{n-t} + 1$ подмножеств?

5.1.3. *Теорема Эрдеша—Ко—Радо.* Пусть \mathcal{F} — любое семейство k -элементных подмножеств n -элементного множества.

(а) Если $2k \leq n$ и любые два подмножества из \mathcal{F} пересекаются, то $|\mathcal{F}| \leq \binom{n-1}{k-1}$.

(б) Если $2k \geq n$ и объединение никаких двух подмножеств из \mathcal{F} не есть все n -элементное множество, то $|\mathcal{F}| \leq \binom{n-1}{k}$.

(с) Если $n, k \geq t$, то существует $\binom{n-t}{k-t}$ подмножеств n -элементного множества, в каждом из которых ровно k элементов и любые два из которых пересекаются не менее чем по t элементам.

5.1.4. (а) Любое семейство из двадцати 5-элементных подмножеств 15-элементного множества можно так разбить на 6 подсемейств, чтобы любые два непересекающихся подмножества лежали бы в разных подсемействах.

Замечание. В таких ситуациях (см. п. 7.1) обычно вместо разбиении на подсемейства говорят о раскраске в разные цвета. Тогда вопреки наглядному представлению о раскраске красятся множества, но при этом не красятся их элементы.

(б) На кружок пришло 20 школьников. Каждой (неупорядоченной) пятерке из них нужно дать одну из 12 задач по комбинаторике.

(Задачу получает именно пятерка, а не школьник.) Как это сделать, чтобы непересекающиеся пятерки получили разные задачи?

(с) В условиях п. (b) 11 задач недостаточно.

5.1.5. Для $l < k$ обозначим через $M(n, k, l)$ минимальное количество таких k -элементных подмножеств множества \mathcal{R}_n , что любое l -элементное подмножество множества \mathcal{R}_n целиком содержится хотя бы в одном из них. Например, задача 1.5.2.а утверждает, что $M(n, k, l) \geq \binom{n}{l} / \binom{k}{l}$.

(а) Найдите $M(n, k, 1)$.

(b) Найдите $M(6k + 3, 3, 2)$.

(с)* Найдите $M(n, 3, 2)$.

(d) Докажите, что $M(n, k, l) \geq nM(n - 1, k - 1, l - 1)/k$.

5.1.6. Существует k подмножеств R -элементного множества по n элементов в каждом, никакие два из которых имеют не более s общих элементов, для

(а) $k = 2^a = R$, $n = 2^{a-1}$, $s = 2^{a-2}$;

(b) $k = 60$, $R = 1600$, $n = 80$, $s = 4$;

(с) p простое, $k = p^2 + p$, $R = ps^2$, $n = ps$.

Ср. с п. 5.7 и 7.1.

5.2 Системы общих представителей

5.2.1. В группе студентов Яндекса 20 человек. Из них ровно 5 человек — специалисты по поиску в интернете, 5 — по борьбе со спамом и т.д., всего 18 видов проблем (так что, очевидно, некоторые студенты являются специалистами по разным проблемам). Требуется составить из этих студентов сильную команду разработчиков. При этом хочется, чтобы для каждой проблемы в команде нашелся специалист по ней и чтобы размер команды был как можно меньше (для экономии зарплаты).

(а) При любом раскладе получится набрать такую команду из семи человек.

(b) При некотором раскладе не получится набрать такую команду из пяти человек.

Системой общих представителей (сокращённо с.о.п.) для набора \mathcal{M} множеств называется такое множество A , что $M \cap A \neq \emptyset$ для любого $M \in \mathcal{M}$.

5.2.2. Для набора $\{\{1, 6\}, \{1, 2\}, \{2, 3\}, \{3, 4\}, \{4, 5\}, \{5, 6\}\}$ множеств найдите (а) некоторую с.о.п.; (б) с.о.п. наименьшего размера.

5.2.3. (а) Найдите наименьший размер с.о.п. для набора всех k -элементных подмножеств множества \mathcal{R}_n .

(б) Сколько для него имеется с.о.п. наименьшего размера?

Минимальная с.о.п. — с.о.п. наименьшего размера для данного набора \mathcal{M} . Назовем (n, s, k) -набором элемент из $\binom{\mathcal{R}_n}{s}$, т.е. набор k -элементных подмножеств множества \mathcal{R}_n , в котором s множеств. (Этот термин не общепринят.)

5.2.4. (а) Постройте $(2n, 2\binom{n-1}{k-1}, k)$ -набор, для которой минимальная с.о.п. состоит из двух элементов и единственна.

(б) При данных n, k найдите наибольшее s , для которого найдётся (n, s, k) -набор, имеющая ровно две минимальные с.о.п.

5.2.5. *Жадным алгоритмом* называется следующий. Возьмем любой элемент, лежащий в максимальном количестве множеств данного набора. Добавим его в ‘пред-с.о.п’ и выкинем множества, которые его содержат. Аналогично возьмем элемент, лежащий в максимальном количестве оставшихся множеств, и т.д.

Постройте набор множеств, наименьший размер с.о.п. которого на k меньше размера любой из с.о.п., которые могут быть получены жадным алгоритмом, если (а) $k = 1$; (б) $k = 2$; (с) k произвольно.

5.2.6. *

(а) Для любого (n, s, k) -набора найдётся с.о.п. размера меньше

$$G(n, s, k) := \max \left\{ \frac{n}{k}, \frac{n}{k} \ln \frac{sk}{n} \right\} + \frac{n}{k} + 1.$$

(b) Если $n \geq 32k$ и $60 \leq \frac{sk}{n} < e^k$, то найдется (n, s, k) -набор, размер любой с.о.п. которого больше $\frac{n}{64k} \ln \frac{sk}{n}$.

(c) Если

$$k \leq n - l \quad \text{и} \quad G\left(\binom{n}{k}, \binom{n}{l}, \binom{n-l}{k}\right) \leq s,$$

то найдется (n, s, k) -набор, размер любой с.о.п. которого больше l .

(d) Для всех достаточно больших n если $k^2l + kl^2 < n^{1.8}$, то $k < n - l$ и $\binom{n}{k} / \binom{n-l}{k} < 2e^{kl/n}$.

(e) Для всех достаточно больших n и k если $101 \ln \ln k < \ln \frac{sk}{n} < \sqrt{k} < \sqrt[4]{n}$, то найдется (n, s, k) -набор, размер любой с.о.п. которого больше $0,99 \frac{n}{k} \ln \frac{sk}{n}$.

(f) Если

$$l \leq n - k \quad \text{и} \quad \binom{n}{l} \left(\binom{n}{k} - \binom{n-l}{k} \right) < \binom{n}{s},$$

то найдется (n, s, k) -набор, размер любой с.о.п. которого больше l .

5.3 Системы различных представителей

5.3.1. (a) *Лемма о паросочетаниях.* Пусть есть несколько (конечное число) юношей и девушек. Каждый юноша любит некоторое (вполне возможно, нулевое) число девушек. Тогда всех юношей можно женить на любимых ими девушках (так, чтобы брачные пары не пересекались) тогда и только тогда, когда для любого множества юношей число девушек, которых любит хотя бы один из них, не меньше числа этих юношей.

(b) *Теорема Холла.* Пусть S_1, \dots, S_m — конечные множества. В каждом из них можно выбрать по элементу $x_i \in S_i$ так, чтобы все x_i были различны, тогда и только тогда, когда для каждого $k \in \{1, \dots, m\}$ объединение любых k из этих множеств имеет не менее k элементов.

5.3.2. Какое минимальное количество рёбер можно удалить из графа $K_{n,n}$, чтобы не осталось паросочетаний (т. е. подграфа из n непересекающихся отрезков)?

Системой различных представителей (сокращенно с.р.п.) упорядоченного набора (S_1, \dots, S_m) множеств называется упорядоченный набор (x_1, \dots, x_m) их различных элементов, для которого $x_j \in S_j$ при любом $j = 1, \dots, m$.

(Упорядоченность набора важна, чтобы правильно определить с.р.п. набора множеств, некоторые из которых совпадают, а также для подсчёта количества с.р.п. в задаче 5.3.5.)

Например, теорема Холла утверждает, что у набора (S_1, \dots, S_m) конечных множеств есть система различных представителей тогда и только тогда, когда $|\cup_{i \in I} S_i| \geq |I|$ для любого $I \subset \{1, \dots, m\}$.

5.3.3. Пусть для системы m -элементных множеств каждый элемент, входящий хотя бы в одно из них, входит ровно в l из них. Тогда при $m \geq l$ у этой системы множеств есть с.р.п.

5.3.4. С.р.п. поднабора можно дополнить до с.р.п. всего набора. Вот более подробная формулировка. Из набора \mathcal{M} множеств выбрано несколько подмножеств S_1, \dots, S_k . Допустим, что элементы x_1, \dots, x_k — это с.р.п. набора множеств $S_1, \dots, S_k \in \mathcal{M}$. Если у всего набора \mathcal{M} есть с.р.п., то существует его с.р.п., содержащая элементы x_1, \dots, x_k .

5.3.5. Обозначим через $F(S_1, \dots, S_m)$ количество с.р.п. у системы $\{S_1, \dots, S_m\}$.

(а) Для любого ли k существует система S_1, \dots, S_m такая, что $F(S_1, \dots, S_m) = k$?

(б) Найдите все возможные значения $F(S_1, S_2)$ при условии $|S_1| = |S_2| = 5$.

(с)* Найдите все возможные значения $F(S_1, S_2, S_3)$ при условии $|S_1| = |S_2| = |S_3| = 5$.

5.3.6. Пусть даны два разбиения множества S на m подмножеств: $S = \bigcup_{i=1}^m A_i = \bigcup_{i=1}^m B_i$, $m \leq |S|$. Пусть выполнено одно из следующих условий.

- (а) Для любого подмножества $\{i_1, \dots, i_k\} \subset \{1, \dots, m\}$ множество $A_{i_1} \cup \dots \cup A_{i_k}$ содержит не более k из множеств B_1, \dots, B_m .
- (б) $|A_1| = \dots = |A_m| = |B_1| = \dots = |B_m|$.

Тогда можно перенумеровать множества A_1, \dots, A_m так, чтобы после перенумерации $A_i \cap B_i \neq \emptyset$ для любого $i = 1, \dots, m$.

5.3.7.* Пусть даны два разбиения множества S на m подмножеств: $S = \bigcup_{i=1}^m A_i = \bigcup_{i=1}^m B_i$, $m \leq |S|$. Пусть для любых подмножеств $I, J \subset \{1, \dots, m\}$ выполнено неравенство:

$$\left| \left(\bigcup_{i \in I} A_i \right) \cap \left(\bigcup_{j \in J} B_j \right) \right| \geq |I| + |J| - m.$$

Тогда можно перенумеровать множества A_1, \dots, A_m так, чтобы после перенумерации нашлись попарно различные элементы $x_i \in A_i \cap B_i$, $i = 1, \dots, m$.

Такой набор x_1, \dots, x_m называются *общей системой различных представителей* наборов множеств A_1, \dots, A_m и B_1, \dots, B_m .

5.3.8. (а) При каком условии на любовь юношей и девушек можно распределить всех девушек по непересекающимся гаремам, в каждом из которых ровно по две жены?

Или, формально, найдите необходимое и достаточное условие на двудольный граф, при котором вершины можно занумеровать A_1, \dots, A_n (в первой доле) и $B_1, C_1, \dots, B_n, C_n$ (во второй доле) так, что есть рёбра $A_1 B_1, A_1 C_1, \dots, A_n B_n, A_n C_n$.

(б) Пусть есть m юношей и несколько девушек, каждый юноша любит не менее t девушек, причем всех юношей можно женить на любимых ими девушках (так, чтобы брачные пары не пересекались), т. е. есть паросочетание. Тогда имеется не менее

$$\begin{cases} t!, & t \leq m \\ t!/(t-m)!, & t > m \end{cases}$$

способов переженить юношей на любимых ими девушках.

5.4 Перманент

Перманент квадратной матрицы $A = (a_{ij})$ размера $n \times n$ определяется формулой

$$\text{Per}(A) := \sum_{\sigma \in \Sigma_n} \prod_{i=1}^n a_{i, \sigma(i)},$$

где Σ_n есть множество всех перестановок n -элементного множества.

5.4.1. Найдите перманент матрицы

$$(2) \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix};$$

(k) 4×4 , у которой $k = 0, 1, 2, 3, 4$ диагональных элементов — нули, а все остальные (в т.ч. не диагональные) элементы — единицы;

(n) $n \times n$, у которой на диагонали нули, а вне диагонали — единицы.

Подматрицей данной матрицы называется матрица, полученная из данной вычеркиванием некоторого количества строк и столбцов. *Перманент* прямоугольной матрицы A определяется как сумма перманентов всех квадратных подматриц максимального размера. Или, формулой, при $m < n$

$$\text{Per}(A) := \sum_{\sigma} \prod_{i=1}^m a_{i, \sigma(i)},$$

где сумма берётся по всем m -элементным размещениям чисел от 1 до n . При $m > n$ положим $\text{Per}(A) := \text{Per}(A^T)$.

5.4.2. Найдите перманент матрицы $m \times n$, состоящей из одних единиц.

5.4.3. (а) Перманент не меняется при перестановке строк.

(б) *Формула разложения по строке.* Если $m \leq n$, то для любого i

$$\text{Per}(A) = \sum_{j=1}^n a_{ij} \text{Per}(A_{ij}),$$

где A_{ij} — матрица, получаемая из исходной вычеркиванием i -ой строки и j -ого столбца.

5.4.4. (а) Перманент матрицы $n \times n$ из нулей и единиц равен нулю тогда и только тогда, когда есть нулевая подматрица $s \times t$, где $s + t = n + 1$.

(б) Для любых $m \leq n$ перманент прямоугольной матрицы $m \times n$ из нулей и единиц равен количеству с.р.п. (§5.3) для системы из m подмножеств множества $\{1, \dots, n\}$, определяемых строками.

5.5 Размерность Вапника-Червоненкиса

5.5.1. (а) Математики Вася и Чарли играют. Сначала Чарли отмечает на плоскости k точек. Затем Вася красит некоторые из этих точек. Если теперь Чарли сможет провести прямую, отделяющую покрашенные точки от непокрашенных, то он выиграл, иначе — проиграл. При каком наибольшем k Чарли может выиграть независимо от действий Васи?

(б) То же, но точки отмечаются в пространстве, и Чарли проводит полуплоскость.

Пусть $\mathcal{R} \subset 2^X$ — семейство подмножеств произвольного множества X . *Размерностью Вапника-Червоненкиса* $VC(X, \mathcal{R})$ (или VC -размерностью) пары (X, \mathcal{R}) называется максимальное n такое, что существует n -элементное подмножество $A \subset X$, для которого любое подмножество в A является пересечением A и некоторого подмножества из \mathcal{R} . Такое подмножество A называется *дробящимся* системой \mathcal{R} . Если такого n не существует, то полагают $VC(X, \mathcal{R}) := \infty$.

Естественные примеры, в том числе пример с бесконечностью, приведены в следующих задачах.

5.5.2. (а) Найдите VC -размерность семейства всех (двумерных замкнутых) прямоугольников на плоскости со сторонами, параллельными осям координат.

(б) *Теорема.* VC -размерность семейства всех полупространств в \mathbb{R}^n равна $n + 1$.

(с) *Теорема Радона.* Любые $n + 2$ точки в \mathbb{R}^n можно разбить на два множества, выпуклые оболочки которых пересекаются.

5.5.3. Найдите VC -размерность следующих семейств множеств:

(а) $\{\{1, \dots, k\} \mid k \in \mathbb{N}\}$;

- (b) $\{\{k, k+1, k+2, \dots\} \mid k \in \mathbb{N}\}$;
 (c) $\{\{k, 2k, 3k, \dots\} \mid k \in \mathbb{N}\}$;
 (d) $\{\{k, k^2, k^3, \dots\} \mid k \in \mathbb{N}\}$;

5.5.4. Найдите VC-размерность следующих конечных семейств:

- (a) $\{1, 2, 3\}, \{4, 5, 6\}, \{1, 2, 4\}, \{1, 2, 5\}, \{2, 3, 6\}, \{3, 4, 5\}, \{3, 4, 6\}, \{2, 4, 5, 6\}$.
 (b) $\{1, 2, 3\}, \{3, 4, 5\}, \{1, 2, 4\}, \{1, 2, 5\}, \{2, 4, 5\}, \{2, 3, 5\}, \{2, 6, 7\}, \{3, 4, 6, 7\}$.
 (c) $\{1, 2, 3\}, \{4, 5, 6\}, \{7, 8, 9\}, \{1, 4, 7\}, \{2, 5, 8\}, \{3, 6, 9\}, \{1, 6, 9\}$.
 (d) Можно ли добавить ещё одно множество к системам из предыдущих пунктов так, чтобы VC-размерность увеличилась на 1?

5.5.5. (a) Возможно ли равенство $VC(\mathbb{R}^2, \mathcal{R}) = \infty$ для некоторого набора $\mathcal{R} \subset 2^{\mathbb{R}^2}$?

(b) То же для некоторого счётного набора $\mathcal{R} \subset 2^{\mathbb{R}^2}$ ограниченных множеств.

5.5.6. В любом семействе VC-размерности d , в каждом множестве которого не более r элементов, найдутся такие подмножества X и Y , что (a) $|X \cap Y| \leq r - d$; (b) $|X \cap Y| \geq d - 1$.

5.5.7. Если $\mathcal{R} \subset 2^{\mathcal{R}_n}$ и $|\mathcal{R}| = n$, то для любого $k = 1, 2, \dots, n$ найдётся такое множество A , что $|\{R \cap A \mid R \in \mathcal{R}\}| \geq k = |A| + 1$.

5.5.8. Если $\mathcal{R} \subset 2^{\mathcal{R}_n}$ — семейство VC-размерности d , то существует наследственное (т. е. содержащее с каждым множеством все его подмножества) семейство $\mathcal{R}' \subset 2^{\mathcal{R}_n}$ VC-размерности d , для которого (a) $|\mathcal{R}'| \leq |\mathcal{R}|$; (b) $|\mathcal{R}'| \geq |\mathcal{R}|$.

5.5.9. Если $\mathcal{R} \subset 2^{\mathcal{R}_n}$, то

$$|\mathcal{R}| \leq \binom{n}{0} + \binom{n}{1} + \binom{n}{2} + \dots + \binom{n}{VC(\mathcal{R}_n, \mathcal{R})}.$$

5.6 Подсолнухи

Подсолнухом с k лепестками и ядром Y называют такой набор множеств $\{F_1, \dots, F_k\}$, что $F_i \cap F_j = Y$ при $i \neq j$ и все множества $F_i \setminus Y$ непусты. Например,

- попарно непересекающиеся множества образуют подсолнух с пустым ядром.

5.7 Лемма Виссера и теоремы о возвращении

5.7.1. В парламенте из 100 000 депутатов образовано k комиссий по 2 000 человек в каждой.

(a) Если $k \geq 100$, то какие-то две комиссии имеют хотя бы 21 общего члена.

(b) Если $k \geq 5\,000$, то какие-то две комиссии имеют хотя бы 29 общих членов.

(c) Если $k \geq 250\,000$, то какие-то две комиссии имеют хотя бы 32 общих члена.

(d) Если $k \geq 2 \cdot 50^{30}$, то какие-то две комиссии имеют хотя бы 40 общих членов.

Подмножество отрезка $[0, 1]$ называется *хорошим*, если оно является объединением конечного числа непересекающихся интервалов. *Длиной* $|E|$ хорошего множества E называется сумма длин его интервалов.

5.7.2. (a) Пересечение и объединение хороших множеств — хорошее множество.

(b) Если E_1, \dots, E_k — попарно непересекающиеся хорошие множества длины $1/k$ каждое и E_0 — хорошее множество длины $1/k$, то $|E_0 \cap E_j| \geq 1/n^2$ для некоторого $j \geq 1$.

(c) Придумайте пример бесконечного семейства хороших множеств длины $1/2$ каждое, длина пересечения любых двух из которых не превосходит $1/4$.

(d) То же для длины $1/n$ и длины пересечения не более $1/n^2$.

5.7.3. (a) Если дана бесконечная последовательность хороших множества длины t каждое, то длина пересечения некоторых двух из них не меньше $t^2/2$.

(b) *Лемма Виссера.* То же для $0,99t^2$.

(Задача 5.7.2 поясняет роль множителей $0,99$ и t^2 .)

Пусть заданы числа $0 = \alpha_0 < \dots < \alpha_{k-1} < \alpha_k = 1$. *Перекладыванием отрезков* называется отображение $f: [0, 1) \rightarrow [0, 1)$, определенное некоторой перестановкой отрезков $[\alpha_{i-1}, \alpha_i)$. Более аккуратно, возьмем перестановку $\sigma: [k] \rightarrow [k]$. Для любых $j \leq k$ и $x \in [\alpha_{j-1}, \alpha_j)$ определим $f(x) := x + \sum_{i < \sigma(j)} (\alpha_i - \alpha_{i-1})$.

Через f^n обозначим n -ю итерацию отображения $f: [0, 1) \rightarrow [0, 1)$: $f^n = f \circ f \circ \dots \circ f$ (n раз).

5.7.4. (а) (Загадка) Найдите n -ю итерацию нетривиального перекладывания двух отрезков, если дано α_1 .

(b) Если длины всех отрезков рациональны, то некоторая итерация перекладывания отрезков — тождественное отображение.

(c) Придумайте перекладывание отрезков, один из которых имеет иррациональную длину, причем квадрат перекладывания — тождественное отображение.

(d) Придумайте перекладывание отрезков, никакая итерация которого не является тождественным отображением.

(e)* Придумайте перекладывание отрезков, ни для какой итерации g которого нет ни собственных подотрезков, переходящих при g в себя, ни такого a , что $g(x) = \{x + a\}$ при любом $x \in [0, 1)$.

5.7.5. Пусть $E \subset [0, 1)$ — хорошее непустое множество и f — перекладывание отрезков.

(а) Множество $f(E)$ хорошее.

(b) *Теорема Пуанкаре-Каратеодори о возвращении множеств.* Существует сколь угодно большое n , для которого $|E \cap f^n(E)| > 0$.

(b') Такое n найдется на любом достаточно большом интервале (т.е. существует такое L , что для любого целого M число n из п.

(а) найдется среди чисел $M, M + 1, \dots, M + L$).

(c) *Теорема Хинчина о возвращении множеств.* Существует сколь угодно большое n , для которого $|E \cap f^n(E)| \geq 0,99|E|^2$.

(c') Такое n найдется на любом достаточно большом интервале.

5.7.6. Назовем *хорошим* объединение конечного количества многоугольников (лежащих на одной плоскости) без границы с непересекающимися внутренностями. Сформулируйте и докажите аналоги

(а) леммы Виссера; (b) теоремы Пуанкаре-Каратеодори;

(c) теоремы Хинчина

для взаимно-однозначного отображения единичного квадрата в себя, сохраняющего хорошие подмножества и их площади (например, для *преобразования пекаря*).

Ср. с п. 5.1 и 7.1.

5.8 Структуры на конечном множестве

Ранее рассмотрены некоторые классические комбинаторные задачи 1.1.1, 1.1.2, 1.1.4, 1.4.3.b, 1.4.4, 1.4.5, 1.4.6, 1.4.7.efg. В этом пункте мы поясним связь между различными объектами, возникающими в этих задачах.

Алгеброй на множестве $[n]$ называется семейство его подмножеств, которое вместе с любыми подмножествами A и B содержит также их объединение $A \cup B$, пересечение $A \cap B$ и дополнение $\bar{A} := [n] - A$.

Например, $2^{[n]}$ — алгебра на $[n]$, а $\{\emptyset, [3]\}$ и $\{\emptyset, \{1\}, \{2, 3\}, [3]\}$ — алгебры на $[3]$.

5.8.1. (a) Найдите все алгебры на $[n]$ для $n = 1, 2, 3$.

(b) Количество элементов произвольной алгебры есть степень двойки.

(c) Количество алгебр на $[n]$ равно количеству разбиений множества $[n]$. (*Разбиением* (неупорядоченным) множества $[n]$ называется неупорядоченный набор $\{X_1, X_2, \dots, X_k\}$ подмножеств $X_i \subset [n]$, для которого $[n] = X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_k$ и $X_i \cap X_j = \emptyset$ при любых $i \neq j$.)

(d) (Загадка) Найдите рекуррентную формулу для числа $N_A(n)$ всех алгебр на $[n]$ (числа Белла).

Базисом алгебры называется наименьшее (по включению) её подсемейство $\{X_1, \dots, X_k\}$ такое, что любой элемент алгебры можно выразить через $X_1 \dots X_k$ с помощью операций пересечения, объединения и дополнения. Задача 1.4.2.a равносильна нахождению наименьшего числа множеств в базисе алгебры $2^{[n]}$.

5.8.2. Существует алгебра и два ее базиса, в которых разное число множеств.

Линейным пространством на множестве $[n]$ называется семейство его подмножеств, которое вместе с любыми подмножествами A и B содержит также их симметрическую разность $A \oplus B$. Например, любая алгебра является линейным пространством;

$\{\emptyset\}$, $\{\emptyset, \{1, 2\}\}$, $\{\emptyset, \{1\}, \{2\}, \{1, 2\}\}$ и $\{\emptyset, \{1, 3\}, \{2, 3\}, \{1, 2\}\}$

— линейные пространства на $[3]$. Определение *базиса* линейного пространства аналогично случаю алгебр. Линейные пространства изучаются в задачах 1.4.4, 1.4.6, 1.4.7.efg и 6.1.12.a (на другом языке).

Топологией на множестве $[n]$ называется семейство его подмножеств, которое содержит \emptyset , $[n]$ и вместе с любыми подмножествами A и B содержит также $A \cap B$, $A \cup B$. Например, любая алгебра является топологией;

$$\{\emptyset, \{1\}, [3]\} \quad \text{и} \quad \{\emptyset, \{1\}, \{2\}, \{1, 2\}, \{1, 3\}, [3]\}$$

— топологии на $[3]$.

5.8.3. (a) Найдите все топологии на $[1]$, на $[2]$ и на $[3]$.

(b) Любая ли топология является линейным пространством? Можно ли симметрическую разность выразить через пересечение и объединение?

Решение задачи 5.8.3.a показывает, что существует топология, число подмножеств в которой не является степенью двойки. Найти количество топологий на $[n]$ — нерешенная задача.

Определение *базиса* топологии аналогично случаю алгебр.

5.8.4. (a) Найдите наименьшее число множеств в базисе топологии $2^{[n]}$.

(b) Для каждого n найдите наибольший (по все топологиям на $[n]$) минимальный размер базиса топологии.

5.8.5. *Цепью топологий* называется последовательность различных топологий

$$\{\emptyset, [n]\} = T_0 \subset T_1 \subset T_2 \dots \subset T_k = 2^{[n]},$$

между любыми двумя соседними членами которой нельзя вставить ещё одну топологию (т.е. для любого i не существует топологии T , для которой $T_i \subsetneq T \subsetneq T_{i+1}$). Аналогично определяются *цепи* алгебр и линейных пространств.

(a) Все цепи алгебр (линейных пространств) на $[n]$ имеют одинаковую длину (какую?).

(b) Приведите пример цепей топологий различной длины.

(c)* Найдите наибольшую длину цепи топологий на $[n]$.

(d) Найдите наименьшую длину цепи топологий на $[n]$.

5.8.6. (а) Найдите максимальное количество линейных пространств на $[n]$, ни одно из которых не содержится (собственно) в другом.

(Это число называется *шириной* $W_L(n)$ семейства всех линейных пространств на $[n]$.)

(b)* $W_L(2n) \sim C \cdot 2^{n^2}$ для некоторого числа C .

(с) Найдите максимальное количество алгебр на $[n]$, ни одна из которых не содержится в другой.

По-видимому, найти максимальное количество топологий на $[n]$, ни одна из которых не содержится в другой — нерешенная задача.

Нарисуем все алгебры (на $[n]$ — эти слова мы дальше опускаем). Проведем стрелку от алгебры A к алгебре B , если $A \subsetneq B$ и между ними нельзя вставить никакую другую алгебру. Полученный граф называют *решёткой алгебр*.

Разбиение $H = H_0 \sqcup H_1 \sqcup \dots \sqcup H_m$ множества всех алгебр называется *разбиением на этажи*, если для любых двух соединенных стрелкой алгебр $A \subset B$ номер этажа алгебры A на единицу меньше номера этажа алгебры B . Ясно, что решётка алгебр допускает разбиение на этажи. (Какие алгебры находятся на k -м этаже?)

Аналогично случаю алгебр вводятся понятия *решётки линейных пространств* и ее *разбиения на этажи*. Ясно, что решётка линейных пространств допускает разбиение на этажи. (Какие линейные пространства находятся на k -м этаже?)

Аналогично случаю алгебр вводятся понятия *решётки топологий* и ее *разбиения на этажи*. Но решётка топологий не допускает разбиения на этажи.

Базой на множестве $[n]$ называется семейство его подмножеств, которое содержит $[n]$ и вместе с любыми подмножествами A и B содержит также $A \cap B$. Примеры баз: любая топология; $\{\{1, 2\}, \{2, 3\}, \{2\}, [4]\}$ — база на $[4]$. См. задачу 1.4.5 о наименьшем базисе базы $2^{[n]}$.

Вообще, *структурой* на множестве $[n]$, соответствующей заданному набору операций, называется семейство его подмножеств, замкнутое относительно этого набора операций. Например, если заданный набор операций пуст, то любое подмножество в $2^{[n]}$ является соответствующей структурой. Определение *базиса* структуры аналогично случаю алгебр. Попробуйте решить для других наборов операций аналоги приведенных выше задач. Полный список

(b) Берём набор из $(k - 1)^s$ множеств, построенный в решении задачи 5.6.2.b. Для него элементы множества A_1 образуют с.о.п. Значит, размер минимальной с.о.п. не больше $k - 1$.

5.7.1. Решение. (a) Пусть любые две комиссии имеют не более 20 общих членов. Дадим по конфете каждому участнику первой комиссии. Конфеты получают 2000 человек. Дадим по конфете каждому участнику второй, но первой, комиссии. Конфеты получают не менее 1980 человек. Дадим по конфете каждому участнику третьей, но не первой и ни второй, комиссий. Конфеты получают не менее 1960 человек. И так далее. Каждый парламентарий получит не более одной конфеты. В итоге количество парламентариев не меньше количества конфет, т.е. числа $100 \cdot 2000 - (100 \cdot 99/2) \cdot 20 = 101\,000 > 100\,000$. Противоречие.

Это же решение можно изложить так. Пусть любые две комиссии имеют не более 20 общих членов. Тогда число всех парламентариев не меньше $100 \cdot 2000 - (100 \cdot 99/2) \cdot 20 = 101\,000 > 100\,000$ (это неравенство Бонферрони 1.2.3.c, т.е. версия формулы включений-исключений). Полученное противоречие доказывает нужное утверждение.

(b) Примените рассуждение из п. (a) к декартову квадрату парламента, т.е. парламентом будет множество пар депутатов, а комиссиями множество пар депутатов из одной комиссии.

(c) То же для декартова куба.

(d) Найдите N такое, что $\frac{40}{\sqrt[N]{2}} > 39$.

5.7.1. Идея другого решения: использовать версию теоремы Турана 2.7.2.d для $s = 2$ и двудольного графа, в одной доле которого — парламентарии, а в другой — комиссии. Ср. [VS97].

5.7.2. (b) В противном случае

$$1 \geq |E_0 \cup E_1 \cup \dots \cup E_k| \geq \sum_{j=0}^k |E_j| - \sum_{0 \leq i < j \leq k} |E_i \cap E_j| > 1 + \frac{1}{k} - \frac{k}{k^2} = 1.$$

Противоречие.

(с) В j -е множество запишем все числа, в двоичной записи которых на j -м месте стоит 0.

5.7.3. Аналогично задаче 5.7.1.

5.7.5. Перекладывание отрезков сохраняет хорошие подмножества и их длины.

Перекладывание отрезков является взаимно-однозначным соответствием. Итерация f^n с $n < 0$ определена для взаимно-однозначных соответствий f : $f^n = f^{-1} \circ f^{-1} \circ \dots \circ f^{-1}$ ($|n|$ раз).

(d) При написании этого решения использован текст А. Пахарева. Пусть, напротив, существуют сколь угодно большие интервалы из целых чисел n , для которых $|E \cap f^n(E)| < 0.99|E|^2$. Назовем такие n и интервалы *плохими*. Обозначим через l_1 середину одного из плохих интервалов четной длины. Далее, обозначим через l_2 — середину плохого интервала четной длины, большей $|2l_1|$, и т.д. Тогда при любых $n > m$ число $l_n - l_m$ содержится в плохом интервале с серединой l_n , поэтому оно плохое. Значит, $|f^{l_n}(E) \cap f^{l_m}(E)| < 0,99|E|^2$ для любых целых $n, m > 0$. Это противоречит лемме Виссера 5.7.3.b.

5.8.1. (с) Разбиению $[n] = X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_k$ поставьте в соответствие семейство всех множеств, полученных объединением некоторых из X_1, \dots, X_k . Получится взаимно-однозначное соответствие между алгебрами на $[n]$ и разбиениями множества $[n]$.

(b) Следует из (с).

5.8.2. Рассмотрите алгебру $2^{[4]}$ и два базиса, один из множеств $\{1, 2\}$ и $\{1, 3\}$, другой из множеств $\{1\}, \{2\}, \{3\}$.

5.8.5. Ответы: (a) $n + 1$; (с) $2n + 2$; (d) $2^n + 1$.

6.2 Независимость и доказательства существования

Введение

Цель этого раздела — продемонстрировать метод доказательства некоторых интересных комбинаторных результатов (пункты (b) задач 6.2.1-6.2.4 и задачи 6.2.18-6.2.28), заключающийся в применении локальной леммы Ловаса 6.2.15.

Следующие две части введения важны, но формально не используются далее.

Об открытии леммы Ловаса и ее роли в математике. Локальная лемма Ловаса была доказана в 1973 году выдающимся венгерским математиком Ласло Ловасом. Впрочем, тогда Ловасу было всего 25 лет и, хотя яркие результаты у него уже к тому времени были, все-таки на тот момент его воспринимали не как классика, но как восходящую звезду. Он уже был трехкратным победителем международных математических олимпиад (1964, 1965 и 1966 годов). Классиком Ловас станет позже, и весьма серьезную роль в этом сыграет доказанная им Локальная лемма. Разумеется, не только она: будет и топологический метод в комбинаторике, и мощные результаты в теории алгоритмов, и значительный вклад в науку о графовых пределах, и многое другое. Тем не менее, Локальная лемма — это замечательный инструмент вероятностной комбинаторики, благодаря которому были получены и продолжают получаться многочисленные яркие результаты в области дискретной математики и теории алгоритмов.

Работа, в которой Ловас формулирует и доказывает свою Локальную лемму, написана в соавторстве с Полом Эрдешем — еще одним великим специалистом по комбинаторике, основателем большой научной школы, автором множества задач и идей. Среди прочего, Эрдеш был одним из самых активных пропагандистов вероятностного метода в комбинаторике. Поэтому, несмотря на то, что Локальную лемму доказал именно Ловас, роль Эрдеша во всем этом не стоит недооценивать. В статье Эрдеша и Ловаса [EL] речь шла о раскрасках *гиперграфов* (т.е. наборов подмножеств конечного множества). Как раз ради доказательства существования некоторой раскраски Локальная лемма и придумывалась (т.е. ради обобще-

ния задач 6.2.1, 6.2.18 и 6.2.19; не бойтесь, они формулируются и решаются без слова ‘гиперграф’). Однако очень быстро стало ясно, насколько это мощный и плодотворный инструмент. Например, почти сразу же с его помощью Дж. Спенсер улучшил нижнюю оценку числа Рамсея (см. определение в п. 4.1 и задачу 6.2.23), которая не поддавалась улучшению в течение сорока лет. Сейчас диапазон применения леммы становится все шире. Здесь теория графов и гиперграфов, здесь экстремальные задачи комбинаторики, теория алгоритмов и даже комбинаторная геометрия и теория диофантовых приближений.

За прошедшие десятилетия появились разнообразные усовершенствования Локальной леммы, многие из которых уже лишь отдаленно напоминают первоначальный вариант. И это еще одно свидетельство исключительной плодотворности идеи Ловаса.

Как устроено изложение в этом разделе. Основные идеи представлены на «олимпиадных» примерах: на простейших частных случаях, свободных от технических деталей, и со сведением научного языка к необходимому минимуму. Мы показываем, *как можно придумать* лемму Ловаса. Путь к ее доказательству и применениям намечен в виде задач (всех задач этого и следующего разделов, кроме задач 6.2.6 и 6.2.7, которые просто поясняют понятие независимости). Обучение путем решения задач не только характерно для серьезного изучения математики, но и продолжает древнюю культурную традицию.⁶ К важнейшим задачам приводятся указания и решения.

Обычно лемму Ловаса излагают на вероятностном языке. Однако, по нашему мнению, приводимое комбинаторное изложение более доступно и полезно для начинающего. Действительно, излагать вероятностные идеи (например, независимости) и развивать вероятностную интуицию, но при этом сохранять строгость изложения, разумнее, не вводя понятия вероятностного пространства, а на комбинаторном языке, ср. п. 1.5.⁷ Это как раз подготовит на-

⁶Например, послушники дзенских монастырей обучаются, размышляя над загадками, данными им наставниками. Впрочем, эти загадки являются скорее парадоксами, а не задачами. См. подробнее [S].

⁷Отличие элементарной теории вероятностей от перечислительной комби-

чинающего к введению этого довольно абстрактного понятия, ср. с [ZSS, философски-методическое отступление]. Кроме того, вероятностной интуиции начинающего противоречит получение вероятностными методами абсолютно (а не с некоторой вероятностью) верного результата.⁸ (Впрочем, для человека, уже владеющего понятием вероятностного пространства, изложение на вероятностном языке не хуже комбинаторного.)

Приведем интересные факты, которые можно доказать при помощи леммы Ловаса и вряд ли можно доказать без нее! Видимо, из задач 6.2.1-6.2.4 вы сможете решить сейчас только пункты (а). К пунктам (b) разумно вернуться после изучения следующего раздела. Более того, задача 6.2.2.b естественнее по формулировке, но сложнее двух следующих.

6.2.1. (а) По каждому из 100 видов работ в фирме имеется ровно 8 специалистов. Каждому сотруднику нужно дать выходной в субботу или в воскресенье. Докажите, что это можно сделать так, чтобы и в субботу, и в воскресенье для каждого вида работ присутствовал специалист по нему. (Сотрудник может быть специалистом по нескольким видам работ; распределение специалистов по видам работ известно тому, кто назначает выходные. Это задача 1.5.7.)

(b) По каждому из нескольких видов работ в фирме имеется ровно 8 специалистов. (Теперь видов работ не обязательно 100.) Каждый вид работ имеет общих специалистов не более чем с 30 другими видами. Каждому сотруднику нужно дать выходной в субботу или в воскресенье. Докажите, что это можно сделать так, чтобы и в субботу, и в воскресенье для каждого вида работ присутствовал специалист по нему.

Замечание. Для каждого вида работ x обозначим через A_x множество распределений выходных, при которых и в субботу, и в воскресенье на работе есть специалист по x . Нужно доказать, что

наторики скорее в том, что речь идет о *долях* вместо чисел, и интерес часто представляют *оценки*, а не равенства.

⁸Объяснять, как с помощью вероятностных методов можно получить абсолютно верный результат, лучше на более простых примерах. См., например, задачи 6.2.5, 6.2.12, 6.2.16 и 6.3.3.ab. Мы хотели бы сделать этот текст доступным даже для тех, кто не разобрал таких примеров.

$\bigcap_x A_x \neq \emptyset$. В п. (а) это делается путем подсчета количества элементов. В п. (b) этого уже не хватает, нужна идея из следующего раздела. Там мы покажем, как *независимость* (определенную там) можно применять для оценки количества элементов в пересечении множеств.

Описанную идею можно сформулировать так. Нужное условие мы представляем в виде пересечения некоторого числа условий. При этом ясно, что для каждого из них есть конструкция, ему удовлетворяющая. Иногда отсюда можно вывести, что есть конструкция, удовлетворяющая всем этим условиям одновременно! Эта идея часто применяется в математике. (Для читателя, знакомого с соответствующими понятиями, напомним, что в анализе так доказывалось существование решения дифференциального уравнения, в топологии — вложимость n -мерного компакта в \mathbb{R}^{2n+1} , ср. [S6, §2].) Число условий может быть бесконечно, поэтому идея пересечения ‘равносильна’ идее итерационного процесса. А в настоящей заметке мы покажем, как применять эту идею в комбинаторике. Несмотря на конечность числа условий, ее применение весьма нетривиально.

6.2.2. (а) По кругу стоит 200 студентов из 10 групп, в каждой из которых 20 студентов. Докажите, что можно в каждой группе выбрать старосту так, чтобы никакие два старосты не стояли рядом.

(b) То же для 1600 студентов из 100 групп, в каждой из которых 16 студентов.

6.2.3. (а) Докажите, что можно раскрасить первые 8 натуральных чисел в 2 цвета так, чтобы не было одноцветной арифметической прогрессии длины 3. (Это задача 4.4.5.b.)

(b) Докажите, что можно раскрасить первые 15 миллионов натуральных чисел в 2 цвета так, чтобы не было одноцветной арифметической прогрессии длины 32.

6.2.4. (а) Докажите, что для любого $M \in \mathbb{R}$ можно раскрасить все вещественные числа в 2 цвета так, чтобы для любого $x \in \mathbb{R}$ числа x и $x + M$ были не одного цвета.

(b) Докажите, что для любых 25 чисел $M_1, \dots, M_{25} \in \mathbb{R}$ и конечного множества $X \subset \mathbb{R}$ можно раскрасить все вещественные числа

в 3 цвета так, чтобы для любого $x \in X$ среди чисел $x, x + M_1, \dots, x + M_{25}$ были числа каждого из трех цветов.

(с) Докажите, что для любых 25 чисел $M_1, \dots, M_{25} \in \mathbb{R}$ можно раскрасить все вещественные числа в 3 цвета так, чтобы для любого $x \in \mathbb{R}$ среди чисел $x, x + M_1, \dots, x + M_{25}$ были числа каждого из трех цветов.

Решения пунктов (b) вышеприведенных задач основаны на идее, аналогичной решению задачи 6.2.1.b.

Для удобства читателя этот раздел структурирован более тонко, чем остальные. В частности, некоторые указания и решения приведены прямо в нем (а не в конце параграфа).

Независимость

В этом разделе мы введем и обсудим понятие независимости. Оно и важно само по себе, и необходимо для леммы Ловаса 6.2.15 (почему она интересна, написано в предыдущем разделе). Впрочем, формально, далее из этого раздела используются только утверждения 6.2.8 и 6.2.11.

6.2.5. Каждый житель города либо здоров, либо болен, а также либо богат, либо беден. Богатство и здоровье *независимы*, т.е. доля богатых здоровых среди богатых равна доле здоровых среди всех жителей. Известно, что есть богатый горожанин и есть здоровый горожанин. Обязательно ли найдется богатый здоровый горожанин?

Подмножества A и B конечного множества M называются *независимыми*, если

$$|A \cap B| \cdot |M| = |A| \cdot |B|.$$

При $B \neq \emptyset$ это равносильно тому, что доля множества $A \cap B$ в B равна доле множества A в M .

6.2.6. Зависимы ли следующие подмножества? (Мы называем *зависимыми* подмножества, не являющиеся независимыми.)

(а) В множестве всех клеток шахматной доски подмножество клеток в первых трех ее строках и подмножество клеток в последних четырех ее столбцах.

- (b) Подмножества $\{1, 2\} \subset \{1, 2, 3, 4\}$ и $\{1, 3\} \subset \{1, 2, 3, 4\}$.
 (c) Подмножества $\{1, 2\} \subset \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ и $\{1, 3\} \subset \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$.

6.2.7. Зависимы ли следующие подмножества множества целых чисел от 1 до 105?

- (a) Подмножество чисел, делящихся на 5, и подмножество чисел, делящихся на 7.
 (b) Подмножество чисел, делящихся на 15, и подмножество чисел, делящихся на 21.
 (c) Подмножество чисел, делящихся на 15, и подмножество чисел, делящихся на 5.
 (d) Подмножество чисел, делящихся на 10, и подмножество чисел, делящихся на 7.

6.2.8. Подмножества A и B конечного множества независимы тогда и только тогда, когда A и \bar{B} независимы.

6.2.9. Существуют подмножества A, B_1, B_2 конечного множества,
 (a) попарно независимые, но для которых A зависит от $B_1 \cap B_2$;
 (b) не являющиеся попарно независимыми, но для которых A независимо и от B_1 , и от B_2 , и от $B_1 \cap B_2$.

6.2.10. (Ср. с замечанием после задачи 6.2.1.b.) Зависимы ли следующие подмножества множества всех раскрасок чисел $1, 2, \dots, 400$ в два цвета?

- (a) Подмножество раскрасок, для которых $\{1, 2, \dots, 8\}$ одноцветно, и подмножество раскрасок, для которых $\{11, 12, \dots, 18\}$ одноцветно.
 (b) Подмножество раскрасок, для которых $\{1, 2, \dots, 8\}$ неодноразноцветно, и подмножество раскрасок, для которых $\{11, 12, \dots, 18\}$ неодноразноцветно.
 (c) Подмножество раскрасок, для которых $\{1, 2, \dots, 8\}$ одноцветно, и подмножество раскрасок, для которых $\{6, 7, \dots, 13\}$ одноцветно.

6.2.11. Обозначим через M семейство всех раскрасок множества $[400] := \{1, 2, \dots, 400\}$ в два цвета. Для подмножества $\alpha \subset [400]$ обозначим через $A_\alpha \subset M$ подмножество тех раскрасок, для которых α одноцветно. Тогда для любых $\alpha_1, \dots, \alpha_n \subset \{9, 10, \dots, 400\}$

подмножество $A_{[8]}$ не зависит от пересечения $A_{\alpha_1} \cap \dots \cap A_{\alpha_n}$. (Ср. с замечанием после задачи 6.2.1.b.)

Подробнее о независимости см. [KZP].

Лемма Ловаса

Приведем задачи, которые подведут нас к лемме Ловаса 6.2.15.

6.2.12. (a) В городе доля богатых горожан больше $2/3$, доля здоровых больше $2/3$ и доля умных больше $2/3$. Обязательно ли найдется богатый здоровый умный горожанин?

(b) В городе доля богатых горожан больше $3/4$, доля здоровых больше $3/4$ и доля умных больше $3/4$. Обязательно ли среди здоровых умных большинство богаты?

(c) В городе есть богатый горожанин, есть здоровый горожанин и есть умный горожанин. Богатство, здоровье и ум попарно независимы (т.е., например, доля богатых здоровых среди богатых такая же, как и доля здоровых среди всех жителей). Доля богатых здоровых умных среди богатых здоровых такая же, как и доля умных среди всех жителей. (Вместе с условием попарной независимости последнее условие называется *независимостью в совокупности*.) Обязательно ли найдется богатый здоровый умный горожанин?

(d) Тот же вопрос, если в городе богатых горожан больше половины, здоровых больше половины, умных больше половины, богатство и ум независимы, здоровье и ум независимы.

(e) В городе доля богатых горожан больше $2/3$, доля здоровых больше $2/3$ и доля умных больше $2/3$. Богатство и ум независимы, здоровье и ум независимы. Может ли доля богатых здоровых умных быть меньше $1/5$?

(f) В городе доля богатых горожан больше $5/8$, доля здоровых больше $5/8$ и доля умных больше $5/8$. Богатство и здоровье независимы. Обязательно ли найдется богатый здоровый умный горожанин?

Задача 6.2.12 показывает, что чем сильнее условие, характеризующее независимость нескольких множеств, тем меньшей доли каждого множества достаточно, чтобы гарантировать непустоту пере-

сечения. Причем наиболее интересные результаты (6.2.12.def) получаются «посередине» между крайними условиями — полного отсутствия независимости (6.2.12.ab) и независимости в совокупности (6.2.12.c). Так часто бывает: наиболее полезные соображения находятся между «крайними» точками зрения.

Для леммы Ловаса нужно еще более «хитрое» условие независимости на несколько множеств, чем рассмотренные ранее.

6.2.13. (a) Пусть A_1, A_2, A_3, A_4 — подмножества конечного множества, доля каждого из которых больше $5/6$. Пусть A_1 независимо с $A_3 \cap A_4$. Тогда $|A_1 \cap A_2 \cap A_3 \cap A_4| > \frac{7}{9}|A_2 \cap A_3 \cap A_4|$.

(b) Пусть A_1, A_2, A_3, A_4 — подмножества конечного множества, доля каждого из которых больше $5/7$. Пусть A_1 независимо с $A_3 \cap A_4$. Тогда $A_1 \cap A_2 \cap A_3 \cap A_4 \neq \emptyset$.

(c) Пусть A_1, A_2, \dots, A_n — подмножества конечного множества, доля каждого из которых больше $3/4$. Пусть A_k независимо с $A_{k+2} \cap \dots \cap A_n$ для любого $k = 1, 2, \dots, n-3$. Тогда $A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n \neq \emptyset$.

6.2.14. Пусть A_1, A_2, \dots, A_n — подмножества конечного множества, доля каждого из которых больше $7/8$.

(a) Тогда $|A_1 \cap A_2 \cap A_3 \cap A_4| > \frac{4}{5}|A_2 \cap A_3 \cap A_4|$.

(b) Пусть A_1 независимо с $A_4 \cap A_5$. Тогда $|A_1 \cap \dots \cap A_5| > \frac{5}{6}|A_2 \cap A_3 \cap A_4 \cap A_5|$.

(c) Пусть A_k независимо с $A_{k+3} \cap \dots \cap A_n$ для любого $k = 1, 2, \dots, n-4$. Тогда $A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n \neq \emptyset$.

6.2.15. Локальная лемма Ловаса в симметричной форме.

Пусть A_1, \dots, A_n — подмножества конечного множества. Пусть для некоторого d и любого k

- доля подмножества A_k не меньше $1 - \frac{1}{4d}$, и
- из A_1, A_2, \dots, A_n можно вычеркнуть не более d множеств, среди которых есть A_k , так что пересечение любого набора из оставшихся множеств будет независимо с A_k .

Тогда $A_1 \cap \dots \cap A_n \neq \emptyset$.⁹

⁹Вот формулировка на вероятностном языке, которая не используется в дальнейшем. Пусть дано вероятностное пространство и A_1, \dots, A_n — события. Пусть для некоторого d и любого k вероятность события A_k не меньше

Читатель может перед доказательством этой леммы применить ее к решению задачи 6.2.1.b. Доказательство леммы нетривиально обобщает идеи решения задач 6.2.12–6.2.14. Из этих задач ясно, что нужно оценивать снизу количество элементов в пересечении s из данных множеств, начиная с $s = 1$ и заканчивая $s = n$, при помощи индукции по s . Как часто бывает, наиболее трудная часть — догадаться, какое конкретно утверждение нужно доказывать по индукции.

Подсказки к задачам 6.2.1-6.2.15

6.2.1. (a) См. указание к задаче 1.5.7.

(b) Обозначим через A множество распределений выходных. (Имеем $|A| = 2^n$, где n — число специалистов.) Для каждого вида работ x обозначим через \hat{x} множество специалистов по нему, а через A_x — множество распределений выходных, при которых и в субботу, и в воскресенье на работе есть специалист по x . Тогда $|A_x|/|A| = 2^{-7}$. В утверждении 6.2.11 говорится, что подмножество A_x не зависит от пересечения любого поднабора множеств из набора $\{A_y \mid \hat{y} \cap \hat{x} = \emptyset\}$. Так как каждый вид работ имеет общих специалистов не более чем с 30 другими видами, то вне этого набора не более 30 подмножеств. Применим локальную лемму Ловаса 6.2.15 к дополнениям множеств A_x и $d = 2^5$. Это возможно ввиду утверждения 6.2.8 и неравенства $30 < 2^5$. Получим $\bigcap_x \overline{A_x} \neq \emptyset$.

6.2.2. (a) Выберем произвольного студента произвольной группы и назначим его старостой. Далее действуем так: на каждом шаге выбираем из группы, в которой еще не выбран староста, студента, не являющегося соседом никакого выбранного старосты. Так как выбранных старост не больше 9, то соседей у выбранных старост не больше 18. Следовательно, на каждом шаге мы можем найти нужного студента. В итоге получим 10 человек из разных групп, никакие два из которых не являются соседями.

$1 - \frac{1}{4d}$, и из A_1, A_2, \dots, A_n можно вычеркнуть не более d событий, среди которых есть A_k , так что пересечение любого набора из оставшихся событий будет независимо с A_k . Тогда вероятность события $A_1 \cap \dots \cap A_n$ положительна.

6.2.4. (а) Покрасим каждое число $x \in \mathbb{R}$ в четность числа $[x/M]$, т.е. в черный цвет, если число $[x/M]$ четно, и в нечерный цвет, если оно нечетно.

6.2.6. Ответы: (а,b) независимы, (с) зависимы.

6.2.7. Ответы: (а) независимы, (b,c,d) зависимы.

6.2.9. (а) Возьмем в качестве A, B_1 и B_2 диагональ, первую горизонталь и первую вертикаль таблицы (скажем, 2×2).

Следующее более формальное и полное изложение решения написано В. Немычниковой. Возьмем

$$M := \{1, 2, 3, 4\}, \quad A := \{1, 4\}, \quad B_1 := \{2, 4\} \quad \text{и} \quad B_2 := \{3, 4\}.$$

Тогда A, B_1, B_2 попарно независимы, ибо

$$4 = |M||A \cap B_1| = |A||B_1| = |M||A \cap B_2| = |A||B_2| = |M||B_2 \cap B_1| = |B_2||B_1|.$$

Но A зависимо от набора B_1, B_2 , ибо $|M||A \cap B_1 \cap B_2| = 4 \neq |A||B_1 \cap B_2|$.

(b) Можно взять A , независимое с $B_1 = B_2$. Или A , независимое с B_1 и с B_2 , причем $B_1 \cap B_2 = \emptyset$.

Следующее более формальное и полное изложение решения написано В. Немычниковой. Возьмем

$$M := \{1, 2, 3, 4\}, \quad A := \{2, 3\}, \quad B_1 := \{1, 2\} \quad \text{и} \quad B_2 := \{3, 4\}.$$

Тогда A независимо от набора B_1, B_2 , ибо

$$|M||A \cap B_1| = |A||B_1| = 4 = |M||A \cap B_2| = |A||B_2| = 4$$

$$\text{и} \quad |M||A \cap B_1 \cap B_2| = 0 = |A||B_1 \cap B_2|.$$

Но B_1 и B_2 зависимы, ибо $|M||B_2 \cap B_1| = 0 \neq |B_2||B_1|$.

6.2.10. Ответы: (а,b) независимы, (с) зависимы.

Далее будем иногда пропускать знаки пересечения и числа элементов.

6.2.12. Обозначим через У,Б,З,Г множества умных, богатых, здоровых и всех горожан, соответственно.

(b) Имеем $УБ\bar{З} \leq \bar{З} \leq Г/4 < УБ/2$.

(d) Забудьте про глупых людей!

Замечание. Для решения задачи достаточно наличия одного умного человека. Не обязательно, чтобы умных было большинство.

Приведем более сложное решение. Зато оно подводит к п. (e,f) и лемме Ловаса. Имеем $УБ > У/2 < УЗ$. Значит,

$$УБЗ = УБ - УБ\bar{З} > \frac{У}{2} - У\bar{З} > \left(\frac{1}{2} - 1 + \frac{1}{2}\right) У = 0.$$

(e) Нет, доля больше $2/9$.

(f) Приведем более сложное решение, чем Ваше. Зато оно подводит к лемме Ловаса. Имеем

$$\begin{aligned} УБЗ = УБ - УБ\bar{З} &\geq У + Б - Г - Б\bar{З} = У - Г + БЗ > \\ &> \left(\frac{5}{8} - 1 + \frac{25}{64}\right) Г = \frac{1}{64} Г > 0. \end{aligned}$$

6.2.13. (a) Обозначим через M данное конечное множество. Тогда аналогично задаче 6.2.12.b $\overline{A_2 A_3 A_4} \leq \overline{A_2} < M/6 < A_3 A_4/4$. Так как A_1 не зависит от $A_3 A_4$, то и $\overline{A_1}$ не зависит от $A_3 A_4$. Поэтому

$$A_2 A_3 A_4 = A_3 A_4 - \overline{A_2} A_3 A_4 > \frac{3}{4} A_3 A_4 > \frac{9}{2} \overline{A_1} A_3 A_4 \geq \frac{9}{2} \overline{A_1} A_2 A_3 A_4.$$

Отсюда

$$A_1 A_2 A_3 A_4 = A_2 A_3 A_4 - \overline{A_1} A_2 A_3 A_4 > \frac{7}{9} A_2 A_3 A_4.$$

Обозначим $X_k := A_k \cap A_{k+1} \cap \dots \cap A_n$. Тогда X_{n+1} — данное конечное множество.

6.2.13. (b) Аналогично п. (a) докажите, что

$$X_1 > \frac{1}{2} X_2 > \frac{1}{4} X_3 > \dots > \frac{1}{2^{n-2}} X_{n-1} > \frac{1}{2^{n-1}} X_{n+1}.$$

6.2.14. Пункты (a), (b), (c) аналогичны утверждениям 6.2.12.b, 6.2.13.a и 6.2.13.b, соответственно.

6.2.15. Достаточно доказать, что

$$(I) \quad |X_1| \geq \left(1 - \frac{1}{2d}\right) |X_2| \quad \text{для любого } n.$$

Из этого будет вытекать, что $|X_1| \geq \left(1 - \frac{1}{2d}\right)^{n-1} |X_n| > 0$.

7 Алгебраические методы

7.1 Линейно-алгебраический метод в комбинаторике

Напомним, что для множества F

$$F^n := \{(a_1, a_2, \dots, a_n) : a_1, a_2, \dots, a_n \in F\}.$$

Элементы этого множества называются *векторами* (или *наборами* или *точками*). Если $F \in \{\mathbb{Z}_2, \mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}\}$, то векторы можно покомпонентно складывать:

$$(x_1, \dots, x_n) + (y_1, \dots, y_n) := (x_1 + y_1, \dots, x_n + y_n).$$

Если $F \in \{\mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}\}$, то вектор можно покомпонентно умножить на число $\lambda \in F$:

$$\lambda(x_1, \dots, x_n) := (\lambda x_1, \dots, \lambda x_n).$$

(Это можно делать и для $F = \mathbb{Z}_2$, но не интересно.)

7.1.1. Теорема о линейной зависимости.

(\mathbb{Z}_2) Среди любых $n + 1$ наборов длины n из нулей и единиц найдется несколько (не ноль) наборов, покомпонентная сумма по модулю два которых есть нулевой набор.

(\mathbb{Q}) Для любых $n + 1$ векторов $v_1, \dots, v_{n+1} \in \mathbb{Q}^n$ найдутся рациональные числа $\lambda_1, \dots, \lambda_{n+1}$, не все равные нулю, для которых $\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_{n+1} v_{n+1} = (0, \dots, 0)$.

(\mathbb{R}) Аналог теоремы (\mathbb{Q}) справедлив для вещественных, комплексных и целых чисел.

Наборы из задач 7.1.1.(\mathbb{Z}_2), (\mathbb{Q}) называются *линейно зависимыми* — над \mathbb{Z}_2 и над \mathbb{Q} соответственно. *Линейная независимость* — отрицание *линейной зависимости*. Аналогично определяется линейная (не)зависимость многочленов над \mathbb{Z}_2 и \mathbb{Q} соответственно. (Эти и следующие понятия используются в формулировках задач 7.1.4.c, 7.1.5.c, 7.1.7.b и в решениях некоторых задач.)

Для $F \in \{\mathbb{Z}_2, \mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}\}$ скалярное произведение $F^n \times F^n \rightarrow F$ определяется формулой

$$(x_1, \dots, x_n) \cdot (y_1, \dots, y_n) := x_1 y_1 + \dots + x_n y_n.$$

Векторы $x, y \in F^n$ называются *ортогональными*, если $x \cdot y = 0$.

Расстояние между точками пространства \mathbb{R}^n определяется формулой

$$|(x_1, \dots, x_n), (y_1, \dots, y_n)| := \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2}.$$

Линейным подпространством называется подмножество $L \subset \mathbb{Q}^n$, замкнутое относительно сложения векторов и умножения на рациональные числа. Линейное подпространство L называется *n-мерным*, если найдутся такие линейно независимые векторы $v_1, \dots, v_n \in L$, что любой вектор $v \in L$ линейно выражается через данные векторы, т. е. найдутся числа $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{Q}$, для которых $v = \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n$. Число n называют *размерностью* пространства L . Ср. с определением перёд задачей 1.4.7.

Замечание. Аналогичные определения можно дать и в более общей ситуации — это приводит к понятию *кольца* и *модуля* над ним. Попытка доказать (и использовать!) аналог теоремы о линейной зависимости (задачи 7.1.1) приводит к понятиям *поля* и *линейного пространства* над ним. (Для случая целых чисел уже не все обобщения проходят.) Подробности можно найти в учебнике по линейной алгебре.

Фраза « N элементов» (в частности, подмножеств) означает « N попарно различных элементов» (в частности, подмножеств).

7.1.2. Дано семейство \mathcal{F} подмножеств множества \mathcal{R}_n .

(а) Если в каждом подмножестве из \mathcal{F} нечётное число элементов, а в пересечении любых двух подмножеств из \mathcal{F} чётное число элементов, то $|\mathcal{F}| \leq n$.

(б) Постройте пример, когда эта оценка достигается.

(с) Если в пересечении любых двух подмножеств из \mathcal{F} ровно q элементов и в каждом подмножестве из \mathcal{F} более q элементов, то $|\mathcal{F}| \leq n$.

(д) Если $q > 0$ и в пересечении любых двух подмножеств из \mathcal{F} ровно q элементов, то $|\mathcal{F}| \leq n$.

7.1.3. (а) Существуют 2^k подмножеств $2k$ -элементного множества, в каждом из которых чётное число элементов и в пересечении любых двух из которых чётное число элементов.

(b) Больше, чем 2^k подмножеств, в условиях п. (a) быть не может.

7.1.4. (a) Наибольшее число точек в \mathbb{R}^n с равными попарными расстояниями равно $n + 1$.

(b) Для $a \in \mathbb{R}$ и точек $v = (v_1, \dots, v_n) \in \mathbb{R}^n$, $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ обозначим $P_v(x) := |x - v|^2 - a^2$. Если попарные расстояния между k точками $u_1, \dots, u_k \in \mathbb{R}^n$ равны a , то многочлены P_{u_1}, \dots, P_{u_k} линейно независимы над \mathbb{Q} .

(c) Постройте $n(n - 1)/2$ точек в \mathbb{R}^n , попарные расстояния между которыми принимают только два различных значения.

(d) Если попарные расстояния между k точками в \mathbb{R}^n принимают только два различных значения, то $k \leq (n + 1)(n + 4)/2$.

7.1.5. (a) Среди любых 327 попарно пересекающихся 9-элементных подмножеств 25-элементного множества найдутся два подмножества, в пересечении которых ровно 3 или ровно 6 элементов.

(b) Для $n, k \in \mathbb{Z}$ обозначим

$$V_{n,k} := \left\{ (x_1, \dots, x_n) \in \{0, 1\}^n : \sum_s x_s = k \right\}.$$

Среди любых 327 точек в $V_{25,9}$ есть две, скалярное произведение которых делится на 3.

(c) Для любого $\vec{a} \in V_{25,9}$ раскроем скобки в произведении

$$(\vec{a} \cdot (x_1, x_2, \dots, x_{25}))^2 - 1$$

по модулю 3, где x_1, x_2, \dots, x_{25} — переменные. Каждый из полученных одночленов λx_i^2 заменим на λx_i . Полученный многочлен (с коэффициентами в \mathbb{Z}_3) обозначим $F_{\vec{a}}(x_1, \dots, x_{25})$.

Докажите, что если скалярное произведение никаких двух векторов среди $\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_s \in V_{25,9}$ не делится на 3, то многочлены $F_{\vec{a}_1}, \dots, F_{\vec{a}_s}$ линейно независимы над \mathbb{Z}_3 .

(d) Укажите 326 многочленов, линейными комбинациями которых с рациональными коэффициентами можно получить каждый многочлен $F_{\vec{a}}$, $\vec{a} \in V_{25,9}$.

7.1.6. (a) Среди любых 107 пятиэлементных подмножеств 14-элементного множества найдутся два подмножества, в пересечении которых ровно 2 элемента.

- (b) То же для 93 подмножеств.
 (c) То же для 92 подмножеств.
 (d) Невозможно раскрасить в 21 цвет все пятиэлементные подмножества 14-элементного множества так, чтобы любые два пятиэлементные подмножества, пересекающиеся ровно по двум элементам, были разноцветны.

(Ср. с замечанием в задаче 5.1.4. Вот эквивалентная формулировка. Вершинами графа являются все пятиэлементные подмножества 14-элементного множества. Его ребрами являются пары подмножеств, пересекающиеся ровно по двум элементам. Докажите, что этот граф нельзя правильно раскрасить в 21 цвет.)

7.1.7. Обозначим $G(t) := (t - 1)(t - 2) \dots (t - p + 1)$.

- (a) Для простого p и целого t число $G(t)$ делится на p тогда и только тогда, когда t не делится на p .
 (b) Пусть p простое и $n = 4p$. Обозначим

$$M = \{(1, y_2, y_3, \dots, y_n) :$$

$: y_k \in \{1, -1\}$ и среди y_2, \dots, y_n число минус единиц чётно.

Для любого $\vec{a} \in M$ раскроем скобки в произведении $G(\vec{a} \cdot (1, x_2, \dots, x_n))$ по модулю p , где x_2, \dots, x_n — переменные. В каждом из полученных одночленов для каждого i будем заменять x_i^2 на 1, пока это возможно. Полученный многочлен обозначим $F_{\vec{a}}(x_2, \dots, x_n)$.

Докажите, что если скалярное произведение никаких двух векторов среди $\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_s \in M$ не равно нулю, то многочлены $F_{\vec{a}_1}, \dots, F_{\vec{a}_s}$ линейно независимы над \mathbb{Z}_p .

- (c) Существуют n и ограниченное подмножество в \mathbb{R}^n , которое невозможно разбить на $n + 1$ непустых частей меньшего диаметра.

7.1.8. (a) *Теорема Франкла-Уилсона.* Если p простое и $n > k$ целые,

то среди любых различных $1 + \sum_{j=0}^{p-1} \binom{n}{j}$ подмножеств n -элементного множества, в каждом из которых k -элементов, найдутся два подмножества, число элементов в пересечении которых делится на p .

- (b) То же, только задано целое a и «делится на p » заменено на «сравнимо с a по модулю p ».

(с) *Теорема Фрэнкла-Вильсона.* Пусть $p > 2$ простое и в множестве из $n = 4p^\alpha$ элементов выбрано $\binom{n-1}{n/4-1}$ подмножеств по $n/2$ элементов в каждом. Тогда найдутся два множества, имеющие ровно $n/4$ общих элементов.

7.1.9. (а) Если множество рёбер графа K_n является объединением множеств рёбер s полных двудольных графов, не пересекающихся по рёбрам, то $s \geq n - 1$.

(b) Постройте набор двудольных графов, на котором эта оценка достигается.

Ср. с п. 5.1 и 5.7. Более подробное и развернутое изложение можно найти в [М, R1], а более продвинутое — в [В].

7.2 Матрицы Адамара

7.2.1. *Теорема Адамара.* Если у матрицы A размера $n \times n$ каждый элемент по модулю не превосходит 1, то $|\det A| \leq n^{n/2}$.

Квадратная матрица H называется *матрицей Адамара*, если все её элементы равны ± 1 и $H \cdot H^T = nE_n$, где n — порядок матрицы H и E_n — единичная матрица.

7.2.2. Постройте матрицу Адамара $n \times n$ для $n =$
(2) 2; (4) 4; (8) 8; (16) 16; (12) 12.

7.2.3. (а) У матрицы Адамара любые два столбца ортогональны.

(b) Матрица является матрицей Адамара тогда и только тогда, когда её элементы равны ± 1 и любые две строки ортогональны.

(с) Для матриц Адамара достигается верхняя оценка в теореме Адамара. (Название матрицы Адамара получили благодаря этому результату.)

(d) Если существует матрица Адамара $n \times n$ и $n > 2$, то n делится на 4.

Гипотеза. Матрица Адамара $n \times n$ существует для любого числа n , делящегося на 4.

Гипотеза не доказана даже для некоторых чисел, меньших 1000; а именно, для 668, 716, 892.

Для решения двух следующих задач потребуются простейшие свойства квадратичных вычетов; см. [O, §9], [Vi, §5], [ZSS, 3.3].

7.2.4. Для простого числа p обозначим $S_d = S_{p,d} := \sum_{j \in \mathbb{Z}_p} \left(\frac{j(j+d)}{p} \right)$

(это сумма символов Лежандра).

- (a) Докажите, что S_d не зависит от $d \neq 0$.
- (b) Найдите S_d для каждого $d \in \mathbb{Z}_p$.

7.2.5. Постройте матрицу Адамара $n \times n$ для n , равного

- (2a) $2a$, если существует матрица Адамара $a \times a$;
- (ab) ab , если существуют матрицы Адамара $a \times a$ и $b \times b$;
- (4k) $p + 1$, где p — простое число вида $4k - 1$;
- (8k+4) $2p + 2$, где p — простое число вида $4k + 1$.

Матрица Адамара называется *нормализованной*, если у неё первая строка и первый столбец состоят из одних единиц.

7.2.6. Нарисуйте все нормализованные матрицы Адамара порядков 1; 2; 4.

7.2.7. Адамаровость матрицы сохраняется при следующих преобразованиях:

- (1) умножение строки или столбца на -1 ;
- (2) перестановка строчек или столбцов местами.

Матрицы Адамара, получаемые друг из друга применением некоторого числа преобразований (1) и (2), называются *эквивалентными*.

7.2.8. (a) Какие из матриц из задачи 7.2.6 эквивалентны?
 (b) Любая матрица Адамара эквивалентна некоторой нормализованной.

Количество классов эквивалентности: для порядков 1,2,4,8,12 — 1, 16 — 5, 20 — 3, 24 — 60, 28 — 487, 32 — больше миллиона.

7.2.9. Для любых ли матриц Адамара H и H' матрицы $H \otimes H'$ и $H' \otimes H$ эквивалентны? Здесь тензорное произведение \otimes определено в указании к задаче 7.2.5.(ab).

Литература

- [АН89] D. Archdeacon and P. Huneke, A Kuratowski theorem for non-orientable surfaces, *J. Comb. Th., Ser. B*, 46 (1989) 173–231.
- [АМ] *Акопян А. В. , Мусин О. Р.* О множествах с двумя расстояниями. *Мат. Просвещение*, 17 (2013), 136–151.
<http://www.mccme.ru/free-books/matpros/mph.pdf>
- [АС] *Алон Н., Спенсер Дж.* Вероятностный метод. М.: Бином, 2011.
- [В] *Babai L., Frankl P.* Linear algebra methods in combinatorics, Part 1. Department of Computer Science, The University of Chicago, 1992.
- [ВМ] *I. Bogdanov and A. Matushkin.* Algebraic proofs of linear versions of the Conway–Gordon–Sachs and the van Kampen–Flores theorems, <http://arxiv.org/abs/1508.03185>
- [ВМ04] *J. M. Boyer, W.M. Myrvold,* On the Cutting Edge: Simplified $O(n)$ Planarity by Edge Addition. *Journal of Graph Algorithms and Applications*, 8:3, (2004) 241–273.
- [Bo] *Bollobás B.* Random Graphs. Cambridge studies in advanced mathematics, 2001.
- [Cl37] S. Claytor, Peanian continua not embeddable in a spherical surface, *Ann. of Math.* 38 (1937) 631–646.
- [EL] P. Erdős, L. Lovász, “Problems and results on 3-chromatic hypergraphs and some related questions”, *Infinite and Finite Sets*,

Colloquia Mathematica Societatis Janos Bolyai, **10**, Amsterdam: North Holland, 1973, 609–627.

[G] *Грэхем Р.* Начала теории Рамсея. М.: Мир, 1984.

[Ga] *Гарднер М.* Рамсеевская теория графов. // Квант, 1988, N4, с. 15–20, 82. http://kvant.mccme.ru/1988/04/ramseevskaya_teoriya_grafov.htm

[GHW79] Н. Н. Glover, J. P. Huneke and C. S. Wang, 103 graphs that are irreducible for the projective plane, J. Comb. Th., 27:3 (1979) 332–370.

[GIF] *С. А. Генкин, И. В. Итенберг и Д. В. Фомин*, Ленинградские математические кружки, Киров, 1994.

[GKP] *Грэхем Р., Кнут Д., Паташник А.* Конкретная математика. М.: Мир, 1998.

[Har] *Харари Ф.* Теория графов. М.: УРСС, 2003.

[Hal] *Холл М.* Комбинаторика. М.: Мир, 1970.

[IRS] *Ильинский Д., Райгородский А., Скопенков А.* Независимость и доказательства существования в комбинаторике. Мат. Просвещение, 19 (2015). <http://arxiv.org/abs/1411.3171>

[IKRS] *Ильинский Д., Кунавский А., Райгородский А., Скопенков А.* Дискретный анализ для математиков и программистов (подборка задач). Мат. Просвещение, 17 (2013), с. 162–181. <http://www.mccme.ru/free-books/matpros/matprosi.html>

[I] *Игнатъев М.В.* Квантовая комбинаторика. Мат. Просвещение. 18 (2014), с. 66–111. <http://www.mccme.ru/free-books/matpros/mpi.pdf>

[Ja] *Janson S., Luczak T., Rucinski A.* Random Graphs. John Wiley, 2000.

[J] *Jukna S.* Extremal Combinatorics With Applications in Computer Science. Springer-Verlag, XVII (2001).

- [К] *Калу́жнин Л. А., Суццанский В. И.* Преобразования и перестановки. М.: Физматлит, 1985.
- [Ku00] V. A. Kurlin, Basic embeddings into products of graphs, *Topol. Appl.* 102 (2000) 113–137.
- [KZP] *Колмогоров А. Н., Журбенко И. Г., Прохоров А. В.*, Введение в теорию вероятностей. Серия «Библиотечка «Квант» », выпуск 23. М.: Наука, 1982.
URL: <http://ilib.mcsme.ru/djvu/bib-kvant/teorver.htm>
- [KR] *Курант Р., Роббинс Г.* Что такое математика? М.: МЦНМО, 2001. <http://ilib.mcsme.ru/pdf/kurant.htm>
- [L] *Lovász L.* Combinatorial Problems and Exercises. North-Holland, Amsterdam, 1979.
- [M] *J. Matoušek.* Thirty-three Miniatures: Mathematical and Algorithmic Applications of Linear Algebra, Amer. Math. Soc., 2010
- [Ma] *А. Матушкин*, Непустота пересечения цепочки множеств, *Мат. Просвещение*, представлено к публикации.
- [Ma97] Yu. Makarychev, A short proof of Kuratowski's graph planarity criterion, *J. of Graph Theory*, 25 (1997) 129–131.
- [Mo] *B. Mohar*, 2-cell embeddings with prescribed face lengths and genus, *Ann. Combin.* 14 (2010) 525-532.
http://www.fmf.uni-lj.si/~mohar/Reprints/Inprint/BM06_AC_Mohar_2cellEmbeddings.pdf.
- [MS] *Медников Л. Э., Шаповалов А.В.* Турнир городов: мир математики в задачах. МЦНМО, 2012.
- [NPP] *Ф. Нилов, А. Полянский, Н. Полянский.* Инциденции точек и прямых, *Мат. Просвещение*, 21 (2017).
<http://www.turgor.ru/lktg/2014/7/index.htm>
- [O] *Задачник по ОКТЧ./ Глибичук А.А. [и др.]* Готовится к печати.

- [P] *В. Прасолов*. Элементы комбинаторной и дифференциальной топологии. М.: МЦНМО, 2004. <http://www.mccme.ru/prasolov/>.
- [PS05] *В.В. Прасолов и М.Б. Скопенков*. Рамсеевская теория зацеплений // Мат. Просвещение. 2005. 9. С. 108-115.
- [R1] *Райгородский А.М.* Линейно-алгебраический метод в комбинаторике. М.: МЦНМО, 2015.
- [R2] *Райгородский А.М.* Проблема Борсука. М.: МЦНМО, 2014.
- [R3] *Райгородский А.М.* Вероятность и алгебра в комбинаторике. М.: МЦНМО, 2010.
- [R4] *Райгородский А.М.* Модели случайных графов. М.: МЦНМО, 2008.
<http://www.mccme.ru/free-books/dubna/raigor-4.pdf>
- [R5] *Райгородский А.М.*, Комбинаторика и теория вероятностей. М.: Изд-во МФТИ, 2012.
- [R6] *Райгородский А.М.*, Системы общих представителей в комбинаторике и их приложения в геометрии. М.: МЦНМО, 2013.
<http://www.mccme.ru/free-books/dubna/raigor-2.pdf>
- [RS90] N. Robertson and P. D. Seymour, Graph minors VIII, A Kuratowski graph theorem for general surfaces, J. Comb. Theory, 48B (1990) 255–288.
- [Ru] *Рухович А.* Степенные последовательности ориентированных графов, <http://www.mccme.ru/mmks/dec09/ruhovich.pdf>
- [S] *Д. Судзуки*, *Основы дзэн-буддизма*. Наука дзэн — ум дзэн. Киев: Преса України. 1992.
- [S1] *Skopenkov A.* On the Kuratowski graph planarity criterion.
<http://arxiv.org/abs/0802.3820>
Русскоязычная версия: *Скопенков А.* Вокруг критерия Куратовского планарности графов, Мат. Просвещение, 9 (2005),

116–128 и 10 (2006), 276–277.

<http://www.mccme.ru/free-books/matprosa.html>

- [S2] *Skopenkov A.* A two-page disproof of the Borsuk partition conjecture. <http://arxiv.org/abs/0712.4009>, v2.

Русскоязычная версия: *Скопенков А.* Короткое опровержение гипотезы Борсука. *Мат. Просвещение*, 17 (2013), с. 88–92.

<http://www.mccme.ru/free-books/matpros/matprosi.html>

- [S3] *Скопенков А.* Алгебраическая топология с геометрической точки зрения. М.: МЦНМО, 2015.

<http://www.mccme.ru/circles/oim/obstruct.pdf>

- [S4] *Скопенков А.* Олимпиады и математика. *Мат. Просвещение*, 10 (2006), с. 57–63.

<http://www.mccme.ru/free-books/matprosb.html>

- [S5] *Скопенков А.* Простое доказательство теоремы Руффини-Абеля, *Мат. Просвещение*, 15 (2011), с. 113–126.

<http://arxiv.org/abs/1102.2100>

- [S6] *Скопенков А.* Объемлемая однородность, МЦНМО, Москва, 2012. <http://arxiv.org/abs/1003.5278>

- [S7] *Скопенков А.* Алгебраическая топология с алгоритмической точки зрения. <http://www.mccme.ru/circles/oim/algord.pdf>

- [Sa91] K. S. Sarkaria, Kuratowski complexes, *Topology*, 30 (1991) 67–76.

- [Sk] *A. Skopenkov.* Realizability of hypergraphs and Ramsey link theory, <http://arxiv.org/abs/1402.0658>

- [Sk95] A. Skopenkov, A description of continua basically embeddable in \mathbb{R}^2 , *Topol. Appl.* 65 (1995) 29–48.

- [Sk08] A. Skopenkov, Embedding and knotting of manifolds in Euclidean spaces, in: *Surveys in Contemporary Mathematics*, Ed. N. Young and Y. Choi, London Math. Soc. Lect. Notes, 347 (2008) 248–342. arXiv:math/0604045

- [Sk15] *A. Skopenkov*. A short elementary proof of the Ruffini-Abel Theorem, <http://arxiv.org/abs/1508.03317>
- [Sk12] *А. Скопенков*. Еще одно доказательство ‘из Книги’: теорема Менгера. Мат. Просвещение, 16 (2012), 48-49.
<http://www.mccme.ru/free-books/matprosh.html>
- [So] *Соловьева Ф. И.* Введение в теорию кодирования. Новосибирск, 2006. <http://tc.nsu.ru/uploads/codingtheory.pdf>
- [Ve] *Веснин А. Ю.* Гамильтоновы графы и остовные подграфы: задачи для исследования, материалы Московской математической конференции школьников.
<http://www.mccme.ru/mmks/mar08/vesnin3.pdf>
- [Vi] *Виноградов И. М.* Основы теории чисел. М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2003.
- [VS] *Волков М., Силкин Н.* Кого послать на Марс? // Квант (1988) N8, с. 51–57.
http://kvant.mccme.ru/1988/08/kogo_poslat_na_mars.htm
- [VS97] *Н. Б. Васильев и А. Б. Скопенков*. Решение задачи M1566. // Квант (1997) N2, с. 24.
- [SVY] *А. Волостнов, А. Скопенков и Ю. Яровиков*, Этюд о рекуррентных соотношениях, Мат. Просвещение 21 (2017), 213-218.
- [Th81] *C. Thomassen*, Kuratowski’s theorem, J. Graph. Theory, 5 (1981) 225–242.
- [ZSS] Элементы математики в задачах: через олимпиады и кружки к профессии Сборник под редакцией А. Заславского, А. Скопенкова и М. Скопенкова. Изд-во МЦНМО, 2017.
<http://www.mccme.ru/circles/oim/materials/sturm.pdf>
- [1] <https://www.dpmms.cam.ac.uk/~dc340/EGT3.pdf>
- [2] <http://www.cs.rit.edu/~spr/E1JC/ejcr14.pdf>

- [3] <http://www.math.upenn.edu/~wilf/website/Three\%20problems.pdf>
- [4] http://www.unn.ru/math/no/5/_nom5_001_ilyin.pdf
- [5] <http://www.sosmath.com/calculus/sequence/stirling/stirling.html>
- [6] http://www.spbstu.ru/publications/m_v/n_002/Polischook/Stirling.pdf
- [7] <http://arxiv.org/pdf/1109.2546.pdf>
- [8] <http://dainiak.blogspot.ru>

10 Программа курса ДА 2014-17 уч. годов

Обновлено 3.06. Спасибо студентам за вопросы, благодаря которым появились мелкие уточнения.

Нужно уметь решать задачи, аналогичные пп. 2.1-2.7, 3.1, 3.2, 4.1, 4.2, 4.5, 5.1, 5.2, 5.5, 6.1-6.3, 7.1, 7.2 книги

Элементы дискретной математики в задачах, А.А. Глибичук, А.Б. Дайняк, Д.Г. Ильинский, А.Б. Купавский, А.М. Райгородский, А.Б. Скопенков, А.А. Чернов, Изд-во МЦНМО, 2016, <http://www.mcsme.ru/circles/oim/discrbook.pdf>

В скобках указана ориентировочная сложность пункта (или части пункта) программы. Формального смысла эти баллы не имеют. Но мы надеемся, что они помогут студентам разумно организовать подготовку к экзамену: не изучать более ‘сложных’ пунктов программы, пока не изучены более ‘простые’. Пунктами ‘на 5 и меньше’ студенты (и преподаватели) могут пользоваться в дальнейших курсах (без повторения материала).

«Без доказательства» сокращается до «б/д». В пунктах программы приводятся ссылки на вышеуказанную книгу (или на имеющийся в ней список литературы или на другую литературу).

Образцы вопросов приведены после программы.

Глава 2. Графы (1-й семестр)

1. (3) Определение графа, графов с петлями и кратными ребрами. Ориентированные графы. Соотношение между числом вершин и ребер дерева. (П. 2.1 и задачи 2.2.1.)
2. (5) Код Прюфера. Формула Кэли. (Задачи 2.2.3.а и 2.2.4.с.)
3. (6) Точная формула для числа унициклических графов. (Задача 2.2.5.б.)
4. (5) Определение плоских и планарных графов. Формула Эйлера (б/д). Примеры непланарных графов. Критерий Понтрягина–Куратовского планарности графов (б/д). (П. 2.4 и задачи 2.4.2.)
5. (в 2017 не обязательно) (6) Классификация правильных многогранников с точностью до изоморфизма их графов. 6-раскрашиваемость любой карты на плоскости. (Задачи 2.4.3.cdefg и 2.4.4.а.)

- 6.** (3) Пути и циклы. Простые пути и циклы. Критерии эйлеровости графа и ориентированного графа. (Задачи 2.5.3.ас.)
- 7.** (5) Последовательности и графы де Брёйна.
(в 2017 не обязательно) Правило «ноль лучше единицы».
(Задачи 2.5.5–2.5.8.)
- 8.** (5) Гамильтоновы пути и циклы. Достаточное условие Дирака гамильтоновости графа. (Задача 2.6.2.б.)
- 9.** (7) Вершинная связность и число независимости графа. Достаточное условие гамильтоновости в их терминах. Гамильтоновость графа 1-пересечений 3-элементных подмножеств n -элементного множества. (Задачи 2.6.3, 2.6.4 и 2.6.5.с.)
- 10.** (3) Гамильтоновы цепи в турнирах. Нижняя оценка с доказательством, верхняя — без. (Задача 2.6.7.)
- 11.** (5) Теорема Турана о числе ребер в графе с данным числом вершин и числом независимости. Асимптотика наибольшего числа ребер в графе с n вершинами без k -клик. (Задачи 2.7.1 и 6.1.2.)
- 12.** (6) Оценка числа ребер у дистанционного графа на плоскости и в пространстве произвольной размерности. Сравнение с теоремой Турана. (Задачи 2.7.2, 2.7.4, 2.7.5.)

Глава 3. Раскраски графов (1-й семестр)

- 13.** (4) Соотношения между хроматическим числом, числом независимости и кликовым числом. (Задача 3.1.3.)

Глава 4. Основы теории Рамсея (2-й семестр)

- 14.** (3) Числа Рамсея $R(s, t)$: точные значения для $s + t \leq 7$. Рекуррентная верхняя оценка Эрдеша–Секереша. (Задачи 4.1.1, 4.1.2.ас.)
- 15.** (4) Следствие рекуррентной верхней оценки Эрдеша–Секереша для недиагональных и диагональных чисел Рамсея. Уточнение Конлона (б/д). Нижняя оценка диагональных чисел Рамсея с помощью простого вероятностного метода. (Задачи 4.1.2.б, 4.1.5.)

- 16.** (5) Многоцветные числа Рамсея $R_k(l_1, \dots, l_r)$ и их рекуррентная верхняя оценка. Следствие для $R_3(s, t)$. Нижняя вероятностная оценка для $R_3(s, s)$. (Задачи 4.2.2.b, 4.2.7, 4.3.3, 4.3.4.)
- 17.** (8) Верхняя оценка Конлона для двудольных чисел Рамсея: лемма с конкретными l, m, r, s и ее аналог с последовательностями (б/д); доказательство оценки с использованием леммы. (Есть оригинальная статья Conlon'a, скачивается с его домашней страницы.)
- 18.** (8) Конструктивная нижняя оценка Франкла–Уилсона для $R(s, s)$. Доказательство лемм для кликового числа и для числа независимости. [R3]
- 19.** Удалено

Глава 5. Системы множеств (гиперграфы) (20-27 1-й семестр, 22-31 2-й семестр)

- 20.** (7) Гиперграфы. Гиперграфы t -пересечений. Теорема Эрдеша–Ко–Радо (о максимальном числе ребер в гиперграфе 1-пересечений). (Задача 5.1.3.)
- 21.** (7) (5-6) История последовательных продвижений: теорема Эрдеша–Ко–Радо (общий случай), теорема Франкла, теорема Уилсона, теорема Алсведе–Хачатряна. (Все б/д, но с подробными комментариями. Нужно продемонстрировать четкое понимание, что за параметры выбираются в теореме АХ: когда эта теорема превращается в ЭКР; когда оценка становится тривиальной $\binom{n}{k}$); примеры конструкций, в которых можно явно посчитать, что оценка ЭКР не самая лучшая и АХ ее превосходит.) (Задачи 5.1.2, 5.1.3.)
- 22.** (3) Системы общих представителей (с.о.п.). «Тривиальные» нижние и верхние оценки.
- 23.** (5) Верхняя оценка размера минимальной с.о.п. с помощью жадного алгоритма. (Задачи 5.2.1, 5.2.5, 5.2.6.a.)
- 24.** (8) Конструктивная нижняя оценка размера минимальной с.о.п. (Задача 5.2.6.b.)

- 25.** (7) Нижняя оценка размера минимальной с.о.п. с помощью обобщенных с.о.п. (Задача 5.2.6.c.)
- 26.** (9) Вероятностная нижняя оценка размера минимальной с.о.п. Следствие из нее. (Задача 5.2.6.def.)
- 27.** (5) Системы различных представителей. Теорема Холла.
- 28.** (5) Перманент. Формула разложения по строке. Связь с количеством систем различных представителей.
- 29.** (6) С.о.п. в геометрии (теорема о треугольниках на плоскости). Размерность Вапника–Червоненкиса. Теорема Радона (б/д). Подсчет размерности семейства полупространств. Лемма о числе областей в пространстве заданной мощности и размерности. Лемма о размерности измельчения (достаточно доказать существование верхней оценки, не обязательно такой, как на лекции) (Задачи 5.5.1 и 5.5.2.bc.)
(только в 2014-16) Оценка числа подмножеств в семействе заданной размерности на n -элементном множестве. (Задача 5.5.9.)
- 30.** (8) Эпсилон-сети. Теорема Вапника–Червоненкиса об эпсилон-сетях и теорема о треугольниках как частный случай.
- 31.** (5) Теорема Вапника–Червоненкиса (б/д). Приложения в статистике: равномерная сходимости в ЗБЧ (УЗБЧ) и теорема Гливенко–Кантелли как частный случай.

Глава 6. Аналитические и вероятностные методы (32-36 1-й семестр, 37-50 2-й семестр)

- 32.** (3) (3) Оценки для факториалов и биномиальных коэффициентов. Оценки для $\binom{n}{n/2}$ с помощью тождества. (Задачи 6.1.7.a и 6.1.5.ab.)
- 33.** (5) Асимптотика $\ln n!$ и $\sqrt[n]{n!}$ с доказательством без использования формулы Стирлинга. Формула Стирлинга (б/д). (Задача 6.1.6.)
- 34.** (5) Оценки биномиальных коэффициентов вида $\binom{n}{[an]}$, $a \in (0, 1)$. Аналогичный результат для полиномиальных коэффициентов. (Задача 6.1.5.cdef.)

- 35.** (5) Асимптотика для $\binom{n}{k}$ при $k^2 = o(n)$. Оценки той же величины при больших k . Асимптотики для $\binom{n}{n/2} / \binom{n}{n/2-x}$. (Задача 6.1.7.bcde.)
- 36.** (8) Асимптотика числа унициклических графов. (Задача 6.1.12.b.)
- 37.** (5) Симметричный случай ЛЛЛ (б/д). Вывод оценки диагонального числа Рамсея (теорема Спенсера). (Задачи 6.2.15, 6.2.23.b и 6.2.28.a.)
- 38.** (6) Симметричный и несимметричный случай ЛЛЛ (с доказательством симметричного либо напрямую, либо с доказательством несимметричного и выводом из него). (Задачи 6.2.15 и 6.2.28.a.)
- 39.** (10+) Вывод из несимметричного случая ЛЛЛ нижней оценки для $R(3, t)$ (с выписыванием неравенств, требуемых для применения ЛЛЛ, но без их доказательства). Самые точные известные оценки для $R(3, t)$ (б/д). (Задача 6.2.28.b и замечание после нее.)
- 40.** (5) Двудольные числа Рамсея: нижние оценки простым вероятностным методом и с помощью ЛЛЛ. Отличие нижних оценок для двудольных чисел Рамсея от аналогичных нижних оценок для $R(s, t)$. (Литературы нет; делается совершенно аналогично тому, как то же самое делается для обычных чисел Рамсея.)
- 41.** (6) Случайные графы. Неравенства Маркова и Чебышёва. Неравенство для случайного блуждания. (п. 6.3, [R4, п. 1.11 и 1.12])
- 42.** Совмещено со следующими.
- 43.** (7) Связность случайного графа: случай $p = c \ln n/n$ при $c < 1$. Теоремы о $\frac{\ln n + \gamma + o(1)}{n}$ и о гигантской компоненте (б/д). [R4, п. 2.5]
- 44.** (8) Связность случайного графа: случай $p = c \ln n/n$ при $c > 1$. [R4, п. 2.5]
- 45.** (4) Теоремы Боллобаша о хроматическом числе случайного графа (б/д). Оценки хроматического числа случайного графа при $p = o(1/n^2)$ и $p = o(1/n)$. [R4, п. 2.6]

46. (9) Теоремы Боллобаша о хроматическом числе случайного графа (б/д). Оценки хроматического числа случайного графа при $p = c/n$, $c < 1$. Случай, когда функция из второй теоремы Боллобаша может стремиться к бесконечности. [R4, п. 2.6]

47. (только в 2017) (8) Оценка отклонения для липшицевой по вершинам случайной величины (б/д). Теорема Боллобаша о концентрации в четырех значениях.

48. (7) Сравнение оценок хроматического числа через кликовое число и число независимости в терминах случайных графов: одна «почти всегда» значительно лучше другой (распределение кликового числа и числа независимости). [R4, п. 2.7]

49. (10) Теорема о том, что почти наверное жадный алгоритм найдет множество, размер которого лишь, как максимум, в 2 раза отличается от реального. Теорема Кучеры о слабости жадного алгоритма на специальных графах (б/д). (А. Райгородский, "Экстремальные задачи теории графов и Интернет" , Интеллект.)

50. (8) Теорема Эрдеша о графе с большим обхватом и большим хроматическим числом. (Задача 6.3.3.с.)

Глава 7. Алгебраические методы (51-58 1-й семестр, 59-62 2-й семестр)

51. (5) Кнезеровский граф. Верхняя оценка его хроматического числа. Простые нижние оценки. Примеры конкретных кнезеровских графов. Кликовое число и число независимости кнезеровского графа. ([R7] := А. Райгородский, "Гипотеза Кнезера и топологический метод в комбинаторике МЦНМО.)

52. (6) Верхняя оценка хроматического числа кнезеровского графа. Теорема Ловаса о хроматическом числе кнезеровского графа (б/д; с доказательством — на '8'). [R7]

53. (только в 2014-16) (7) Теорема Борсука–Улама–Люстерника–Шнирельмана в разных формулировках, но с доказательством только в случае плоскости и трехмерного пространства. [R7]

- 54.** (6) Максимальное число $m(n, k, t)$ подмножеств n -элементного множества, в каждом из которых ровно k элементов и среди которых любые два множества пересекаются не по t элементам. Точное значение для $m(n, 3, 1)$: явная конструкция и оценка по индукции. Линейно-алгебраическая оценка для $m(n, 3, 1)$. Аналогичная оценка для $m(n, 5, 2)$ и ее асимптотическая неулучшаемость. [R1]
- 55.** (6) Общая теорема Франкла–Уилсона для $m(n, k, k - p)$ при $k < 2p$. (Задача 7.1.8 и [R1].)
- 56.** (только в 2015) (9) Теорема Франкла–Уилсона об $m(n, k, k - p)$ при $k \geq 2p$. [R1]
- 57.** (только в 2015) (7) Точность обеих теорем Франкла–Уилсона при постоянных k, t . Максимальное число k -элементных подмножеств n -элементного множества, из которых любые два множества пересекаются не более чем по t элементам. Связь с теорией кодирования, теорема Редля (б/д). [R1]
- 58.** (6) Хроматические числа пространств. Интерпретация величины $m(n, k, t)$ как числа независимости дистанционного графа. Нижняя оценка хроматического числа пространства с помощью результатов для $m(n, k, t)$. Возможные улучшения. ([R1] и А. Райгородский, "Хроматические числа".)
- 59.** (5) Матрицы Адамара. Необходимое условие существования. Гипотеза Адамара. Нормализация. Теорема о плотности порядков матрицы Адамара в натуральном ряде (б/д). (Задачи 7.2.1-7.2.3, определения и гипотеза в §7.2, [Hal, AS].)
- 60.** (6) Приложения матриц Адамара к задаче о раскраске гиперграфа: определение уклонения, верхняя оценка вида $\sqrt{2n \ln(2s)}$ с доказательством и оценка вида $6\sqrt{n}$ (б/д). [R3]
- 61.** (8) Приложения матриц Адамара к задаче о раскраске гиперграфа: нижняя оценка с помощью матриц Адамара. [R3]
- 62.** (4) Интерпретация матриц Адамара в терминах дистанционного графа, возникающего в теореме Франкла–Уилсона (клики и независимые множества).

ОБРАЗЦЫ ВОПРОСОВ НА ЭКЗАМЕНЕ

Предварительная часть (вариант 2014 года). *Нужен только ответ/формулировка; доказательства приводить не нужно.*

1. Найдите асимптотику биномиального коэффициента $\binom{n}{k}$ при $k^2 = o(n)$.

2. Найдите количество деревьев с данными n вершинами, с точностью до изоморфизма.

3. Дайте определение гамильтонова цикла в графе. (Можно использовать только определение графа. Если Вы используете другие определения — например, цикла — то их тоже нужно дать.)

4. Сформулируйте теорему о хроматическом числе случайного графа в модели $G(n, p)$ при $p = o(1/n)$ и $n \rightarrow \infty$.

5. У дистанционного графа на плоскости $4n$ вершин, и среди любых $n+1$ вершин есть ребро. Сформулируйте наилучшую оценку на количество ребер такого графа, доказанную в курсе.

6. Найдите кликовое число графа, вершины которого — все 5-элементные подмножества 20-элементного множества, и ребро между вершинами проводится в том и только в том случае, когда множества не пересекаются?

7. Найдите $R_4(15, 4, 4, 4)$.

8. Найдите максимальную VC-размерность семейства подмножеств множества $\{1, \dots, 10\}$ в каждом подмножестве которого более 5 элементов.

Основная часть (точно таких вопросов на экзамене не будет). *Здесь главное — не ответы, а доказательства. В частности, формулировки и доказательства всех используемых студентом результатов из курса ДА (в частности, всех результатов из курса ДА, используемых для доказательства других результатов из курса ДА). При этом можно пользоваться без доказательства результатами из других курсов.*

Вопрос из билета. Существует ли 57 подмножеств 60-элементного множества, в каждом из которых 30 элементов, и любые два из которых пересекаются по 15 элементам?

Критерии. Максимальное количество очков 7.

Конструкция с использованием задачи 7.2.4 без ее доказательства — 2 очка.

За подсказку ‘вспомните матрицы Адамара’ снимается 2 очка.

Доп. вопрос попроще. Каково наибольшее число ребер в графе с 52 вершинами, в котором среди любых 5 вершин есть 2, не соединенные ребром?

Критерии. Максимальное количество очков 6.

Правильный ответ без доказательства — 1 очко.

Правильный ответ с выводом из теоремы Турана без ее доказательства — 2 очка.

Правильный ответ с выводом из теоремы Турана плюс конструкция ‘максимального графа’ без доказательства верхней оценки — 3 очка.

За подсказку ‘вспомните теорему Турана’ снимается 2 очка.

Доп. вопрос посложней. Укажите функцию $f(n)$, для которой $R(n, n) \gtrsim f(n)$. (Чем больше функция, тем выше Ваша оценка.)

Критерии. Максимальное количество очков 9.

За оценку типа $R(n, n) \gtrsim n^2$ ставится 1 очко.

За оценку типа 4.1.5.b ставится 6 очков.

За оценку типа 6.2.21.b ставится 9 очков.

Если при этом не доказывається неравенство $n! \geq (n/e)^n$ (6.1.6.c), то снимается 2 очка (это неравенство несложно доказывається без использования формулы Стирлинга; его вывод из формулы Стирлинга, не доказанной в курсе, не считается доказательством).

Если при этом не доказывається ЛЛЛ в симметричной форме (6.2.15.b), то снимается 5 очков (ЛЛЛ в симметричной форме студент может либо напрямую, либо *доказав* ЛЛЛ в несимметричной форме и выведя ЛЛЛ в симметричной форме; вывод симметричной формы из несимметричной в этом месте не считается доказательством симметричной, хотя и входит в программу).

За подсказку — формулировку 4.1.5.c — снимается 2 очка. За подсказку — формулировку каждого следующего пункта этой задачи — снимается еще по 1.

Призовой вопрос. Существуют ли хотя бы одно k и подмножество k -мерного пространства, которое невозможно разбить на $2k^2$ частей меньшего диаметра?