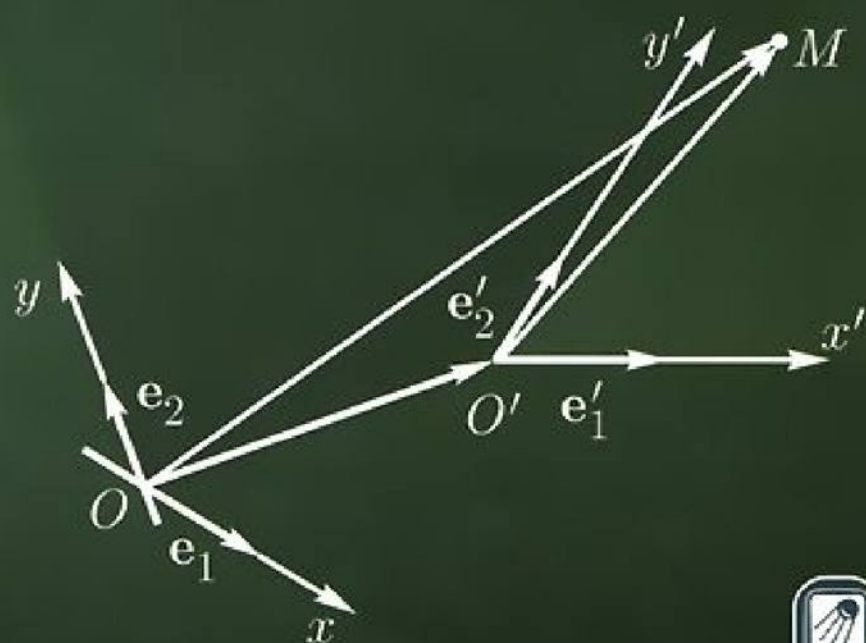


А.И. НОВИКОВ

НАЧАЛА ЛИНЕЙНОЙ АЛГЕБРЫ И АНАЛИТИЧЕСКАЯ ГЕОМЕТРИЯ



А.И. НОВИКОВ

НАЧАЛА ЛИНЕЙНОЙ АЛГЕБРЫ И АНАЛИТИЧЕСКАЯ ГЕОМЕТРИЯ

Допущено Научно-методическим советом по математике
Министерства образования и науки Российской Федерации
в качестве учебного пособия для студентов технических направлений
и специальностей вузов: 200100 «Приборостроение», 210100 «Электроника
и наноэлектроника», 201000 «Биотехнические системы и технологии»,
210400 «Радиотехника», 210700 «Инфокоммуникационные технологии
и системы связи», 220400 «Управление в технических системах»,
230400 «Информационные системы и технологии»,
240100 «Химическая технология»



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2015

УДК 512.64: 514.12

ББК 22.143

Н73

Новиков А.И. **Начала линейной алгебры и аналитическая геометрия.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. — 376 с. — ISBN 978-5-9221-1618-3.

Учебное пособие содержит подробное изложение в доступной форме теоретического материала, в основном с доказательствами утверждений, решения типовых задач, вопросы для самоконтроля и обширную подборку задач для самостоятельного решения.

Допущено Научно-методическим советом по математике Министерства образования и науки Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов технических направлений и специальностей вузов: 200100 «Приборостроение», 210100 «Электроника и нанoeлектроника», 201000 «Биотехнические системы и технологии», 210400 «Радиотехника», 210700 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 220400 «Управление в технических системах», 230400 «Информационные системы и технологии», 240100 «Химическая технология».

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	8
Глава 1. Матричная алгебра. Определители. Системы линейных алгебраических уравнений	12
§ 1. Матричная алгебра	12
1.1. Классификация матриц	12
1.2. Линейные операции над матрицами	16
1.2.1. Сложение матриц (16). 1.2.2. Умножение матрицы на число (17).	
1.3. Умножение матриц	18
1.4. Транспонирование матриц	22
Вопросы для самоконтроля к § 1	23
§ 2. Теория определителей	24
2.1. СЛАУ и определители второго порядка	24
2.2. СЛАУ и определители третьего порядка	28
Вопросы для самоконтроля к пп. 2.1–2.2	37
2.3. Определители n -го порядка	38
2.3.1. Миноры и алгебраические дополнения (38).	
2.3.2. Свойства определителей (42).	
Вопросы для самоконтроля к п. 2.3	60
Ответы	61
§ 3. Обратная матрица. Правило Крамера	61
3.1. Обратная матрица	61
3.2. Решение матричных уравнений	70
Вопросы для самоконтроля к пп. 3.1–3.2	71
Ответы и указания	72
3.3. Правило Крамера — общий случай	72
Вопросы для самоконтроля к п. 3.3	77
Ответы	78
§ 4. Метод Гаусса	78
4.1. Определения	78
4.2. Общая идея и алгоритм метода Гаусса	81
4.3. Примеры решения СЛАУ методом Гаусса	84
4.4. Применение метода Гаусса к однородным СЛАУ	88
Вопросы для самоконтроля к § 4	91
Ответы	92
Упражнения	93
Ответы	95

Глава 2. Общая теория систем линейных алгебраических уравнений	98
§ 5. n -мерное арифметическое пространство	98
§ 6. Линейная зависимость векторов	101
§ 7. Базис пространства $\mathbb{R}^n$	105
§ 8. Скалярное произведение и норма	110
§ 9. Ранг системы векторов. Ранг матрицы	117
Вопросы для самоконтроля к § 5–9	127
§ 10. Общая теория систем линейных уравнений	128
10.1. Теорема Кронекера–Капелли	128
10.2. Свойства решений однородной и неоднородной СЛАУ	130
10.3. Структура решений однородной СЛАУ	131
10.4. Структура решений неоднородной СЛАУ	135
Вопросы для самоконтроля к § 10	139
Упражнения	139
Ответы	142
Глава 3. Векторная алгебра	144
§ 11. Скалярные и векторные величины	144
§ 12. Линейные операции над векторами	145
Вопросы для самоконтроля к § 11–12	151
§ 13. Линейная зависимость и независимость векторов	151
§ 14. Базис векторного пространства	154
§ 15. Координаты вектора в базисе	156
Вопросы для самоконтроля к § 13–15	159
Ответы и указания	159
§ 16. Понятие об изоморфизме линейных пространств	160
§ 17. Проекция вектора на ось	162
§ 18. Ортогональные и ортонормированные базисы. Системы координат	165
18.1. Ортогональные и ортонормированные базисы	165
18.2. Аффинные системы координат	166
18.3. Декартовы прямоугольные системы координат	168
18.4. Направляющие косинусы	171
§ 19. Полярная система координат на плоскости	172
§ 20. Цилиндрическая и сферическая системы координат	175
Вопросы для самоконтроля к § 19–20	179
Ответы	179
§ 21. Скалярное произведение векторов	180
21.1. Определения, свойства	180
21.2. Скалярное произведение в координатной форме	182
§ 22. Векторное и смешанное произведения векторов	185

22.1. Векторное произведение: определения, свойства	185
22.2. Смешанное произведение: определения, свойства	187
§ 23. Векторное и смешанное произведения в координатной форме	189
23.1. Векторное произведение	189
23.2. Смешанное произведение	191
23.3. Геометрические приложения векторного и смешанного произведений	192
Вопросы для самоконтроля к § 21–23	194
Ответы и указания	196
Упражнения	196
Ответы	198
Глава 4. Прямая на плоскости	199
§ 24. Уравнение линии на плоскости. Уравнения поверхности и линии в пространстве	199
24.1. Уравнение линии на плоскости	199
24.2. Уравнения поверхности и линии в пространстве	201
§ 25. Параметрические и канонические уравнения прямой на плоскости	204
§ 26. Общее уравнение прямой.	206
§ 27. Уравнение прямой, проходящей через две заданные точки. Уравнение прямой в отрезках	209
§ 28. Уравнение прямой с угловым коэффициентом.	211
§ 29. Взаимное расположение двух прямых. Частные случаи расположения прямой.	213
29.1. Взаимное расположение двух прямых	213
29.2. Частные случаи расположения прямой	216
§ 30. Расстояние от точки до прямой	217
§ 31. Угол между двумя прямыми на плоскости	220
§ 32. Нормальное уравнение прямой.	223
§ 33. Уравнение пучка прямых.	226
Вопросы для самоконтроля к гл. 4	227
Упражнения	228
Ответы	229
Глава 5. Плоскость и прямая в пространстве.	230
§ 34. Уравнение плоскости, проходящей через заданную точку перпендикулярно заданному вектору	230
§ 35. Общее уравнение плоскости	231
§ 36. Уравнение плоскости, проходящей через заданную точку параллельно двум неколлинеарным векторам	232
§ 37. Уравнение плоскости, проходящей через три точки	234
§ 38. Уравнение плоскости в отрезках	235

§ 39. Взаимное расположение двух плоскостей	237
§ 40. Частные случаи расположения плоскости	239
§ 41. Расстояние от точки до плоскости	240
§ 42. Угол между двумя плоскостями	241
§ 43. Нормальное уравнение плоскости	242
§ 44. Прямая в пространстве	243
44.1. Уравнения прямой	243
44.1.1. Общее уравнение прямой (243). 44.1.2. Параметрические и канонические уравнения прямой (244).	
44.2. Взаимное расположение двух прямых в пространстве	246
44.3. Угол между двумя прямыми в пространстве	247
44.4. Угол между прямой и плоскостью	248
§ 45. Типовые задачи	249
Вопросы для самоконтроля к гл. 5	254
Упражнения	256
Ответы	257
Глава 6. Алгебраические кривые второго порядка	259
§ 46. Общие понятия	259
§ 47. Эллипс	260
47.1. Вывод и исследование канонического уравнения	260
47.2. Директрисы эллипса	265
47.3. Параметрические уравнения эллипса	267
Вопросы для самоконтроля к § 47	269
§ 48. Гипербола	270
48.1. Вывод и исследование канонического уравнения	270
48.2. Директрисы гиперболы	277
Вопросы для самоконтроля к § 48	280
§ 49. Парабола	281
§ 50. Полярное уравнение эллипса, гиперболы и параболы	285
§ 51. Оптические свойства эллипса и параболы	289
Упражнения	293
Ответы	294
Глава 7. Приведение общего уравнения кривой второго порядка к каноническому виду	295
§ 52. Переход от одной аффинной системы координат к другой	295
§ 53. Связь между координатами точки в различных прямоугольных системах координат	297
§ 54. Приведение общего уравнения кривой второго порядка к каноническому виду	299
54.1. Многообразие канонических уравнений	299
54.2. Приведение кривой второго порядка к каноническому виду	301

Вопросы для самоконтроля к гл. 7	312
Ответы и указания	312
Упражнения	312
Ответы	313
Глава 8. Алгебраические поверхности второго порядка . . .	315
§ 55. Общее и канонические уравнения поверхности	315
§ 56. Исследование поверхностей методом сечений	318
56.1. Эллипсоид	318
56.2. Однополостный гиперболоид	320
56.3. Двуполостный гиперболоид	322
56.4. Конус (коническая поверхность)	323
56.5. Эллиптический параболоид	325
56.6. Гиперболический параболоид	326
56.7. Цилиндрические поверхности	327
56.7.1. Эллиптический цилиндр (328). 56.7.2. Гипербо- лический цилиндр (328). 56.7.3. Параболический ци- линдр (328).	
Упражнения	330
Ответы	331
Глава 9. Численные методы решения систем линейных уравнений	332
§ 57. Особенности численных алгоритмов на примере метода Гаусса	332
§ 58. Метод квадратных корней	337
58.1. Идея метода	337
58.2. Факторизация матрицы A	338
58.3. Решение треугольных систем уравнений	342
58.4. Требуемые ресурсы ЭВМ и число операций	343
58.5. Выводы	345
58.6. Пример	346
§ 59. Метод итераций	347
59.1. Алгоритм метода. Примеры	347
59.2. Исследование сходимости метода итераций	352
59.3. Требуемые ресурсы ЭВМ и число операций	358
59.4. Модификации метода итераций	359
§ 60. Нормальные СЛАУ	362
§ 61. Метод прогонки	363
61.1. Постановка задачи	363
61.2. Алгоритм метода	365
61.3. Требуемые ресурсы ЭВМ и число операций	366
Заключение к главе 9	368
Список дополнительной литературы	371

Предисловие

В технических вузах, в отличие от классических университетов, курсы дисциплины «Математика» для большинства специальностей изучаются последовательно. Порядок следования курсов сложился еще в советский период и с небольшими вариациями сохраняется в настоящее время. Первым математическим курсом, с которым встречается новоиспеченный студент втуза, является линейная алгебра и аналитическая геометрия.

Курс линейной алгебры и аналитической геометрии (в некоторых вариантах — аналитической геометрии и линейной алгебры) хотя и является классическим, но, в отличие от более стабильного курса математического анализа, имеет многочисленные авторские варианты, как по структуре, так и по содержанию. Об этом свидетельствует большое число новых учебников и учебных пособий по линейной алгебре и аналитической геометрии, изданных в последнее десятилетие. Они адресованы определенной, иногда достаточно узкой, аудитории и при этом имеют различные целевые установки, степень доказательности утверждений, форму общения с читателем (строгая, академическая или более свободная, приглашающая читателя к участию в построении теории и решении типовых задач).

Основное отличие предлагаемого курса от традиционных редакций заключается в том, что оно делится на две части. Первая, включающая в себя матричную алгебру, теорию определителей и общую теорию систем линейных уравнений, а также векторную алгебру и аналитическую геометрию, читается студентам в первом семестре. Завершается эта часть курса блоком численных методов решения систем линейных алгебраических уравнений. Весь этот материал и составляет содержание настоящей книги. Она включает в себя четыре раздела: линейную алгебру (главы 1 и 2), векторную алгебру (глава 3), аналитическую геометрию (главы 4–8) и численные методы линейной алгебры (глава 9).

Затем изучаются следующие разделы математического анализа: введение в анализ, дифференциальное исчисление и его приложения к исследованию функций одной переменной, неопределенный, определенный и несобственный интегралы. После этого (перед изучением дифференциального исчисления функций многих переменных) происходит возвращение к линейной алгебре.

Вторая часть курса линейной алгебры включает в себя: теорию конечномерных линейных пространств, евклидовы, нормированные и метрические пространства; теории линейных операторов.

ров и квадратичных форм. Здесь же, в рамках второй части, изучаются основы функционального анализа. Объем и конкретное наполнение этого блока меняются в зависимости от специальности и качественного состава аудитории. Материал второй части курса будет изложен в книге «Линейная алгебра и элементы функционального анализа».

Аргументы в пользу описанной компоновки курса таковы. В первом семестре большинство студентов с трудом осваивают более простые разделы первой части курса и лишь единицы из них уже «созрели» для изучения теории абстрактных линейных пространств и линейных операторов. Разделение курса на две части и разнесение их изучения во времени создает более комфортные условия для освоения студентом новой технологии переработки более плотного, по сравнению со средней школой, потока информации. Это первый аргумент.

Второй аргумент в пользу описанной структуры курса — объединение теории конечномерных линейных пространств с теорией функциональных пространств. Такой подход позволяет перевести изучение важных разделов математического анализа на новый, более высокий, уровень обобщения. В первую очередь это относится к теории рядов Фурье. Знакомство студентов с основами функционального анализа позволяет начинать изучение теории рядов Фурье в третьем семестре с построения разложения функции f класса L_2 по произвольной полной ортогональной системе функций.

Еще одна особенность пособия заключается в следовании принципу: от простого — к сложному, от частного — к общему. В итоге пособие в некоторых разделах имеет два уровня изучения материала. Например, системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) сначала изучаются в частном случае СЛАУ второго и третьего порядков, знакомых первокурсникам со школьной скамьи. Естественным образом вводятся определители второго и третьего порядков, выводятся формулы Крамера. Здесь же на примере определителей третьего порядка с помощью тождественных преобразований выводятся основные свойства определителей. Этот материал (§ 1, § 2 без п. 2.3.2) вместе с методом Гаусса исследования совместности и решения СЛАУ (§ 4) составляет содержание первого, минимального уровня знакомства студента с теорией систем линейных уравнений, матричной алгеброй и теорией определителей.

В п. 2.3.2 теория определителей n -го порядка изучается уже на другом, более высоком, уровне с выводом свойств определителей в общем случае. Изучению свойств систем линейных

алгебраических уравнений и их решений в общем случае (на втором уровне) посвящена целая глава (гл. 2).

По такой же схеме (от простого к сложному) изучаются алгебраические кривые второго порядка. Сначала выводятся и исследуются канонические уравнения эллипса, гиперболы и параболы. Это первый уровень знакомства с кривыми второго порядка. На втором уровне изучаются преобразования систем координат на плоскости и в пространстве, исследуется общее уравнение кривой второго порядка, устанавливается всё многообразие кривых, задаваемых общим уравнением.

Несмотря на формирующиеся тенденции исключать численные методы решения систем линейных уравнений из лекционных курсов по математике, они включены в пособие (гл. 9). Исключение данного раздела некоторые авторы обосновывают тем, что сейчас имеется большое число пакетов прикладных программ, реализующих широкий набор приближенных методов решения соответствующих задач. Действительно, никто не решает сейчас большеразмерные задачи на калькуляторе. Вместе с тем, обращаясь к тому или иному пакету, специалист должен ясно представлять, какие общие и частные проблемы могут возникнуть при реализации на ЭВМ того или иного алгоритма. Об этих проблемах удобно рассказать на примере методов решения систем линейных уравнений.

Все разделы пособия содержат большое число примеров: решенных типовых и для самостоятельной работы. В условиях малого объема аудиторного времени, отводимого на практические занятия, пособие может использоваться и как задачник. Подбор примеров и их количество обеспечивают такую возможность. Естественно, что объединение в пособии теоретического материала с решением типовых задач и обширной подборкой задач для самостоятельного решения не могло не повлиять на объем пособия. Он довольно большой для учебной литературы по данному курсу. Автор надеется, что это оправдывается определенной универсальностью пособия.

Пособие адресовано в первую очередь студентам технических вузов, а выпускник технического вуза должен владеть развитым алгоритмическим мышлением. Поэтому в пособии алгоритмическая линия поддерживается всюду, где это уместно, явной записью алгоритма (например, алгоритм умножения матриц, алгоритм нахождения обратной матрицы, алгоритм решения системы линейных уравнений методом Гаусса и т. п.).

Еще одна особенность пособия — запись, параллельно с полной словесной формулировкой утверждения, его символического

аналога с использованием логической символики. Такой подход позволяет студенту, с одной стороны, осознать целесообразность использования логической символики, а с другой, научиться применять ее хотя бы на минимальном уровне.

Каждая глава пособия, а в некоторых главах каждый параграф, завершается вопросами для самоконтроля. Всё вместе взятое позволяет рассматривать пособие как основу учебно-методического комплекса по линейной алгебре и аналитической геометрии.

Нумерация теорем, определений, формул, примеров, задач и рисунков двойная. Первое число в паре означает номер главы, второе — порядковый номер теоремы (определения и т. д.) в рамках данной главы. Окончание доказываемого утверждения, а также завершение задачи или примера, не снабженного ответом, отмечается значком ■.

Автор считает своим долгом выразить благодарность доктору физико-математических наук, профессору В.В. Миронову и кандидату технических наук, доценту Г.С. Орлову — за тщательное прочтение рукописи книги и ценные замечания, а также выражает особую благодарность Т.Д. Мурзовой за огромный труд по компьютерному набору рукописи пособия.

Автор надеется, что пособие будет интересно в первую очередь тем студентам, которые имеют высокий уровень мотивации, большое желание получить полноценные знания и потому готовы самостоятельно работать с книгой. Пособие может представлять интерес и для начинающих преподавателей.

Глава 1

МАТРИЧНАЯ АЛГЕБРА. ОПРЕДЕЛИТЕЛИ. СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

§ 1. Матричная алгебра

1.1. Классификация матриц

Во многих теоретических и прикладных задачах часто приходится исследовать и решать системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). В курсе элементарной математики рассматриваются системы двух линейных уравнений с двумя неизвестными и трех уравнений с тремя неизвестными. Решение таких систем не представляет особого труда.

В реальных задачах число уравнений и число неизвестных в СЛАУ могут достигать десятков и сотен тысяч. Исследование и решение подобных систем уже невозможно без специального математического аппарата. Важной составной частью общей теории СЛАУ являются понятия *матрицы* и *определителя*.

Определение 1.1. Матрицей A размера $m \times n$ называется прямоугольная таблица

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mj} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}, \quad (1.1)$$

состоящая из m строк и n столбцов, на пересечении которых записаны числа $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{ij}, \dots, a_{mn}$.

Числа, составляющие матрицу, называются *элементами* матрицы и обозначаются строчными буквами с индексами a_{ij} . Индексы i, j , $i \in \{1, 2, \dots, m\}$, $j \in \{1, 2, \dots, n\}$, в указанном порядке определяют положение элемента в матрице: i указывает

номер строки, а j — номер столбца, в которых расположен этот элемент. Будем говорить также, что упорядоченная пара натуральных чисел (i, j) определяет *ячейку* в матрице A .

Матрицы принято обозначать прописными буквами $A, B, C, \dots$. Наряду с круглыми скобками в (1.1) для записи матриц используют также квадратные скобки или сдвоенные параллельные отрезки:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad \text{или} \quad \left\| \begin{array}{cccc} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{array} \right\|.$$

Иногда матрицы записывают в компактной форме $A = (a_{ij})$ ($A = [a_{ij}]$, $A = \|a_{ij}\|$) с указанием в случае необходимости множеств значений, принимаемых индексами i и j . Например, $A = (a_{ij})$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$. Выражение $i = \overline{1, m}$ означает, что индекс i принимает (пробегает) натуральные значения от 1 до m .

Элементы a_{ij} матрицы A могут быть как действительными, так и комплексными. Если все элементы a_{ij} действительные, то матрица A называется *действительной*, если же хотя бы один элемент a_{ij} комплексный, то матрица A называется *комплексной*. Ниже, как правило, рассматриваются действительные матрицы.

Матрицы размера $m \times n$ при $m \neq n$ часто называют *прямоугольными*. Напомним, что матрица A размера $m \times n$ состоит из m строк и n столбцов. В этом случае пишут $\dim A = m \times n$ ($\dim$ — сокращенное от dimension — размер) или $A_{m \times n}$. Если число строк равно числу столбцов ($m = n$), то матрица A называется *квадратной порядка n* и обозначается A_n .

Например, матрица

$$A_3 = \begin{pmatrix} 3 & -2 & 1 \\ 0 & 4 & 5 \\ 7 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

— квадратная порядка 3, а матрица

$$B = \begin{pmatrix} 3 & -2 & 1 & 2 \\ 0 & 4 & 5 & -3 \\ 7 & 1 & 0 & 4 \end{pmatrix}$$

имеет размер 3×4 (3 строки и 4 столбца).

Матрица $A = (a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n)$, состоящая из одной строки, называется *матрицей-строкой* (*вектором-строкой*) или просто

строкой, а матрица $B = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}$ — *матрицей-столбцом* (*векто-*

ром-столбцом) или просто *столбцом*. Матрица-строка A имеет размер $1 \times n$, а матрица-столбец B — размер $m \times 1$.

Матрица размера 1×1 — это таблица, содержащая одно число a .

Матрицы появляются естественным образом при рассмотрении СЛАУ, содержащей m уравнений относительно n неизвестных $x_1, x_2, \dots, x_n$:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2, \\ \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m. \end{cases}$$

Этой СЛАУ можно сопоставить несколько матриц, например:

$$A_{m \times n} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

— *основная матрица СЛАУ*, составленная из коэффициентов при неизвестных;

$$A_{m \times (n+1)} = (A|B) = \left(\begin{array}{cccc|c} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} & b_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} & b_m \end{array} \right)$$

— *расширенная матрица СЛАУ*, которая получается из основной матрицы СЛАУ приписыванием к ней справа столбца свободных членов (отделенного от основной матрицы вертикальной чертой);

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

— *столбец неизвестных СЛАУ*.

Определение 1.2. Матрица, все элементы которой равны нулю, называется *нулевой* и обозначается O (или $O_{m \times n}$):

$$O_{m \times n} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{pmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}.$$

Пусть A — квадратная матрица порядка n :

$$A_n = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}. \quad (1.2)$$

Замечание. Если размер матрицы не имеет значения или из контекста ясно, чему он равен, то нижний индекс в обозначении матрицы можно опускать.

Определение 1.3. *Главной диагональю* матрицы A_n называется диагональ, соединяющая левый верхний и правый нижний углы матрицы. На ней расположены элементы $a_{11}, a_{22}, \dots, a_{nn}$.

Побочной диагональю матрицы A_n называется диагональ, соединяющая правый верхний угол матрицы с левым нижним. На ней расположены элементы $a_{1n}, a_{2,n-1}, \dots, a_{n1}$.

Определение 1.4. Матрица A_n , все элементы которой под главной диагональю равны нулю:

$$A_n = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 0 & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix},$$

называется *верхней треугольной*, а матрица

$$A_n = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

— *нижней треугольной*.

Определение 1.5. Квадратная матрица D_n , все элементы которой, кроме элементов $d_i = a_{ii}$, $i = \overline{1, n}$, на главной диагонали (диагональные элементы), равны нулю, называется *диагональной* и обозначается так:

$$D_n = \begin{pmatrix} d_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & d_2 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & d_n \end{pmatrix}, \quad \text{или} \quad D_n = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_n).$$

Матрица $D_n = \text{diag}(d, d, \dots, d)$ называется *скалярной*.

Определение 1.6. Скалярная матрица, диагональные элементы которой равны 1, называется *единичной* и обозначается

$$E_n = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix}.$$

Определение 1.7. Две матрицы A и B одинакового размера называются *равными*, если выполняется равенство $a_{ij} = b_{ij}$ для всех элементов этих матриц с одинаковыми номерами (i, j) , т. е.

$$A = B \stackrel{\text{def}}{=} \dim A = \dim B \quad \& \quad (a_{ij} = b_{ij} \quad \forall i = \overline{1, m} \quad \forall j = \overline{1, n}).$$

Сравнения (отношения) «больше», «меньше» на множестве матриц не вводятся.

1.2. Линейные операции над матрицами

1.2.1. Сложение матриц

Определение 1.8. Суммой двух матриц $A = (a_{ij})$ и $B = (b_{ij})$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$, одинакового размера $m \times n$ называется матрица $C = (c_{ij})$ того же размера, каждый элемент которой равен сумме соответствующих элементов матриц A и B , т. е.

$$c_{ij} = a_{ij} + b_{ij}, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (1.3)$$

В этом случае пишут $C = A + B$.

Например,

$$\begin{pmatrix} -1 & 2 & 3 \\ 7 & -4 & 9 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 7 & 1 \\ 12 & 5 & -3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1+0 & 2+7 & 3+1 \\ 7+12 & -4+5 & 9-3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 9 & 4 \\ 19 & 1 & 6 \end{pmatrix}.$$

Для любых матриц A, B, C из множества $\{A_{m \times n}\}$ матриц одинакового размера справедливы следующие свойства операции сложения.

1. $A + B = B + A$ (свойство коммутативности).
2. $A + (B + C) = (A + B) + C$ (свойство ассоциативности).
3. $A + O = A$.
4. $A + (-A) = O$.

Здесь $(-A)$ — матрица, противоположная матрице A : если $A = (a_{ij})$, то $(-A) = (-a_{ij})$.

Справедливость приведенных свойств вытекает из аналогичных свойств действительных (комплексных) чисел. Например,

$$A + B = (a_{ij} + b_{ij}) = (b_{ij} + a_{ij}) = B + A;$$

$$A + (-A) = (a_{ij} + (-a_{ij})) = (0) = O.$$

1.2.2. Умножение матрицы на число

Определение 1.9. Произведением матрицы $A_{m \times n}$ на число α (действительное или комплексное) называется матрица B того же размера $m \times n$, каждый элемент b_{ij} которой равен $\alpha \cdot a_{ij}$, т. е.

$$b_{ij} = \alpha \cdot a_{ij}, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (1.4)$$

В этом случае пишут $B = \alpha A$ (или $\alpha \cdot A$). Имеем по определению

$$\alpha \cdot \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha a_{11} & \alpha a_{12} & \cdots & \alpha a_{1n} \\ \alpha a_{21} & \alpha a_{22} & \cdots & \alpha a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \alpha a_{m1} & \alpha a_{m2} & \cdots & \alpha a_{mn} \end{pmatrix}.$$

Таким образом, для умножения матрицы A на число α необходимо каждый элемент матрицы A умножить на это число.

Например,

$$3 \cdot \begin{pmatrix} 7 & 2 \\ -1 & 3 \\ -2 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7 \cdot 3 & 2 \cdot 3 \\ -1 \cdot 3 & 3 \cdot 3 \\ -2 \cdot 3 & 0 \cdot 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 21 & 6 \\ -3 & 9 \\ -6 & 0 \end{pmatrix}.$$

При умножении матрицы A на нуль получается нулевая матрица: $0 \cdot A = O$, а при умножении матрицы A на (-1) получается противоположная матрица: $(-1) \cdot A = -A$.

Операция умножения матрицы на число обладает следующими свойствами:

1. $1 \cdot A = A$ (особая роль числа 1).
2. $\alpha(\beta A) = (\alpha\beta)A$ (свойство ассоциативности относительно умножения на число).

3. $(\alpha + \beta)A = \alpha A + \beta A$ (свойство дистрибутивности относительно суммы двух чисел).

4. $\alpha(A + B) = \alpha A + \alpha B$ (свойство дистрибутивности относительно суммы двух матриц).

Здесь $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ ($\alpha, \beta \in \mathbb{C}$), $A, B \in \{A_{m \times n}\}$. Докажем свойство 4:

$$\begin{aligned} \alpha(A + B) &= (\alpha(a_{ij} + b_{ij})) = (\alpha a_{ij} + \alpha b_{ij}) = \\ &= (\alpha a_{ij}) + (\alpha b_{ij}) = \alpha A + \alpha B. \end{aligned}$$

При доказательстве данного свойства использовано свойство дистрибутивности операции умножения действительных (комплексных) чисел.

Определение 1.10. Множество $\{A_{m \times n}\}$ матриц размера $m \times n$ с введенными на нем операциями сложения матриц и умножения матрицы на число, для которых выполняются четыре свойства сложения матриц и четыре свойства умножения матрицы на число, называется *линейным пространством* $M_{m \times n}$.

1.3. Умножение матриц

Определим сначала произведение строки на столбец с одинаковым количеством элементов в них. Пусть $\mathbf{a} = (a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n)$,

$$\mathbf{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}. \text{ Тогда}$$

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \stackrel{\text{def}}{=} (a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n) \cdot \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} = a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_n b_n. \quad (1.5)$$

Это произведение можно обозначить также $\mathbf{ab}$.

Результатом такого произведения будет некоторое число. Например,

$$(-5 \ 4 \ 7) \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ -2 \end{pmatrix} = (-5) \cdot 2 + 4 \cdot 3 + 7 \cdot (-2) = -12.$$

Пусть теперь даны матрица A размером $m \times n$ и матрица B размером $n \times k$:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} b_{11} & \dots & b_{1j} & \dots & b_{1k} \\ b_{21} & \dots & b_{2j} & \dots & b_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & \dots & b_{nj} & \dots & b_{nk} \end{pmatrix}.$$

Определение 1.11. Произведением матрицы A на матрицу B называется матрица C , в которой каждый элемент c_{ij} равен произведению i -й строки матрицы A на j -й столбец матрицы B .

Умножение строки на столбец производится по формуле (1.5), т. е. для элемента c_{ij} матрицы C будем иметь

$$c_{ij} = (a_{i1} \ a_{i2} \ \dots \ a_{in}) \cdot \begin{pmatrix} b_{1j} \\ b_{2j} \\ \vdots \\ b_{nj} \end{pmatrix} = a_{i1}b_{1j} + a_{i2}b_{2j} + \dots + a_{in}b_{nj}.$$

Произведение матриц A и B обозначается $A \cdot B$ (или AB).

Из определения 1.11 следует, что умножить матрицу A на матрицу B можно только тогда, когда *число столбцов матрицы A равно числу строк матрицы B* . При этом матрица $C = A \cdot B$ будет иметь размер $m \times k$, т. е. число строк m в ней равно числу строк матрицы A , а число столбцов k — числу столбцов матрицы B .

Для выяснения возможности умножения двух матриц *в указанном порядке* (A — первая матрица, B — вторая) целесообразно записать в строчку их размеры: $[m \times n][r \times k]$. Если $n = r$ (число столбцов первой матрицы равно числу строк второй в составе произведения), то умножать матрицы можно. Зачеркивая эти числа, получаем размер матрицы $C = A \cdot B$:

$$\boxed{[m \times \cancel{n}][\cancel{n} \times k] = [m \times k].} \quad (1.6)$$

Соотношение (1.6) называется *правилом размерностей*.

Алгоритм умножения матриц. Для умножения матрицы A на матрицу B следует:

- 1) умножить 1-ю строку матрицы A на 1-й столбец матрицы B — получится элемент c_{11} матрицы C ;
- 2) умножить 1-ю строку матрицы A на 2-й столбец матрицы B — получится элемент c_{12} матрицы C ;

.....

- k) умножить 1-ю строку матрицы A на k -й столбец матрицы B — получится элемент c_{1k} матрицы C .

В результате выполнения операций 1), 2), ..., k) будет сформирована первая строка матрицы C .

Затем последовательно выполняются операции 1), 2), ..., k) для 2-й строки матрицы A и соответствующих столбцов матрицы B . Получатся элементы $c_{21}, c_{22}, \dots, c_{2k}$ 2-й строки матрицы C .

После этого выполняются аналогичные операции для 3-й, 4-й, ..., m -й строк матрицы A и соответствующих столбцов матрицы B . ■

Таким образом, для получения результирующей матрицы $C = A \cdot B$ необходимо выполнить $m \cdot k$ операций умножения строки на столбец по формуле (1.5).

Рассмотрим пример умножения матриц. Пусть

$$A = \begin{pmatrix} 3 & -2 & 1 \\ -1 & 0 & 5 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 & 4 & -1 \\ -6 & 0 & 2 \\ 2 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

— две матрицы размеров 2×3 и 3×3 соответственно.

Произведение матриц AB здесь существует, так как *выполняется правило размерностей* (1.6): $[2 \times 3][3 \times 3] = [2 \times 3]$. Матрица $C = AB$ имеет размер 2×3 :

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} 3 & -2 & 1 \\ -1 & 0 & 5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 4 & -1 \\ -6 & 0 & 2 \\ 2 & -1 & 1 \end{pmatrix} = \\ & = \begin{pmatrix} 3 \cdot 1 + (-2) \cdot (-6) + 1 \cdot 2 & 3 \cdot 4 + (-2) \cdot 0 + 1 \cdot (-1) & 3 \cdot (-1) + (-2) \cdot 2 + 1 \cdot 1 \\ (-1) \cdot 1 + 0 \cdot (-6) + 5 \cdot 2 & (-1) \cdot 4 + 0 \cdot 0 + 5 \cdot (-1) & (-1) \cdot (-1) + 0 \cdot 2 + 5 \cdot 1 \end{pmatrix} = \\ & = \begin{pmatrix} 17 & 11 & -6 \\ 9 & -9 & 6 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Произведение BA этих же матриц в обратном порядке не существует, так как *не выполняется правило размерностей*: число столбцов (3 столбца) первой матрицы не равно числу строк (2 строки) второй матрицы. Уже из приведенного примера следует, что произведение матриц *не перестановочно*.

Определение 1.12. Матрицы A и B называются *коммутирующими*, или *перестановочными*, если $AB = BA$.

Поскольку сравнить можно только матрицы одинакового размера, то и перестановочными могут быть только квадратные матрицы A и B одного порядка. Действительно, если $\dim A = m \times n$, $\dim B = n \times m$, то произведения AB и BA существуют, но $\dim AB = m \times m$, а $\dim BA = n \times n$. Отсюда $\dim AB = \dim BA$ только при $m = n$.

Пусть $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$. Найдем и сравним произведения AB и BA :

$$AB = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 2 & 1 \end{pmatrix};$$

$$BA = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix}.$$

Как видим, $AB \neq BA$.

Может показаться, что $AB \neq BA$ для всех матриц. Это не так. Например, *любая квадратная матрица* A перестановочна со скалярной матрицей того же порядка: $AD = DA$, где $D = \text{diag}(d, d, \dots, d)$, $\dim D = n \times n$. В частности, если $D = E$, то

$$AE = EA = A.$$

Для всякой квадратной матрицы можно найти все матрицы того же порядка, перестановочные с ней. Например, перестановочными с матрицей $A = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$ будут все матрицы

$B = \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \beta & \alpha \end{pmatrix}$, $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ (проверьте!), а перестановочными с матрицей $A = \begin{pmatrix} 3 & -1 \\ 2 & 4 \end{pmatrix}$ являются все матрицы $B = \begin{pmatrix} \alpha & \alpha \\ -2\alpha & 0 \end{pmatrix}$, $\alpha \in \mathbb{R}$ (проверьте!).

Операция умножения матриц обладает следующими свойствами.

1. $(AB)C = A(BC)$ (*свойство ассоциативности*).
2. $A \cdot (B + C) = AB + AC$ (*свойство дистрибутивности*).
3. $(A + B) \cdot C = AC + BC$ (*свойство дистрибутивности*).
4. $(\alpha A)B = A(\alpha B) = \alpha(AB)$.

Предполагается, что матрицы A, B, C здесь имеют согласованные размеры.

Докажем свойство 1. Пусть $\dim A = m \times n$, $\dim B = n \times k$, $\dim C = k \times r$. В соответствии с формулой (1.6)

$$\dim((AB)C) = ([m \times n][n \times k])[k \times r] = [m \times k][k \times r] = [m \times r],$$

$$\dim(A(BC)) = [m \times n]([n \times k][k \times r]) = [m \times n][n \times r] = [m \times r],$$

т. е. все произведения AB , $(AB)C$, (BC) , $A(BC)$ существуют, и размеры матриц $(AB)C$ и $A(BC)$ совпадают. Докажем теперь равенство матриц: $(AB)C = A(BC)$. Имеем

$$\begin{aligned} (AB)C &= \left(\sum_{s=1}^k \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} b_{js} \right) c_{s\ell} \right) \stackrel{1}{=} \left(\sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^k (a_{ij} b_{js}) c_{s\ell} \right) \stackrel{2}{=} \\ &\stackrel{2}{=} \left(\sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^k a_{ij} (b_{js} c_{s\ell}) \right) \stackrel{3}{=} \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} \sum_{s=1}^k (b_{js} c_{s\ell}) \right) = A(BC). \end{aligned}$$

Здесь на шаге 1 изменен порядок суммирования по индексам j и s ; на шаге 2 использовано свойство ассоциативности для произведения действительных чисел; на шаге 3 за знак суммы по индексу s вынесен элемент a_{ij} , не зависящий от этого индекса.

Свойства 2–4 читателю предлагается доказать самостоятельно.

1.4. Транспонирование матриц

Определение 1.13. Матрица, получающаяся из данной $A_{m \times n}$ перестановкой ее строк на место столбцов с теми же номерами (столбцов на место строк), называется *транспонированной* к матрице A , а соответствующая операция — *транспонированием* матрицы A .

Транспонированную матрицу обозначают A^T или A' . Очевидно, если $\dim A = m \times n$, то $\dim A^T = n \times m$. Таким образом, если матрица

$$A_{m \times n} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix},$$

то транспонированная к ней

$$A_{n \times m}^T = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & \cdots & a_{m1} \\ a_{12} & a_{22} & \cdots & a_{m2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{1n} & a_{2n} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}.$$

Например,

$$\text{если } A = \begin{pmatrix} 5 & 2 & -3 \\ 4 & -1 & 8 \end{pmatrix}, \quad \text{то } A^T = \begin{pmatrix} 5 & 4 \\ 2 & -1 \\ -3 & 8 \end{pmatrix}.$$

Транспонирование матрицы A эквивалентно перемещению каждого элемента a_{ij} матрицы A из ячейки (i, j) в ячейку (j, i) матрицы A^T . В частности,

$$(a_1 \ a_2 \ \cdots \ a_n)^T = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}^T = (b_1 \ b_2 \ \cdots \ b_m).$$

Операция транспонирования обладает следующими свойствами.

1. $(A^T)^T = A$.
2. $(A + B)^T = A^T + B^T$.
3. $(\alpha A)^T = \alpha A^T$.
4. $(AB)^T = B^T A^T$.

Первые три свойства вполне очевидны.

Доказательство свойства 4. Сначала покажем, что если произведение AB определено, то определено и произведение $B^T A^T$ транспонированных матриц, и что размеры матриц $(AB)^T$ и $B^T A^T$ совпадают.

Пусть $\dim A = m \times n$, $\dim B = n \times k$. Тогда $\dim(AB) = m \times k$, а $\dim(AB)^T = k \times m$. При этом $\dim B^T = k \times n$, $\dim A^T = n \times m$ и по правилу размерностей: $\dim(B^T A^T) = [k \times n][n \times m] = k \times m$. Таким образом, если имеет смысл произведение AB , то определено и произведение $B^T A^T$, причем размеры матриц $(AB)^T$ и $B^T A^T$ совпадают. Значит, эти матрицы можно сравнивать.

Теперь покажем, что $(AB)^T = B^T A^T$. Обозначим $C = AB$, $D = (AB)^T = C^T$, $F = B^T A^T$. С учетом введенных обозначений и в соответствии с определением произведения матриц:

— в ячейке (i, j) матрицы C находится элемент c_{ij} , равный произведению i -й строки $\mathbf{a}_i = (a_{i1} \ a_{i2} \ \dots \ a_{in})$ матрицы A на j -й столбец $\mathbf{b}_j = (b_{1j} \ b_{2j} \ \dots \ b_{nj})^T$ матрицы B ;

— при транспонировании матрицы $C = AB$ этот элемент окажется в ячейке (j, i) матрицы D , т. е. $d_{ji} = c_{ij} = \mathbf{a}_i \mathbf{b}_j$;

— в ячейке (j, i) матрицы F находится элемент f_{ji} , равный произведению j -й строки матрицы B^T , полученной из столбца $\mathbf{b}_j$ матрицы B , на i -й столбец матрицы A^T , полученный из строки $\mathbf{a}_i$ матрицы A :

$$f_{ji} = \mathbf{b}_j^T \mathbf{a}_i^T = \mathbf{a}_j \mathbf{b}_j = d_{ji}.$$

Поскольку $f_{ji} = d_{ji}$ для произвольно выбранной ячейки, то $D = F$, или $(AB)^T = B^T A^T$. ■

Вопросы для самоконтроля к § 1

Пусть A, B — заданные матрицы.

1. Для матриц какого размера уравнение $A + X = B$, где X — неизвестная матрица, имеет решение? Запишите это решение.

2. Какие из 8 произведений $AB, BA, A^T B, B A^T, AB^T, B^T A, A^T B^T, B^T A^T$ существуют для заданных матриц:

- а) $A_{3 \times 4}, B_{2 \times 3}$; б) $A_{3 \times 4}, B_{4 \times 3}$;
 в) $A_{3 \times 4}, B_{2 \times 4}$; г) $A_{3 \times 3}, B_{3 \times 3}$?

3. Какие общие выводы можно сделать из результатов ответов на вопрос 2?

4. Квадратную матрицу A умножили на 2 и затем вычли из полученной матрицы единичную матрицу. В результате получилась матрица $B = \text{diag}(1, 2, \dots, n)$. Найдите матрицу A .

5. Как изменяется размер матрицы при ее транспонировании: $\dim A = m \times n$, $\dim A^T = ?$

6. Какие матрицы не изменяются при транспонировании ($A^T = A$)?

7. Какие матрицы X коммутируют с любой квадратной матрицей A_n ($A_n X = X A_n$)?

8. Пусть A_n — произвольная квадратная матрица. Для каких матриц X имеет место равенство $A_n X = X A_n = A_n$?

§ 2. Теория определителей

2.1. СЛАУ и определители второго порядка

Рассмотрим систему двух линейных уравнений с двумя неизвестными

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 = b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 = b_2. \end{cases} \quad (1.7)$$

Исследуем эту систему при следующих предположениях относительно коэффициентов при неизвестных: коэффициенты a_{11} и a_{21} , а также a_{12} и a_{22} не обращаются одновременно в нуль, т. е. $a_{11}^2 + a_{21}^2 \neq 0$ и $a_{12}^2 + a_{22}^2 \neq 0$.

Допустим, что СЛАУ (1.7) имеет решение. Найдём его. Умножив первое уравнение системы на a_{22} , а второе на $(-a_{12})$ и сложив их, получим

$$(a_{11}a_{22} + a_{21}(-a_{12}))x_1 + (a_{12}a_{22} + a_{22}(-a_{12}))x_2 = b_1a_{22} + b_2(-a_{12}),$$

или

$$(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})x_1 = b_1a_{22} - b_2a_{12}.$$

Отсюда (если $a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} \neq 0$)

$$x_1 = \frac{b_1a_{22} - b_2a_{12}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}. \quad (1.8)$$

Аналогично:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 = b_2 \end{array} \right| \begin{array}{c} (-a_{21}) \\ a_{11} \end{array} \Bigg| +,$$

получаем

$$(-a_{21}a_{11} + a_{11}a_{21})x_1 + (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})x_2 = b_2a_{11} - b_1a_{21},$$

откуда

$$x_2 = \frac{b_2a_{11} - b_1a_{21}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}. \quad (1.9)$$

Легко проверить подстановкой в уравнения (1.7), что найденная пара чисел $(x_1 \ x_2)$ является решением СЛАУ при $a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} \neq 0$.

Введем в рассмотрение матрицы

$$A^{(0)} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}, \quad A^{(1)} = \begin{pmatrix} b_1 & a_{12} \\ b_2 & a_{22} \end{pmatrix}, \quad A^{(2)} = \begin{pmatrix} a_{11} & b_1 \\ a_{21} & b_2 \end{pmatrix}$$

и поставим в соответствие каждой матрице число, вычисляемое по *общему правилу*, а именно: *из произведения элементов матрицы, стоящих на главной диагонали, вычитается произведение ее элементов, расположенных на побочной диагонали*:

$$\Delta_0 \stackrel{\text{def}}{=} a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}; \quad \Delta_1 \stackrel{\text{def}}{=} b_1a_{22} - b_2a_{12}; \quad \Delta_2 \stackrel{\text{def}}{=} b_2a_{11} - b_1a_{21}.$$

Сопоставив эти выражения с выражениями в числителях и знаменателях дробей (1.8) и (1.9), заключаем, что

$$\boxed{x_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta_0}, \quad x_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta_0}}. \quad (1.10)$$

Полученные формулы называются *формулами Крамера*, а числа $\Delta_0, \Delta_1, \Delta_2$ — *определителями* второго порядка.

Определение 1.14. *Определителем (или детерминантом) второго порядка матрицы* $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$ *называется число* $a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$, *равное разности произведений элементов, стоящих соответственно на ее главной и побочной диагоналях.*

Определитель матрицы A обозначается так: $|A|$, $\det A$, а также $\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}$.

Таким образом,

$$\boxed{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \stackrel{\text{def}}{=} a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}. \quad (1.11)$$

Например,

$$\begin{vmatrix} 2 & -4 \\ 1 & 3 \end{vmatrix} = 2 \cdot 3 - (-4) \cdot 1 = 10.$$

Для дальнейшего изложения нам понадобятся следующие обозначения, называемые *кванторами*:

$\forall$ — квантор всеобщности, читается «для любого (-ой, -ых)»;

$\exists$ — квантор существования — «существует», $\exists!$ — «существует единственный (-ая, -ое)».

Вернемся к решению СЛАУ (1.7). Полученное решение (1.10) этой СЛАУ позволяет сформулировать следующее правило.

Правило Крамера¹⁾. Если определитель Δ_0 основной матрицы A_0 СЛАУ второго порядка (1.7) отличен от нуля, то для любой правой части $B = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}$ СЛАУ имеет единственное решение, которое может быть найдено по формулам (1.10).

В символьной форме правило Крамера имеет следующий вид:

$$\Delta_0 \neq 0 \Rightarrow \forall B = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \exists! X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} : x_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta_0}; \quad x_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta_0}.$$

Отметим, что определители Δ_1 и Δ_2 в формулах Крамера получаются из определителя Δ_0 замещением соответственно первого и второго столбцов столбцом свободных членов СЛАУ.

Пример 1.1. Решить СЛАУ с использованием формул Крамера:

$$\begin{cases} 2x_1 - x_2 = 8, \\ 3x_1 + 4x_2 = 1. \end{cases}$$

Решение. 1. $\Delta_0 = \begin{vmatrix} 2 & -1 \\ 3 & 4 \end{vmatrix} = 11$. Поскольку $\Delta_0 \neq 0$, то СЛАУ имеет единственное решение.

$$2. \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} 8 & -1 \\ 1 & 4 \end{vmatrix} = 33 \Rightarrow x_1 = \frac{33}{11} = 3;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 2 & 8 \\ 3 & 1 \end{vmatrix} = -22 \Rightarrow x_2 = \frac{-22}{11} = -2.$$

¹⁾ Крамер Габриель (Cramer Gabriel, 1704–1752) — швейцарский математик. Заложил основы теории определителей, сформулировал правило решения систем линейных алгебраических уравнений.

Таким образом, $X = \begin{pmatrix} 3 \\ -2 \end{pmatrix}$ — искомое решение.

Ответ: $X = (3 \ -2)^\top$.

Исследуем ситуацию, когда определитель Δ_0 основной матрицы A_0 обращается в нуль. Каждое уравнение СЛАУ (1.7) определяет некоторую прямую на плоскости. Прямые могут пересекаться в некоторой точке (при $\Delta_0 \neq 0$), и тогда СЛАУ имеет единственное решение. Значит, если $\Delta_0 = 0$, то прямые либо параллельны и тогда СЛАУ (1.7) не имеет решений, либо совпадают и СЛАУ (1.7) имеет бесконечно много решений.

Пусть $\Delta_0 = 0$, т. е. $a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} = 0$, откуда $\frac{a_{11}}{a_{21}} = \frac{a_{12}}{a_{22}}$ (в предположении, что $a_{21} \neq 0$, $a_{22} \neq 0$). Значит, если определитель $\Delta_0 = 0$, то коэффициенты при неизвестных в первом и во втором уравнениях системы (1.7) пропорциональны.

По отношению к свободным членам b_1 , b_2 уравнений возможны два случая: либо

$$\frac{a_{11}}{a_{21}} = \frac{a_{12}}{a_{22}} = \frac{b_1}{b_2}, \quad (1.12)$$

и, как следствие,

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} b_1 & a_{12} \\ b_2 & a_{22} \end{vmatrix} = 0, \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_{11} & b_1 \\ a_{21} & b_2 \end{vmatrix} = 0;$$

либо

$$\frac{a_{11}}{a_{21}} = \frac{a_{12}}{a_{22}} \neq \frac{b_1}{b_2}. \quad (1.13)$$

В этом случае $\Delta_1 \neq 0$ и $\Delta_2 \neq 0$.

Если выполняется равенство (1.12) и соответственно $\Delta_0 = 0$, $\Delta_1 = 0$ и $\Delta_2 = 0$, то СЛАУ (1.7) имеет бесконечно много решений. Действительно, в этом случае коэффициенты при неизвестных и свободные члены первого и второго уравнений пропорциональны и, значит, система сводится к одному уравнению, которое имеет бесчисленное множество решений. Найдем их, например, из первого уравнения СЛАУ (1.7). Допустим, что в нем $a_{11} \neq 0$. Положив $x_2 = t$, $t \in \mathbb{R}$, получим $x_1 = \frac{b_1 - a_{12}t}{a_{11}}$.

Вектор $X = \left(\frac{b_1 - a_{12}t}{a_{11}}, t \right)^\top$, $t \in \mathbb{R}$, определяет бесконечное множество точек прямой — решений СЛАУ (1.7).

Заметим, что соотношения

$$\begin{cases} x_1 = \frac{b_1 - a_{12}t}{a_{11}}, \\ x_2 = t, \end{cases} \quad t \in \mathbb{R}, \quad (1.14)$$

в данном случае являются параметрическими уравнениями прямой (двух совпадающих прямых).

Если же выполняются соотношения (1.13), т. е. $\Delta_0 = 0$, $\Delta_1 \neq 0$ и $\Delta_2 \neq 0$, то СЛАУ (1.7) не имеет решений. Действительно, здесь уравнения $\Delta_0 \cdot x_1 = \Delta_1$, $\Delta_0 \cdot x_2 = \Delta_2$ принимают вид $0 \times x_1 = \Delta_1$ и $0 \cdot x_2 = \Delta_2$, а эти равенства не выполняются ни при каких значениях переменных x_1 и x_2 .

Таким образом, если:

- $\Delta_0 \neq 0$, то СЛАУ (1.7) имеет единственное решение, которое находится по формулам (1.10) для любой правой части;
- $\Delta_0 = 0$, $\Delta_1 = 0$, $\Delta_2 = 0$, то СЛАУ имеет бесконечно много решений, которые могут быть найдены по формулам (1.14) (при $a_{11} \neq 0$);
- $\Delta_0 = 0$, $\Delta_1 \neq 0$ и $\Delta_2 \neq 0$, то СЛАУ не имеет решений (несовместна).

2.2. СЛАУ и определители третьего порядка

Пусть дана система трех линейных уравнений с тремя неизвестными — СЛАУ третьего порядка

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 = b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 = b_2, \\ a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 = b_3. \end{cases} \quad (1.15)$$

Умножим каждое уравнение системы на числа $\begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}$, $\begin{pmatrix} - & \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} \end{pmatrix}$ и $\begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{22} & a_{23} \end{vmatrix}$ соответственно и сложим их, группируя слагаемые с неизвестными x_1 , x_2 и x_3 ,

$$\begin{aligned} & \left(a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{21} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{31} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{22} & a_{23} \end{vmatrix} \right) x_1 + \\ & + \left(a_{12} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{22} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{32} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{22} & a_{23} \end{vmatrix} \right) x_2 + \\ & + \left(a_{13} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{23} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{33} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{22} & a_{23} \end{vmatrix} \right) x_3 = \\ & = b_1 \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - b_2 \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + b_3 \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{22} & a_{23} \end{vmatrix}. \quad (1.16) \end{aligned}$$

Если теперь раскроем определители второго порядка, входящие в алгебраические выражения в круглых скобках перед x_2

и x_3 , и выполним необходимые преобразования (проделайте это самостоятельно!), то окажется, что выражения в этих скобках обращаются в нуль, а уравнение (1.16) принимает вид

$$\Delta_0 \cdot x_1 = \Delta_1, \quad (1.17)$$

где обозначено:

$$\begin{aligned} \Delta_0 &= a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{21} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{31} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{22} & a_{23} \end{vmatrix}; \\ \Delta_1 &= b_1 \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - b_2 \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + b_3 \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{22} & a_{23} \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (1.18)$$

Из (1.17) имеем (при $\Delta_0 \neq 0$)

$$x_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta_0}. \quad (1.19)$$

Формула (1.19) имеет такой же вид, что и формулы Крамера (1.10) для решений СЛАУ второго порядка. Поэтому естественно назвать величины Δ_0 и Δ_1 соответственно *определителями третьего порядка* матриц

$$A^{(0)} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}, \quad A^{(1)} = \begin{pmatrix} b_1 & a_{12} & a_{13} \\ b_2 & a_{22} & a_{23} \\ b_3 & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}.$$

Здесь $A^{(0)}$ — основная матрица СЛАУ (1.15), $A^{(1)}$ — матрица, получающаяся из матрицы $A^{(0)}$ заменой ее первого столбца столбцом свободных членов СЛАУ (1.15).

Вычисление определителей Δ_0 и Δ_1 по формулам (1.18) называется *разложением определителя третьего порядка по первому столбцу*. Обозначаются определители третьего порядка аналогично определителям второго порядка:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}, \quad \det A_0, \quad |A_0|.$$

Можно показать, что $x_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta_0}$, $x_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta_0}$, где определители третьего порядка

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_{11} & b_1 & a_{13} \\ a_{21} & b_2 & a_{23} \\ a_{31} & b_3 & a_{33} \end{vmatrix}, \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & b_2 \\ a_{31} & a_{32} & b_3 \end{vmatrix}$$

вычисляются по аналогии с Δ_0 и Δ_1 разложением по первому столбцу. Например,

$$\Delta_2 = a_{11} \begin{vmatrix} b_2 & a_{23} \\ b_3 & a_{33} \end{vmatrix} - a_{21} \begin{vmatrix} b_1 & a_{13} \\ b_3 & a_{33} \end{vmatrix} + a_{31} \begin{vmatrix} b_1 & a_{13} \\ b_2 & a_{23} \end{vmatrix}.$$

Полученные результаты запишем в виде следующего правила.

Правило Крамера. Если определитель Δ_0 основной матрицы A_0 СЛАУ (1.15) отличен от нуля, то для любой правой части $B = (b_1 \ b_2 \ b_3)^\top$ СЛАУ имеет единственное решение, которое может быть найдено по формулам Крамера:

$$\boxed{x_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta_0}, \quad x_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta_0}, \quad x_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta_0}}. \quad (1.20)$$

Исследуем подробнее структуру определителя третьего порядка. В соответствии с (1.18) имеем

$$\begin{aligned} \Delta_0 &= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \\ &= a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{21} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{31} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{22} & a_{23} \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (1.21)$$

Выражение в правой части формулы (1.21) является алгебраической суммой произведений элементов a_{i1} , $i = 1, 2, 3$, первого столбца определителя третьего порядка на определители второго порядка. Определители второго порядка получаются из определителя третьего порядка по однотипной схеме — вычеркиваются строка и первый столбец, на пересечении которых стоит соответствующий элемент a_{i1} :

$$\begin{vmatrix} \cancel{a_{11}} & \cancel{a_{12}} & \cancel{a_{13}} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} a_{11} & \cancel{a_{12}} & \cancel{a_{13}} \\ \cancel{a_{21}} & \cancel{a_{22}} & \cancel{a_{23}} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}.$$

Определители второго порядка, получающиеся из определителя третьего порядка вычеркиванием строки и столбца, на пересечении которых стоит элемент a_{i1} , $i = 1, 2, 3$, называются *минорами* этого элемента и обозначаются M_{i1} .

Таким образом, формула (1.21) может быть переписана в виде

$$\Delta_0 = a_{11}M_{11} - a_{21}M_{21} + a_{31}M_{31}.$$

Связь знаков алгебраической суммы с индексами элементов a_{i1} определяется множителями $(-1)^{i+1}$. Поэтому

$$\Delta_0 = a_{11}((-1)^{1+1}M_{11}) + a_{21}((-1)^{2+1}M_{21}) + a_{31}((-1)^{3+1}M_{31}).$$

Обозначим $A_{i1} = (-1)^{i+1}M_{i1}$, $i = 1, 2, 3$ и назовем эти величины *алгебраическими дополнениями* соответствующих элементов a_{i1} , $i = 1, 2, 3$.

В результате получим

$$\Delta_0 \equiv \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = a_{11}A_{11} + a_{21}A_{21} + a_{31}A_{31}. \quad (1.22)$$

Правая часть формулы (1.22) называется *разложением определителя третьего порядка по первому столбцу*.

Минор и алгебраическое дополнение произвольного элемента a_{ij} определителя третьего порядка вычисляются по правилам, идентичным тем, что сформулированы выше для элементов первого столбца определителя, а именно: минор M_{ij} элемента a_{ij} равен определителю второго порядка, получающемуся из определителя третьего порядка вычеркиванием i -й строки и j -го столбца, а алгебраическое дополнение элемента a_{ij} равно минору M_{ij} , взятому со знаком плюс, если $(i + j)$ — четное число, или со знаком минус, если $(i + j)$ — нечетное число, т. е.

$$A_{ij} = (-1)^{i+j}M_{ij}.$$

Запишем определитель Δ_0 в развернутой форме, вычислив определители второго порядка в (1.21):

$$\begin{aligned} \Delta_0 &= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \\ &= a_{11}(a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32}) - a_{21}(a_{12}a_{33} - a_{13}a_{32}) + \\ &+ a_{31}(a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22}) = a_{11}a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}a_{31} + \\ &+ a_{13}a_{21}a_{32} - a_{11}a_{23}a_{32} - a_{12}a_{21}a_{33} - a_{13}a_{22}a_{31}. \end{aligned} \quad (1.23)$$

Сгруппируем слагаемые в последнем выражении парами так, чтобы в каждую пару одно слагаемое входило со знаком «+», а второе со знаком «-» и при этом слагаемые имели в качестве

общего множителя некоторый элемент из первой строки определителя Δ_0 :

$$\begin{aligned}\Delta_0 &= (a_{11}a_{22}a_{33} - a_{11}a_{23}a_{32}) - (a_{12}a_{21}a_{33} - a_{12}a_{23}a_{31}) + \\ &\quad + (a_{13}a_{21}a_{32} - a_{13}a_{22}a_{31}) = a_{11}(a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32}) - \\ &\quad - a_{12}(a_{21}a_{33} - a_{23}a_{31}) + a_{13}(a_{21}a_{32} - a_{22}a_{31}) = \\ &= a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{12} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{13} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix}.\end{aligned}$$

В итоге мы получили *разложение определителя Δ_0 по первой строке*

$$\Delta_0 = a_{11}A_{11} + a_{12}A_{12} + a_{13}A_{13},$$

где $A_{1j} = (-1)^{1+j}M_{1j}$.

Таким образом, определитель третьего порядка можно разлагать не только по первому столбцу, но и по первой строке.

Число различных группировок слагаемых парами в (1.23) равно 6, т. е. числу перестановок из трех элементов ($P_3 = 3! = 6$). Каждая такая группировка приводит к разложению определителя Δ_0 либо по некоторой строке, либо по некоторому столбцу. Получим разложение, к примеру, по третьей строке:

$$\begin{aligned}\Delta_0 &= (a_{12}a_{23}a_{31} - a_{13}a_{22}a_{31}) - (a_{11}a_{23}a_{32} - a_{13}a_{21}a_{32}) + \\ &\quad + (a_{11}a_{22}a_{33} - a_{12}a_{21}a_{33}) = a_{31}(a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22}) - \\ &\quad - a_{32}(a_{11}a_{23} - a_{13}a_{21}) + a_{33}(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}) = \\ &= a_{31} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{22} & a_{23} \end{vmatrix} - a_{32} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{13} \\ a_{21} & a_{23} \end{vmatrix} + a_{33} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = \\ &= a_{31}A_{31} + a_{32}A_{32} + a_{33}A_{33}.\end{aligned}$$

Таким образом, доказана следующая теорема.

Теорема 1.1. Для любой строки ($\forall i \in \{1, 2, 3\}$) и для любого столбца ($\forall j \in \{1, 2, 3\}$) справедливы следующие формулы:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = a_{i1}A_{i1} + a_{i2}A_{i2} + a_{i3}A_{i3} = \quad (1.24)$$

$$= a_{1j}A_{1j} + a_{2j}A_{2j} + a_{3j}A_{3j}. \quad (1.25)$$

Формула (1.24) называется *разложением определителя третьего порядка по i -й строке*, а формула (1.25) — *разложением по j -му столбцу*.

Рассмотрим подробнее выражение в круглых скобках перед переменной x_2 в (1.16):

$$\begin{aligned} a_{12} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{22} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{32} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{22} & a_{23} \end{vmatrix} = \\ = a_{12}(a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32}) - a_{22}(a_{12}a_{33} - a_{13}a_{32}) + \\ + a_{32}(a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22}) = 0. \end{aligned}$$

С другой стороны, как нетрудно убедиться, это выражение является алгебраической суммой произведений элементов второго столбца матрицы A_0 на алгебраические дополнения элементов первого столбца этой матрицы:

$$\begin{aligned} 0 = a_{12} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{22} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{32} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{22} & a_{23} \end{vmatrix} = \\ = a_{12}A_{11} + a_{22}A_{21} + a_{32}A_{31} = \begin{vmatrix} a_{12} & a_{12} & a_{13} \\ a_{22} & a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}. \end{aligned}$$

Полученный результат имеет общий характер, а именно, справедливо следующее утверждение:

сумма произведений элементов произвольного столбца определителя третьего порядка на алгебраические дополнения элементов другого столбца равна нулю.

Аналогичное свойство справедливо и для строк.

Определитель $\begin{vmatrix} a_{12} & a_{12} & a_{13} \\ a_{22} & a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}$ содержит два одинаковых столбца, и потому, как нетрудно проверить, он равен нулю. Это содержание еще одного свойства определителей третьего порядка.

Подведем предварительные итоги рассмотрения определителей третьего порядка.

1. *Определитель можно разлагать как по произвольной строке (формула (1.24)), так и по произвольному столбцу (формула (1.25)).*

2. *Определитель транспонированной матрицы A^T равен определителю матрицы A .*

Справедливость этого утверждения следует из свойства 1. Достаточно разложить определитель $|A^T|$ по первому столбцу. Свойство 2 устанавливает равноправность строк и столбцов определителя.

3. Сумма произведений элементов некоторой строки (столбца) определителя на алгебраические дополнения элементов другой строки (столбца) равна нулю.

4. Определитель, содержащий две или более строк (столбцов) с одинаковыми элементами, равен нулю.

Список свойств можно продолжить. Однако оставим их до рассмотрения в общем случае — для определителя произвольно-го n -го порядка, $n \in \mathbb{N}$.

Пример 1.2. Вычислить определитель

$$\begin{vmatrix} 1 & -2 & 4 \\ 2 & 0 & -1 \\ 3 & 4 & 2 \end{vmatrix}.$$

Решение. Разложим определитель по второй строке:

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} 1 & -2 & 4 \\ 2 & 0 & -1 \\ 3 & 4 & 2 \end{vmatrix} &= \\ &= 2(-1)^{2+1} \begin{vmatrix} -2 & 4 \\ 4 & 2 \end{vmatrix} + 0(-1)^{2+2} \begin{vmatrix} 1 & 4 \\ 3 & 2 \end{vmatrix} + (-1)(-1)^{2+3} \begin{vmatrix} 1 & -2 \\ 3 & 4 \end{vmatrix} = \\ &= (-2)(-4 - 16) + 1(4 + 6) = 50. \end{aligned}$$

Ответ: 50.

Пример 1.3. Решить по правилу Крамера СЛАУ

$$\begin{cases} 2x_1 + x_2 - x_3 = 0, \\ x_1 + 2x_2 + 3x_3 = -1, \\ 2x_1 + x_2 - 2x_3 = -1. \end{cases}$$

Решение. 1. Вычислим определитель $\Delta_0 = |A_0|$ основной матрицы СЛАУ. Применяем разложение по первой строке:

$$\begin{aligned} \Delta_0 &= \begin{vmatrix} 2 & 1 & -1 \\ 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & -2 \end{vmatrix} = 2 \begin{vmatrix} 2 & 3 \\ 1 & -2 \end{vmatrix} - 1 \begin{vmatrix} 1 & 3 \\ 2 & -2 \end{vmatrix} + (-1) \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{vmatrix} = \\ &= 2(-4 - 3) - (-2 - 6) - (1 - 4) = -3. \end{aligned}$$

Поскольку $\Delta_0 \neq 0$, то в соответствии с правилом Крамера существует единственное решение СЛАУ.

2. Вычисляем последовательно определители Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 и находим соответствующие значения переменных x_1 , x_2 , x_3 :

$$\begin{aligned}\Delta_1 &= \begin{vmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 2 & 3 \\ -1 & 1 & -2 \end{vmatrix} = 0 \cdot \begin{vmatrix} 2 & 3 \\ 1 & -2 \end{vmatrix} - 1 \cdot \begin{vmatrix} -1 & 3 \\ -1 & -2 \end{vmatrix} + (-1) \begin{vmatrix} -1 & 2 \\ -1 & 1 \end{vmatrix} = \\ &= -(2 + 3) - (-1 + 2) = -6 \Rightarrow x_1 = \frac{-6}{-3} = 2;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta_2 &= \begin{vmatrix} 2 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 3 \\ 2 & -1 & -2 \end{vmatrix} = 2 \begin{vmatrix} -1 & 3 \\ -1 & -2 \end{vmatrix} - 0 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 3 \\ 2 & -2 \end{vmatrix} + (-1) \begin{vmatrix} 1 & -1 \\ 2 & -1 \end{vmatrix} = \\ &= 2(2 + 3) - (-1 + 2) = 9 \Rightarrow x_2 = \frac{9}{-3} = -3;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta_3 &= \begin{vmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & -1 \\ 2 & 1 & -1 \end{vmatrix} = 2 \begin{vmatrix} 2 & -1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} - 1 \cdot \begin{vmatrix} 1 & -1 \\ 2 & -1 \end{vmatrix} + 0 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{vmatrix} = \\ &= 2(-2 + 1) - (-1 + 2) = -3 \Rightarrow x_3 = \frac{-3}{-3} = 1.\end{aligned}$$

Все определители Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 вычислены разложением по первой строке. В данном случае это обусловлено еще и тем, что в каждом из этих определителей первая строка содержит один ноль. Это позволяет вычислять не три алгебраических дополнения, входящих в разложение, а только два.

Вектор-столбец $\mathbf{X} = (2 \ -3 \ 1)^\top$ является решением СЛАУ. Действительно:

$$\begin{cases} 2 \cdot 2 - 3 - 1 = 0, \\ 2 + 2(-3) + 3 \cdot 1 = -1, \\ 2 \cdot 2 - 3 - 2 \cdot 1 = -1, \end{cases} \quad \begin{cases} 0 = 0, \\ -1 = -1, \\ -1 = -1. \end{cases}$$

Ответ: $\mathbf{X} = (2 \ -3 \ 1)^\top$.

Наряду с разложением по некоторой строке или по некоторому столбцу определитель третьего порядка можно вычислять с использованием специальных схем — *правила треугольников* и *правила Саррюса*.

Из формулы (1.23) следует, что определитель третьего порядка равен алгебраической сумме шести слагаемых, три из которых

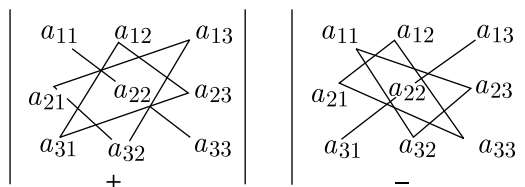


Рис. 1.1

входят в алгебраическую сумму со знаком «+», а три — со знаком «-». При этом каждое слагаемое является произведением трех элементов, взятых из разных строк и разных столбцов определителя.

Пусть $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$ — матрица третьего порядка,

определитель которой необходимо вычислить. Если в матрице A соединить отрезками элементы, входящие в каждое произведение в правой части формулы (1.23), и при этом отдельно представить произведения со знаком «+» и со знаком «-», то получится схема, приведенная на рис. 1.1. Получившиеся фигуры (четыре из шести) имеют форму треугольников. Поэтому формулируемое ниже правило называется *правилом треугольников*.

Правило треугольников. Со знаком «+» берутся произведения элементов определителя, стоящих на главной диагонали и в вершинах треугольников с основаниями, параллельными главной диагонали; слагаемые со знаком «-» определяются аналогично, но относительно побочной диагонали (рис. 1.1).

Правило Саррюса является некоторой модификацией правила треугольников. Оно позволяет заменить процесс поиска элементов определителя в вершинах треугольников на однотипные операции перемножения элементов на главной и на параллельных ей диагоналях, а также на побочной и на параллельных ей диагоналях.

Правило Саррюса. Для вычисления определителя третьего порядка нужно приписать к определителю матрицы A справа первый и второй его столбцы. Затем нужно перемножить элементы новой таблицы в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1.2 (перемножаются элементы в направлении стрелок), и составить из получившихся шести произведений алгебраическую сумму, в которой произведения элементов берутся со знаками, указанными под стрелками.

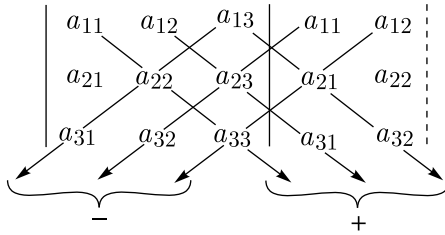


Рис. 1.2

Пример 1.4. Вычислить определитель $\begin{vmatrix} 1 & -2 & 0 \\ 3 & -1 & 4 \\ -5 & 0 & 7 \end{vmatrix}$:

а) по правилу треугольников,

б) по правилу Саррюса.

Решение.

$$\text{а) } \begin{vmatrix} 1 & -2 & 0 \\ 3 & -1 & 4 \\ -5 & 0 & 7 \end{vmatrix} = 1 \cdot (-1) \cdot 7 + (-2) \cdot 4 \cdot (-5) + \\ + 0 \cdot 3 \cdot 0 - 0 \cdot (-1)(-5) - (-2) \cdot 3 \cdot 7 - 1 \cdot 4 \cdot 0 = 75.$$

б)

$$\begin{vmatrix} 1 & -2 & 0 \\ 3 & -1 & 4 \\ -5 & 0 & 7 \end{vmatrix} = 1 \cdot (-1) \cdot 7 + (-2) \cdot 4 \cdot (-5) + 0 \cdot 3 \cdot 0 - \\ - 0 \cdot (-1)(-5) - (-2) \cdot 3 \cdot 7 - 1 \cdot 4 \cdot 0 = 75.$$

Ответ: 75.

Вопросы для самоконтроля к пп. 2.1–2.2

1. При каких условиях на коэффициенты система линейных уравнений второго порядка:

- а) имеет единственное решение для любой правой части;
- б) имеет бесконечно много решений;
- в) не имеет решений (несовместна)?

2. Запишите формулы (вычислительные схемы) для вычисления определителя третьего порядка $\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}$:

- а) в виде разложения определителя по второй строке;
- б) в виде разложения определителя по третьему столбцу;

в) по правилу треугольников;

г) по правилу Саррюса.

3. Вычислите определитель $\begin{vmatrix} -1 & 2 & -2 \\ 4 & 0 & 1 \\ 2 & -3 & 2 \end{vmatrix}$ четырьмя способами,

перечисленными в вопросе 2.

4. Докажите, что при перестановке двух строк (столбцов) определителя третьего порядка меняется лишь его знак.

5. Докажите, что определитель третьего порядка с пропорциональными строками (столбцами) равен нулю.

6. Докажите, что определитель третьего порядка, в котором все элементы некоторой строки (столбца) равны нулю, также равен нулю.

7. Докажите, что прибавление к некоторой строке (столбцу) определителя третьего порядка другой строки (столбца), умноженной на произвольное число, не изменяет значения определителя. Пользуясь этим свойством, вычислите определитель из вопроса 3. Для этого прибавьте к первому столбцу определителя третий столбец, умноженный на (-4) , т. е. $a_{i1} = a_{i1} + (-4)a_{i3}$, $i = 1, 2, 3$.

8. Докажите, что определитель нижней треугольной матрицы равен произведению элементов, расположенных на главной диа-

гонали, т. е. $\begin{vmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22}a_{33}$.

2.3. Определители n -го порядка

2.3.1. Миноры и алгебраические дополнения. Определитель третьего порядка в п. 2.2 получен как алгебраическая сумма произведений элементов некоторой строки (столбца) определителя на их алгебраические дополнения. Этот подход может быть принят в качестве основы для построения теории определителей произвольного n -го порядка ($n \geq 2$).

Альтернативный способ построения теории определителей основывается на отмеченном в п. 2.2 свойстве определителей третьего порядка. В соответствии с этим свойством определитель третьего порядка равен алгебраической сумме шести слагаемых, три из которых входят в названную сумму со знаком «плюс», а три со знаком «минус»; при этом каждое слагаемое представлено произведением трех элементов определителя, взятых *ровно по одному из каждой строки и при этом из разных столбцов*.

Для построения теории определителей n -го порядка мы примем за основу первый подход.

Пусть

$$A_n = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

— матрица порядка n , $n \geq 2$. Каждой такой матрице можно поставить в соответствие число, называемое ее определителем. Это число будем обозначать, как и раньше, символами $|A_n|$,

$\det A_n$ и $\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}$. Допустим, что правило, по которому

находится определитель $|A_{n-1}|$ матрицы A_{n-1} , определено. Введем два вспомогательных понятия: *минора* и *алгебраического дополнения* элемента a_{ij} определителя $|A_n|$.

Определение 1.15. *Минором* M_{ij} элемента a_{ij} определителя $|A_n|$ называется определитель $(n-1)$ -го порядка, получающийся из данного определителя вычеркиванием i -й строки и j -го столбца, т. е.

$$M_{ij} = \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1,j-1} & a_{1,j} & a_{1,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{i-1,1} & \cdots & a_{i-1,j-1} & a_{i-1,j} & a_{i-1,j+1} & \cdots & a_{i-1,n} \\ \hline a_{i1} & \cdots & a_{i,j-1} & a_{i,j} & a_{i,j+1} & \cdots & a_{in} \\ \hline a_{i+1,1} & \cdots & a_{i+1,j-1} & a_{i+1,j} & a_{i+1,j+1} & \cdots & a_{i+1,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n,j-1} & a_{nj} & a_{n,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1,j-1} & a_{1,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{i-1,1} & \cdots & a_{i-1,j-1} & a_{i-1,j+1} & \cdots & a_{i-1,n} \\ a_{i+1,1} & \cdots & a_{i+1,j-1} & a_{i+1,j+1} & \cdots & a_{i+1,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n,j-1} & a_{n,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}.$$

Определение 1.16. *Алгебраическим дополнением* A_{ij} элемента a_{ij} определителя называется число, равное значению его

минора M_{ij} , взятому со знаком «+» или «-» в зависимости от четности или нечетности суммы $(i + j)$ его индексов, т. е.

$$\boxed{A_{ij} = (-1)^{i+j} M_{ij}}. \quad (1.26)$$

Пример 1.5. Пусть $A = \begin{pmatrix} -2 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 3 & 2 & 0 \\ -1 & 1 & 3 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{pmatrix}$.

Найти: M_{21} ; A_{21} ; M_{22} ; A_{32} .

Решение.

$$M_{21} = \begin{vmatrix} -2 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 3 & 2 & 0 \\ -1 & 1 & 3 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 3 & -1 \\ 1 & 0 & 2 \end{vmatrix} = 6 - 3 = 3;$$

$$A_{21} = (-1)^{2+1} \cdot M_{21} = (-1) \cdot 3 = -3;$$

$$M_{22} = \begin{vmatrix} -2 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 3 & 2 & 0 \\ -1 & 1 & 3 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -2 & 0 & 1 \\ -1 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & 2 \end{vmatrix} = -12;$$

$$A_{32} = (-1)^{3+2} \begin{vmatrix} -2 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 3 & 2 & 0 \\ -1 & 1 & 3 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} -2 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{vmatrix} = 8.$$

Ответ: $M_{21} = 3$, $A_{21} = -3$, $M_{22} = -12$, $A_{32} = 8$.

Соответствие знаков миноров и алгебраических дополнений с одинаковыми индексами определяется схемой (рис. 1.3).

$$\begin{pmatrix} + & - & + & \dots & \dots & \dots \\ - & + & - & \dots & \dots & \dots \\ + & - & + & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & + & - \\ \dots & \dots & \dots & \dots & - & + \end{pmatrix}$$

Рис. 1.3. Схема распределения знаков алгебраических дополнений

Из формулы (1.26) и из этой схемы следует, что $A_{ij} = M_{ij}$, если сумма индексов $(i + j)$ является четным числом, и $A_{ij} = -M_{ij}$, если $(i + j)$ — нечетное число.

Теперь мы можем сформулировать определение, требуемое для дальнейшего изложения.

Определение 1.17. *Определителем $|A_n|$ n -го порядка называется число, равное сумме произведений элементов a_{1j} , $j = \overline{1, n}$, первой строки определителя на их алгебраические дополнения:*

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} = a_{11}A_{11} + a_{12}A_{12} + \dots + a_{1n}A_{1n}. \quad (1.27)$$

В компактной форме с использованием символа суммы определитель n -го порядка записывается так:

$$|A_n| = \sum_{j=1}^n a_{1j}A_{1j}. \quad (1.28)$$

Пример 1.6. Вычислить определитель матрицы, приведенной в примере 1.5.

Решение. Разложим определитель по первой строке; знаки алгебраических дополнений будем определять с помощью схемы, приведенной на рис. 1.3:

$$\begin{vmatrix} -2 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 3 & 2 & 0 \\ -1 & 1 & 3 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{vmatrix} =$$

$$= (-2) \cdot \begin{vmatrix} 3 & 2 & 0 \\ 1 & 3 & -1 \\ 1 & 0 & 2 \end{vmatrix} - 1 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 2 & 0 \\ -1 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & 2 \end{vmatrix} + 0 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 3 & 0 \\ -1 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 2 \end{vmatrix} -$$

$$- 1 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 3 & 2 \\ -1 & 1 & 3 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = (-2)(18 - 2 - 4) - (6 + 4) + 0 - (-2 - 3) = -29.$$

Ответ: $|A| = -29$.

В п. 2.2 были получены свойства определителей третьего порядка, облегчающие их вычисление. Естественно ожидать, что они справедливы и для определителей произвольного n -го порядка. Перейдем к изучению этих свойств.

2.3.2. Свойства определителей.

Свойство 1. *Перестановка любых двух строк определителя изменяет лишь его знак.*

Доказательство. Данное свойство докажем методом математической индукции.

При $n = 2$ имеем $\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$.

Переставим строки в определителе Δ и вычислим полученный определитель $\tilde{\Delta}$:

$$\tilde{\Delta} = \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{11} & a_{12} \end{vmatrix} = a_{12}a_{21} - a_{11}a_{22} = -(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}) = -\Delta,$$

т. е. при $n = 2$ свойство 1 справедливо.

Предположим теперь, что свойство 1 выполняется для определителей $(n - 1)$ -го порядка и, основываясь на этом, докажем, что оно имеет место и для определителей n -го порядка. Рассмотрим два случая: в первом переставляемые строки имеют номера, отличные от 1; во втором одна из переставляемых строк — первая строка.

Случай 1. Пусть

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{in} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \cdots & a_{kn} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} = \sum_{j=1}^n a_{1j} A_{1j} \quad (1.29)$$

— определитель n -го порядка. Построим новый определитель $\tilde{\Delta}$. Для этого переставим в определителе Δ i -ю и k -ю строки ($1 < i < k \leq n$):

$$\tilde{\Delta} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \cdots & a_{kn} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{in} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} = \sum_{j=1}^n a_{1j} \tilde{A}_{1j},$$

где алгебраическое дополнение $\tilde{A}_{1j} = (-1)^{1+j}\tilde{M}_{1j}$ отличается от $A_{1j} = (-1)^{1+j}M_{1j}$ тем, что в миноре $\tilde{M}_{ij}$ — определителе $(n-1)$ -го порядка — переставлены i -я и k -я строки. В силу предположения индукции $\tilde{M}_{ij} = -M_{ij}$, поэтому $\tilde{A}_{1j} = (-1)^{1+j}\tilde{M}_{1j} = (-1)^{1+j}(-M_{1j}) = -A_{1j}$ для всех $j = \overline{1, n}$.

Имеем далее

$$\tilde{\Delta} = \sum_{j=1}^n a_{1j}\tilde{A}_{1j} = \sum_{j=1}^n a_{1j}(-A_{1j}) = -\sum_{j=1}^n a_{1j}A_{1j} = -\Delta.$$

Случай 2. Имеем: $i = 1$, $k > 1$, т. е. определитель $\tilde{\Delta}$ получается из Δ перестановкой первой и некоторой k -й строк:

$$\tilde{\Delta} = \begin{vmatrix} a_{k1} & a_{k2} & \cdots & a_{kn} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} \leftarrow k\text{-я строка} \quad (1.30)$$

Докажем сначала, что перестановка первой и второй строк в определителе меняет лишь его знак. Доказательство проведем для определителя Δ (1.29). Разложим этот определитель по первой строке, а затем разложим каждый минор в составе получившейся алгебраической суммы также по первой строке:

$$\begin{aligned} \Delta &= \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} = \sum_{j=1}^n (-1)^{1+j} a_{1j} \cdot M_{1j} = \\ &= \sum_{j=1}^n (-1)^{1+j} a_{1j} \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq j}}^n (-1)^{1+k(s)} a_{2s} M_{1j, 2s} = \\ &= \sum_{j=1}^n \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq j}}^n (-1)^{\alpha(j,s)} a_{1j} a_{2s} M_{1j, 2s}, \quad (1.31) \end{aligned}$$

где

$$k(s) = \begin{cases} s, & \text{если } s < j, \\ s-1, & \text{если } s > j, \end{cases} \quad \alpha(j, s) = \begin{cases} 2+j+s, & \text{если } s < j, \\ 1+j+s, & \text{если } s > j, \end{cases}$$

а $M_{1j,2s}$ — определитель $(n-2)$ -го порядка, который получается из определителя Δ вычеркиванием 1-й строки и j -го столбца, а также 2-й строки и s -го столбца.

Выполним аналогичное разложение определителя Δ_1 , который получается из определителя Δ перестановкой 1-й и 2-й строк:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{31} & a_{32} & \cdots & a_{3n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n1} & \cdots & a_{n1} \end{vmatrix} = \sum_{j=1}^n (-1)^{1+j} a_{2j} M_{2j} = \\ &= \sum_{j=1}^n (-1)^{1+j} a_{2j} \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq j}}^n (-1)^{1+k(s)} a_{1s} M_{2j,1s} = \\ &= \sum_{j=1}^n \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq j}}^n (-1)^{\alpha t(j,s)} a_{2j} a_{1s} M_{1s,2j}. \quad (1.32) \end{aligned}$$

Показатели степеней $k(s)$ и α здесь вычисляются по тем же формулам, что и в разложении (1.31) определителя Δ .

Алгебраические суммы (1.31) и (1.32) содержат по $n \times (n-1)$ одинаковых, с точностью до знака, наборов слагаемых $a_{1j} a_{2s} M_{1j,2s}$. При этом слагаемые с одинаковыми индексами имеют противоположные знаки. Действительно, если для некоторого слагаемого в (1.31) $s < j$, то для такого же слагаемого в составе (1.32) $s > j$ и, значит, значения показателей степени α_{js} для этих слагаемых отличаются на 1. Поэтому $\Delta_1 = -\Delta$.

Докажем теперь основное утверждение. Если $k = 2$, то утверждение уже доказано. Пусть $k \neq 2$. Тогда переставим в определителе $\tilde{\Delta}$ (1.30) 1-ю и 2-ю строки. В соответствии с доказанным новый определитель будет отличаться от определителя $\tilde{\Delta}$ только знаком. Затем переставим k -ю и 2-ю строки. В соответствии с доказанным для случая 1 знак изменится еще раз. Теперь вновь переставим 1-ю и 2-ю строки. Произойдет еще одна — третья — смена знака. В результате всех перестановок строк мы получим определитель $\tilde{\tilde{\Delta}}$. Значит, $\tilde{\tilde{\Delta}} = (-1)^3 \tilde{\Delta} = -\tilde{\Delta}$. ■

Свойство 2. *Определитель с двумя одинаковыми строками равен нулю.*

Доказательство. Пусть $\Delta = |A_n|$ — определитель матрицы A_n с двумя одинаковыми строками. Поменяем в опреде-

лителе Δ местами эти строки. Получим новый определитель $\tilde{\Delta}$. В силу первого свойства $\tilde{\Delta} = -\Delta$, но с другой стороны, $\Delta_1 = \Delta$, поскольку определитель не изменился. Значит,

$$\Delta = -\Delta \Leftrightarrow 2\Delta = 0 \Rightarrow \Delta = 0. \quad \blacksquare$$

Свойство 3/Теорема 1.2. *Определитель $\Delta = |A_n|$, $n \geq 2$, можно разлагать не только по первой строке, но и по любой другой строке, т. е. $\forall i = 1, 2, 3, \dots, n$ справедлива формула*

$$\Delta = \sum_{j=1}^n a_{ij} A_{ij} = \sum_{j=1}^n (-1)^{i+j} a_{ij} M_{ij}. \quad (1.29)$$

Эта формула называется *разложением определителя n -го порядка по i -й строке*.

Доказательство. Данное свойство можно доказать по аналогии со свойством 1 методом математической индукции. Такое доказательство приведено, например, в книге [1]. Рассмотрим альтернативный вариант доказательства. Воспользуемся приемом, основанным на последовательной перестановке строк определителя. Он был применен при доказательстве первого свойства.

Пусть

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{in} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}.$$

Переместим в определителе Δ i -ю строку на место первой, переставляя ее последовательно с $(i-1)$ -й, $(i-2)$ -й, ..., со второй и, наконец, с первой. В соответствии со свойством 1 каждая такая перестановка меняет знак определителя на противоположный. Общее число перестановок строк равно $(i-1)$, поэтому

$$\Delta = (-1)^{i-1} \begin{vmatrix} a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{in} \\ a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{i-1,1} & a_{i-1,2} & \cdots & a_{i-1,n} \\ a_{i+1,1} & a_{i+1,2} & \cdots & a_{i+1,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}. \quad (1.33)$$

Разложим получившийся определитель по первой строке. Заметим, что при вычеркивании элементов первой строки и некоторого j -го столбца в (1.33) получается минор элемента a_{ij} :

$$\Delta = (-1)^{i-1} \left[a_{i1}(-1)^{1+1}M_{i1} + a_{i2}(-1)^{1+2}M_{i2} + \dots + a_{in}(-1)^{1+n}M_{in} \right].$$

Умножив выражение в квадратных скобках на $(-1)^{i-1}$, получим

$$\begin{aligned} \Delta &= a_{i1}(-1)^{i+1}M_{i1} + a_{i2}(-1)^{i+2}M_{i2} + \dots + a_{in}(-1)^{i+n}M_{in} = \\ &= a_{i1}A_{i1} + a_{i2}A_{i2} + \dots + a_{in}A_{in}, \end{aligned}$$

а это и есть разложение определителя Δ по i -й строке. ■

Свойство 4. *Общий множитель всех элементов некоторой строки можно вынести за знак этого определителя, т. е.*

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \lambda a_{i1} & \lambda a_{i2} & \cdots & \lambda a_{in} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} = \lambda \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{in} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} = \lambda \Delta.$$

Доказательство. Достаточно разложить исходный определитель по i -й строке:

$$\Delta_1 = \sum_{j=1}^n (\lambda a_{ij}) A_{ij} = \lambda \sum_{j=1}^n a_{ij} A_{ij} = \lambda \cdot \Delta. \quad \blacksquare$$

Свойство 5. *Если все элементы некоторой строки определителя равны нулю, то и сам определитель равен нулю.*

Это свойство вытекает из предыдущего при $\lambda = 0$.

Свойство 6. *Определитель с двумя пропорциональными строками равен нулю.*

Доказательство. Пусть элементы k -й строки получаются из соответствующих элементов i -й строки умножением на постоянное число λ , т. е.

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda a_{i1} & \lambda a_{i2} & \cdots & \lambda a_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}.$$

Вынесем общий множитель λ элементов k -й строки за знак определителя. Получившийся определитель будет иметь две одинаковые строки и потому, согласно свойству 2, он равен нулю. ■

Свойство 7. Если некоторая строка определителя имеет вид

$$(a_{i1} + b_{i1} \quad a_{i2} + b_{i2} \quad \cdots \quad a_{in} + b_{in}), \quad i \in \{1, 2, \dots, n\},$$

то его можно представить в виде суммы двух определителей, а именно,

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} + b_{i1} & a_{i2} + b_{i2} & \cdots & a_{in} + b_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} = \\ &= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{i1} & b_{i2} & \cdots & b_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} = \Delta_1^{(1)} + \Delta_1^{(2)}. \end{aligned}$$

Доказательство. Разложим определитель Δ_1 по i -й строке:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \sum_{j=1}^n (a_{ij} + b_{ij}) A_{ij} = \sum_{j=1}^n (a_{ij} A_{ij} + b_{ij} A_{ij}) = \\ &= \sum_{j=1}^n a_{ij} A_{ij} + \sum_{j=1}^n b_{ij} A_{ij} = \Delta_1^{(1)} + \Delta_1^{(2)}. \quad \blacksquare \end{aligned}$$

Свойство 8. Если к элементам некоторой строки определителя прибавить соответствующие элементы другой строки, умноженные на произвольное число λ , то определитель не изменится.

Доказательство. Пусть $\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}$,

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{i1} + \lambda a_{k1} & a_{i2} + \lambda a_{k2} & \cdots & a_{in} + \lambda a_{kn} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \cdots & a_{kn} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}.$$

Определитель Δ_1 получен из Δ прибавлением к i -й строке элементов k -й строки, умноженных на λ . Докажем, что $\Delta_1 = \Delta$. В соответствии со свойством 7 определитель Δ_1 можно представить в виде суммы двух определителей, первый из них совпадает с Δ , а второй содержит строку, пропорциональную k -й строке, и в силу свойства 6 равен нулю, т. е.

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{in} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \cdots & a_{kn} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} + \lambda \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \cdots & a_{kn} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \cdots & a_{kn} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} = \Delta + \lambda \cdot 0 = \Delta.$$

Свойство 8 широко используется при вычислении определителей. Опираясь на это свойство при вычислении определителей третьего и более высоких порядков, стараются в некоторой строке получить нули за исключением, быть может, одного элемента, а затем разлагают определитель по этой строке. Ниже (свойство 12) будет доказано, что все свойства определителей, доказанные для его строк, справедливы и для столбцов. Соответствующий пример 1.7 рассмотрим ниже после изучения основных свойств определителей.

Свойство 9. Сумма произведений элементов какой-либо строки определителя на алгебраические дополнения соответствующих элементов другой строки равна нулю.

Доказательство. Требуется доказать, что если $k \neq i$ ($i, k \in \{1, 2, \dots, n\}$), то

$$a_{k1}A_{i1} + a_{k2}A_{i2} + \cdots + a_{kn}A_{in} = 0. \quad (1.34)$$

Если $k = i$, то в силу свойства 3

$$a_{i1}A_{i1} + a_{i2}A_{i2} + \cdots + a_{in}A_{in} = |A|. \quad (1.35)$$

Замена в (1.35) элементов i -й строки $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}$ на элементы k -й строки $a_{k1}, a_{k2}, \dots, a_{kn}$, $k \neq i$, приводит к алгебраической сумме (1.34). В результате получается новый определитель $|A_1|$, который отличается от определителя $|A|$ тем, что в его i -й строке будут размещены элементы k -й строки, т. е. определитель $|A_1|$ содержит две одинаковые строки и согласно свойству 2 равен нулю:

$$\sum_{j=1}^n a_{kj}A_{ij} = |A_1| = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \cdots & a_{kn} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \cdots & a_{kn} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} = 0. \quad \blacksquare$$

Уместно отметить, что если определитель $|A_1|$ записан в виде

$$|A_1| = h_1A_{i1} + h_2A_{i2} + \cdots + h_nA_{in},$$

то положение элементов $h_1, h_2, \dots, h_n$ в нем определяют индексы $i1, i2, \dots, in$ алгебраических дополнений:

$$|A_1| = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{i-1,1} & a_{i-1,2} & \cdots & a_{i-1,n} \\ h_1 & h_2 & \cdots & h_n \\ a_{i+1,1} & a_{i+1,2} & \cdots & a_{i+1,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}.$$

Пусть, например,

$$|A| = \begin{vmatrix} -2 & 3 & 0 & 1 \\ 1 & 4 & -2 & 3 \\ 5 & 1 & 7 & -6 \\ -4 & 3 & 2 & 1 \end{vmatrix},$$

а другой определитель $|A_1|$ записан в виде алгебраической суммы

$$|A_1| = 7A_{31} - 2A_{32} + 9A_{33} - 4A_{34},$$

где $A_{31}, A_{32}, A_{33}, A_{34}$ — алгебраические дополнения элементов 3-й строки определителя A .

Тогда определитель $|A_1|$ получается из определителя $|A|$ замещением его третьей строки вектором-строкой $(7 \ -2 \ 9 \ -4)$:

$$|A_1| = \begin{vmatrix} -2 & 3 & 0 & 1 \\ 1 & 4 & -2 & 3 \\ 7 & -2 & 9 & -4 \\ -4 & 3 & 2 & 1 \end{vmatrix}.$$

Свойство 10. Если некоторая строка определителя является линейной комбинацией других строк, то определитель равен нулю.

Доказательство. Пусть некоторая строка определителя является линейной комбинацией k , $k \leq n - 1$, других его строк. В соответствии со свойством 7 такой определитель можно представить в виде суммы k определителей, содержащих пропорциональные строки. Согласно свойству 6 каждый такой определитель будет равен нулю, а значит, равен нулю и суммарный определитель. ■

Свойство 11. Определитель нижней треугольной матрицы равен произведению элементов главной диагонали этой матрицы.

Доказательство. Пусть

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

— нижняя треугольная матрица. Вычислим ее определитель разложением по первой строке:

$$|A| = \begin{vmatrix} a_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} = a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & 0 & \cdots & 0 \\ a_{32} & a_{33} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}.$$

Полученный определитель $(n - 1)$ -го порядка вновь является определителем нижней треугольной матрицы. Разложим и этот определитель по первой строке:

$$|A| = a_{11}a_{22} \begin{vmatrix} a_{33} & 0 & \cdots & 0 \\ a_{43} & a_{44} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n3} & a_{n4} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}.$$

Продолжив и дальше этот процесс, получим в итоге

$$|A| = a_{11}a_{22}a_{33} \cdots a_{nn}.$$

Замечание. Аналогично доказывается, что и определитель верхней треугольной матрицы равен произведению элементов главной диагонали

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ 0 & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ 0 & 0 & a_{33} & \cdots & a_{3n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22}a_{33} \cdots a_{nn}.$$

Для формулирования и доказательства следующего свойства потребуется ряд новых понятий.

Пусть $i_1, i_2, \dots, i_n$ — индексы, принимающие различные значения из множества чисел $1, 2, \dots, n$.

Определение 1.18. Любая запись индексов $i_1, i_2, \dots, i_n$ в определенном порядке называется их *перестановкой*.

Например, из трех чисел $1, 2, 3$ можно составить 6 различных перестановок: $123, 132, 213, 231, 312, 321$. Число перестановок из n индексов (символов) обозначается символом P_n . Легко установить, что $P_n = n!$ (читается «эн факториал»). Здесь $n! = 1 \cdot 2 \times 3 \cdots n$ — произведение n последовательных натуральных чисел от 1 до n . Например, $P_3 = 3! = 1 \cdot 2 \cdot 3$, $P_4 = 4! = 3! \cdot 4 = 24$, $P_5 = 5! = 4! \cdot 5 = 120$ и т. д.

Определение 1.19. Говорят, что индексы (числа) i_k и i_s образуют *инверсию* в перестановке $i_1, i_2, \dots, i_k, \dots, i_s, \dots, i_n$, если в этой перестановке индекс i_k предшествует индексу i_s и $i_s < i_k$.

Так, в перестановке 2143 из 4 символов число 1 образует инверсию с числом 2, а число 3 — с числом 4. В результате общее число инверсий в этой перестановке равно 2. Записывают это так: $\text{inv}(2, 1, 4, 3) = 1 + 1 = 2$. Еще один пример: $\text{inv}(4, 1, 3, 2) = 1 + 1 + 2 = 4$. Здесь 1 и 3 образуют инверсии с числом 4,

Миноры $\tilde{M}_{1j,2s}$, $s = \overline{1, n}$, $s \neq j$, являются определителями $(n-2)$ -го порядка. Их разложения по первой строке будут содержать соответственно по $(n-2)$ слагаемых.

Продолжив процесс последовательного разложения миноров, порядок которых с каждым шагом уменьшается на 1, на $(n-1)$ -м шаге мы получим определители второго порядка. Они, как известно, разлагаются в алгебраическую сумму двух слагаемых. Таким образом, общее число слагаемых в итоговом разложении определителя $|A_n|$ в сумму вида (1.36) будет равно $n(n-1)(n-2) \cdots 3 \cdot 2 = n!$.

Каждое слагаемое в полученной алгебраической сумме будет содержать n множителей $a_{1j_1} a_{2j_2} a_{3j_3} \cdots a_{nj_n}$. При этом первый множитель a_{1j_1} берется из первой строки и произвольного столбца j_1 , $j_1 \in \{1, 2, \dots, n\}$; второй множитель a_{2j_2} берется из второй строки и некоторого произвольного столбца за исключением столбца с номером j_1 ; третий множитель a_{1j_3} — из третьей строки и некоторого столбца за исключением столбцов с номерами j_1 и j_2 и т. д. Первая часть утверждения доказана.

Докажем теперь вторую часть утверждения — о выборе знака каждого слагаемого в формуле (1.36). Доказательство проведем методом математической индукции.

При $n = 2$ в соответствии с формулой (1.36) получаем

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = (-1)^{\text{inv}(1,2)} a_{11} a_{22} + (-1)^{\text{inv}(2,1)} a_{12} a_{21} = \\ = (-1)^0 a_{11} a_{22} + (-1)^1 a_{12} a_{21} = a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}.$$

А это и есть определитель второго порядка.

Предположим теперь, что формула (1.36) справедлива при $n := n-1$. Это означает, в частности, что в разложении (1.27) определителя n -го порядка по первой строке все алгебраические дополнения $A_{11}, A_{12}, \dots, A_{1n}$, являющиеся определителями $(n-1)$ -го порядка, можно заменить суммами вида (1.36):

$$A_{1j} = (-1)^{1+j} \sum_{\substack{j_2, j_3, \dots, j_n \\ j_k \neq j}} (-1)^{\text{inv}(j_2, j_3, \dots, j_n)} a_{2j_2} a_{3j_3} \cdots a_{nj_n}, \\ j = 1, 2, \dots, n.$$

Каждое слагаемое в составе этих сумм является произведением $(n-1)$ элементов определителя, взятых по одному из разных строк, начиная со второй, и из разных столбцов с первого по

n -й, за исключением j -го. В итоге разложение (1.27) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} |A_n| &= \sum_{j=1}^n a_{1j} (-1)^{1+j} \sum_{\substack{j_2, j_3, \dots, j_n \\ j_k \neq j}} (-1)^{\text{inv}(j_2, j_3, \dots, j_n)} a_{2j_2} a_{3j_3} \cdots a_{nj_n} = \\ &= \sum_{j=1}^n \sum_{\substack{j_2, j_3, \dots, j_n \\ j_k \neq j}} (-1)^{1+j} (-1)^{\text{inv}(j_2, j_3, \dots, j_n)} a_{1j} a_{2j_2} a_{3j_3} \cdots a_{nj_n}. \end{aligned}$$

Полученную двойную сумму можно записать в искомом виде (1.36), если учесть, что

$$(-1)^{1+j+\text{inv}(j_2, j_3, \dots, j_n)} = (-1)^{\text{inv}(j_1, j_2, \dots, j_n)}.$$

Действительно, если $j_k < j$, то число j в перестановке $j_1 j_2 j_3 \dots j_n$ образует инверсию с числом (индексом) j_k . Например, $\text{inv}(1, j_2, j_3, \dots, j_n) = 0 + \text{inv}(j_2, j_3, \dots, j_n)$, поскольку для всех индексов j_k справедливо неравенство $j_k > 1$; аналогично, $\text{inv}(2, j_2, j_3, \dots, j_n) = 1 + \text{inv}(j_2, j_3, \dots, j_n)$, поскольку только один индекс j_k в перестановке $2 j_2 j_3 \dots j_n$ равен 1 и потому образует инверсию с числом 2. При $j = 3$ уже два числа (1 и 2) будут образовывать инверсии с числом 3 (в дополнение к уже имеющимся) и потому $\text{inv}(3, j_2, j_3, \dots, j_n) = 2 + \text{inv}(j_2, j_3, \dots, j_n)$. Для произвольного числа $j \in \{1, 2, \dots, n\}$ получаем формулу $\text{inv}(j, j_2, j_3, \dots, j_n) = j - 1 + \text{inv}(j_2, j_3, \dots, j_n)$. Числа

$$j - 1 + \text{inv}(j_2, j_3, \dots, j_n) \quad \text{и} \quad 1 + j + \text{inv}(j_2, j_3, \dots, j_n)$$

имеют одинаковую четность, поэтому

$$(-1)^{1+j+\text{inv}(j_2, j_3, \dots, j_n)} = (-1)^{j-1+\text{inv}(j_2, j_3, \dots, j_n)} = (-1)^{\text{inv}(j_1, j_2, \dots, j_n)}.$$

Вторая часть утверждения доказана. Как следствие, доказана справедливость формулы (1.36). ■

Замечание 1. Практическое вычисление определителей по формуле (1.36) неудобно. Однако такой способ вычисления определителя вскрывает его внутреннюю структуру, позволяет понять логику формирования числа, которое ставится в соответствие каждой квадратной матрице и называется ее определителем.

Замечание 2. Формула (1.36) позволяет легко доказывать многие свойства определителя. Например, из нее сразу следует вывод о равенстве нулю определителя, содержащего строку из

нулей. Наиболее просто доказывается с ее помощью и следующее свойство определителя.

Свойство 13. В формуле (1.36) первые индексы элементов определителя $|A_n|$ упорядочены по возрастанию. Вообще их можно располагать в любом порядке, в этом случае

$$|A_n| = \sum (-1)^{\text{inv}(i_1, i_2, \dots, i_n) + \text{inv}(k_1, k_2, \dots, k_n)} a_{i_1 k_1} a_{i_2 k_2} \cdots a_{i_n k_n}. \quad (1.37)$$

Доказательство. Произведение $a_{i_1 k_1} a_{i_2 k_2} \cdots a_{i_n k_n}$ получается из произведения $a_{1 j_1} a_{2 j_2} \cdots a_{n j_n}$ перестановкой его множителей. Поэтому достаточно доказать, что слагаемое $a_{i_1 k_1} a_{i_2 k_2} \cdots a_{i_n k_n}$ входит в определитель со знаком $(-1)^{\text{inv}(i_1, i_2, \dots, i_n) + \text{inv}(k_1, k_2, \dots, k_n)}$.

Если в произведении $a_{1 j_1} a_{2 j_2} \cdots a_{n j_n}$ поменять местами любые два множителя $a_{k j_k}$ и $a_{m j_m}$, $k < m$, то после перестановки первые два индекса будут образовывать инверсию. Вторые два индекса j_k и j_m либо будут образовывать инверсию, если до перестановки не образовывали ее, либо наоборот. В обоих случаях суммарное число инверсий этих пар индексов будет четным: либо $1 + 1 = 2$, либо $1 - 1 = 0$. Поэтому четность всей суммы индексов останется без изменения. В произведении $a_{i_1 k_1} a_{i_2 k_2} \cdots a_{i_n k_n}$ порядок следования множителей можно поменять местами за конечное число перестановок так, что первые индексы будут идти в порядке возрастания. Четность суммы $\text{inv}(i_1, i_2, \dots, i_n) + \text{inv}(k_1, k_2, \dots, k_n)$ при этом останется без изменения. ■

Свойство 14. При транспонировании квадратной матрицы ее определитель не меняется, т. е. $|A^T| = |A|$.

Доказательство. В соответствии с формулой (1.36)

$$|A| = \sum_{j_1, j_2, \dots, j_n} (-1)^{\text{inv}(j_1, j_2, \dots, j_n)} a_{1 j_1} a_{2 j_2} \cdots a_{n j_n}.$$

Транспонирование матрицы A приведет к тому, что каждый ее элемент a_{ij} , $j \neq i$, переместится из ячейки (i, j) в ячейку (j, i) . Пусть b_{ij} , $j = \overline{1, n}$, — элементы определителя $|A^T|$. Отметим, что $b_{ij} = a_{ji}$. Согласно (1.37) будем иметь

$$\begin{aligned}
 |A^T| &= \sum_{j_1, j_2, \dots, j_n} (-1)^{\text{inv}(j_1, j_2, \dots, j_n) + \text{inv}(1, 2, \dots, n)} b_{j_1 1} b_{j_2 2} \cdots b_{j_n n} = \\
 &= \left| \begin{matrix} b_{j_s s} = a_{s j_s} \\ \text{inv}(1, 2, \dots, n) = 0 \end{matrix} \right| = \\
 &= \sum_{j_1, j_2, \dots, j_n} (-1)^{\text{inv}(j_1, j_2, \dots, j_n)} a_{1 j_1} a_{2 j_2} \cdots a_{n j_n} = |A|. \blacksquare
 \end{aligned}$$

Свойство 14 устанавливает *равноправность строк и столбцов* определителя. Поэтому *все свойства*, доказанные выше для строк определителя, имеют аналоги, справедливые для столбцов.

Рассмотрим пример вычисления определителя четвертого порядка с использованием основных свойств определителя.

Пример 1.7. Вычислить определитель

$$\Delta = \begin{vmatrix} -2 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 3 & 2 & 0 \\ -1 & 1 & 3 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{vmatrix}.$$

Решение. Преобразуем определитель так, чтобы в некоторой его строке (столбце) получилось как можно больше нулей, а затем разложим его по этой строке (столбцу). Для этого выбирается столбец (строка), наиболее удобный для получения искоемых нулей; он называется *рабочим*.

В данном случае удобно получать нули в 1-м столбце, взяв в качестве рабочей 2-ю строку. С помощью этой строки (вернее, с помощью элемента $a_{21} = 1$) получим нули в первом столбце на месте элементов $a_{11} = -2$ и $a_{31} = -1$:

$$\begin{aligned}
 &\begin{vmatrix} -2 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 3 & 2 & 0 \\ -1 & 1 & 3 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{vmatrix} = \\
 &= \begin{vmatrix} (2\text{-я стр.} - \text{рабочая}) \\ 1\text{-я стр.} = 1\text{-я стр.} + 2 \cdot 2\text{-я стр.} \\ 3\text{-я стр.} = 3\text{-я стр.} + 1 \cdot 2\text{-я стр.} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 7 & 4 & 1 \\ 1 & 3 & 2 & 0 \\ 0 & 4 & 5 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{vmatrix} = \\
 &= 1 \cdot (-1)^{2+1} \begin{vmatrix} 7 & 4 & 1 \\ 4 & 5 & -1 \\ 1 & 0 & 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 7 & 4 & -13 \\ 4 & 5 & -9 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} 4 & -13 \\ 5 & -9 \end{vmatrix} = \\
 &\quad \begin{matrix} \textcircled{-2} \longrightarrow \uparrow \end{matrix} \quad \quad \quad = -(-36 + 65) = -29.
 \end{aligned}$$

Ответ: $\Delta = -29$.

Преобразованный определитель четвертого порядка разложен по первому столбцу, а определитель третьего порядка — по третьей строке. При вычислении данного определителя использованы два способа записи комментариев. В первом случае в явном виде используется поле комментария — пространство между двумя вертикальными отрезками; во втором — при вычислении определителя третьего порядка — под рабочим столбцом (первый столбец) записывается множитель, на который нужно умножить элементы рабочего столбца, а стрелкой указан столбец (третий столбец), к элементам которого необходимо прибавить соответствующие результаты умножения. Второй способ удобен при вычислении определителей на практических занятиях.

Например,

$$\Delta = \begin{vmatrix} 2 & 4 & -3 \\ 5 & 3 & 2 \\ 7 & 9 & -5 \end{vmatrix} \begin{array}{l} \textcircled{-2} \quad \textcircled{-3} \\ \leftarrow \quad \leftarrow \\ \leftarrow \end{array} = \begin{vmatrix} 2 & 4 & -3 \\ 1 & -5 & 8 \\ 1 & -3 & 4 \end{vmatrix} \begin{array}{l} \leftarrow \quad \leftarrow \\ \leftarrow \quad \textcircled{-1} \quad \textcircled{-2} \\ \leftarrow \end{array} = \begin{vmatrix} 0 & 10 & -11 \\ 0 & -2 & 4 \\ 1 & 3 & 4 \end{vmatrix} = \\ = 1 \cdot \begin{vmatrix} 10 & -11 \\ -2 & 4 \end{vmatrix} = 40 - 22 = 18.$$

Нули в строке (столбце) удобно получать с помощью единицы. В приведенном примере показано, как можно получить число 1 в определителе, не содержащем единиц.

Свойство 15. *Определитель произведения двух квадратных матриц порядка n равен произведению определителей этих матриц, т. е.*

$$|AB| = |A| \cdot |B|.$$

Доказательство данного свойства можно найти в учебниках по алгебре, например в книге [2].

Рассмотрим еще одно, хотя и частное, но очень важное для приложений, свойство определителя специального вида.

Определитель Вандермонда. В теории дифференциальных уравнений и в некоторых других разделах математики встречается определитель, называемый *определителем Вандермонда* ¹⁾:

¹⁾ Вандермонд Александр Теофиль (Vandermonde Alexandre Théophil, 1735–1796) — французский математик. Рассмотрел определитель $\Delta_3(a_1, a_2, a_3)$. В общем случае результат получен О. Коши в 1815 г.

$$\Delta_n(a_1, a_2, \dots, a_n) = \begin{vmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ a_1 & a_2 & \dots & a_n \\ a_1^2 & a_2^2 & \dots & a_n^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_1^{n-1} & a_2^{n-1} & \dots & a_n^{n-1} \end{vmatrix}.$$

Утверждение. *Справедлива формула*

$$\Delta_n(a_1, a_2, \dots, a_n) = \prod_{1 \leq j < i \leq n} (a_i - a_j). \quad (1.38)$$

Правая часть формулы (1.38) является краткой формой записи произведения $\frac{(n-1)n}{2}$ двучленов вида $(a_i - a_j)$, где $1 \leq j < i \leq n$. Это произведение формируется следующим образом:

- фиксируется значение $j = 1$, а индексу i последовательно присваивают значения $2, 3, \dots, n$; в результате получается произведение первых $(n-1)$ множителей

$$(a_2 - a_1)(a_3 - a_1) \dots (a_n - a_1);$$

- значение индекса j увеличивается на 1, т. е. $j = 2$, а индексу i последовательно присваивают значения $3, 4, \dots, n$ и составляют произведение $(a_3 - a_2)(a_4 - a_2) \dots (a_n - a_2)$;

- продолжая процесс последовательного увеличения значения индекса j на 1 до $j = n-1$ и составляя на каждом шаге соответствующие произведения, получаем в итоге

$$\begin{aligned} \Delta_n(a_1, a_2, \dots, a_n) &= \underbrace{(a_2 - a_1)(a_3 - a_1) \dots (a_n - a_1)}_{(j=1)} \times \\ &\times \underbrace{(a_3 - a_2)(a_4 - a_2) \dots (a_n - a_2)}_{(j=2)} \dots \underbrace{(a_n - a_{n-1})}_{(j=n-1)} = \prod_{1 \leq j < i \leq n} (a_i - a_j). \end{aligned}$$

Доказательство формулы (1.38). В определителе Δ_n вычтем из каждой строки, начиная с n -й, предыдущую, умноженную на a_1 :

$$\Delta_n(a_1, a_2, \dots, a_n) = \begin{vmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & a_2 - a_1 & \dots & a_n - a_1 \\ 0 & a_2^2 - a_2 a_1 & \dots & a_n^2 - a_n a_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & a_2^{n-1} - a_2^{n-2} a_1 & \dots & a_n^{n-1} - a_n^{n-2} a_1 \end{vmatrix}.$$

Разложим полученный определитель по первому столбцу:

$$\begin{aligned}\Delta_n(a_1, a_2, \dots, a_n) &= \\ &= \begin{vmatrix} a_2 - a_1 & a_3 - a_1 & \cdots & a_n - a_1 \\ a_2(a_2 - a_1) & a_3(a_3 - a_1) & \cdots & a_n(a_n - a_1) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_2^{n-2}(a_2 - a_1) & a_3^{n-2}(a_3 - a_1) & \cdots & a_n^{n-2}(a_n - a_1) \end{vmatrix}.\end{aligned}$$

Каждый i -й столбец полученного определителя ($i = 2, 3, \dots, n$) содержит общий множитель $(a_i - a_1)$. Согласно свойству 4 вынесем общий множитель каждого столбца за знак определителя:

$$\begin{aligned}\Delta_n &= (a_2 - a_1)(a_3 - a_1) \cdots (a_n - a_1) \begin{vmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ a_2 & a_3 & \cdots & a_n \\ a_2^2 & a_3^2 & \cdots & a_n^2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_2^{n-2} & a_3^{n-2} & \cdots & a_n^{n-2} \end{vmatrix} = \\ &= \prod_{i=2}^n (a_i - a_1) \cdot \Delta_{n-1}.\end{aligned}$$

В результате первого шага получено произведение первых $(n-1)$ множителей $(a_i - a_1)$, $i = 2, 3, \dots, n$, и определителя Вандермонда, но уже $(n-1)$ -го порядка, т. е. получено рекуррентное соотношение

$$\Delta_n = \Delta_{n-1} \prod_{i=2}^n (a_i - a_1).$$

Используя это соотношение, получаем:

$$\Delta_{n-1} = \Delta_{n-2} \prod_{i=3}^n (a_i - a_2),$$

$$\Delta_{n-2} = \Delta_{n-3} \prod_{i=4}^n (a_i - a_3),$$

.....

$$\Delta_3 = \Delta_2 \prod_{i=n-1}^n (a_i - a_{n-2}) = \Delta_2(a_{n-1} - a_{n-2})(a_n - a_{n-2}),$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ a_{n-1} & a_n \end{vmatrix} = a_n - a_{n-1}.$$

Объединяя эти результаты, приходим к искомой формуле

$$\Delta_n(a_1, a_2, \dots, a_n) = \prod_{1 \leq j < i \leq n} (a_i - a_j).$$

Пример 1.8. Вычислить определитель

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 2 & \dots & n \\ 1 & 2^2 & \dots & n^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 2^{n-1} & \dots & n^{n-1} \end{vmatrix}.$$

Решение. Имеем определитель Вандермонда $\Delta_n(1, 2, \dots, n)$. В соответствии с формулой (1.38) получаем

$$\begin{aligned} \Delta &= (2-1)(3-1) \cdots (n-1) \cdot \\ &\quad \cdot (3-2)(4-2) \cdots (n-2) \cdots (n-(n-1)) = \\ &= (1 \cdot 2 \cdots (n-1))(1 \cdot 2 \cdots (n-2)) \cdots (1 \cdot 2) \cdot 1 = \\ &= (n-1)!(n-2)! \cdots 2! \cdot 1, \end{aligned}$$

$$\text{или } \Delta = 1^{n-1} 2^{n-2} 3^{n-3} \cdots (n-2)^2 (n-1).$$

$$\text{Ответ: } 2^{n-2} 3^{n-3} \cdots (n-2)^2 (n-1).$$

Вопросы для самоконтроля к п. 2.3

1. Чем отличается минор M_{ij} элемента a_{ij} квадратной матрицы A_n от его алгебраического дополнения A_{ij} ? Если $A_{7,10} = 13$, то $M_{7,10} = ?$

2. Определитель квадратной матрицы A равен Δ . Чему равен определитель матрицы αA , $\alpha \in \mathbb{R}$?

3. Определитель матрицы A_n равен Δ . Некоторую строку матрицы A_n умножили на число α , $\alpha \in \mathbb{R}$, и прибавили к ней другую строку данной матрицы, умноженную на число β , $\beta \in \mathbb{R}$. Чему равен определитель преобразованной матрицы?

4. Чему равен определитель треугольной матрицы?

5. $\det(A_n B_n C_n) = ?$

6. Если в определителе $|A_n| = \Delta$ поменять местами две строки, а после этого еще и два произвольных столбца, то как изменится значение определителя?

7. Чему равна сумма произведений элементов некоторого столбца определителя на алгебраические дополнения другого столбца?

12. Запишите определитель $|(a_{ij})|$, $1 \leq i, j \leq 4$, в виде алгебраической суммы 24 слагаемых, каждое из которых есть произведение элементов определителя, выбранных в соответствии со свойством 12.

1. Только знаком, если сумма $i + j$ индексов нечетна. $M_{7,10} = -13$. **2.** $\alpha^n \Delta$. **3.** $\alpha \Delta$. **4.** $a_{11} a_{22} \cdots a_{nn}$. **5.** $|A_n| \cdot |B_n| \cdot |C_n|$. **6.** Не изменится, так как $\Delta_1 = (-1)^2 \Delta = \Delta$. **7.** 0. **8.** 10. **9.** а) Увеличится в 2^n раз; б) уменьшится в 3^n раз.

[illegible]

можно записать в матричной форме $AX = B$, где A — матрица из коэффициентов при неизвестных (основная матрица СЛАУ), $X = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n)^T$ — вектор-столбец неизвестных, $B = (b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n)^T$ — вектор-столбец свободных членов СЛАУ.

Зададим вопросы: можно ли по аналогии с линейным уравнением $ax = b$ записать решение СЛАУ $AX = B$ в виде $X = BA^{-1}$ или $X = A^{-1}B$? если да, то при каких условиях? каков смысл объекта A^{-1} (очевидно, матрицы!)?

Для того чтобы ответить на эти вопросы, необходимо ввести некоторые новые понятия и главное среди них — понятие обратной матрицы.

Пусть A — квадратная матрица порядка n .

Определение 1.20. Квадратная матрица B порядка n называется *обратной к матрице A* того же порядка, если

$$AB = BA = E,$$

где E — единичная матрица порядка n .

Обратная матрица к матрице A обозначается обычно A^{-1} . Таким образом, A^{-1} — обратная матрица к матрице A , если выполняется матричное равенство

$$A \cdot A^{-1} = A^{-1}A = E.$$

Определение 1.21. Квадратная матрица A называется *невырожденной*, если ее определитель отличен от нуля: $|A| \neq 0$; если же $|A| = 0$, то матрица A называется *вырожденной*.

Теорема 1.3. *Вырожденная матрица не имеет обратной.*

Доказательство. Дано: $|A| = 0$. Требуется доказать, что обратная матрица к A не существует. Допустим противное, а именно, что обратная матрица A^{-1} существует и $AA^{-1} = A^{-1}A = E$. Тогда $\det(AA^{-1}) = \det E = 1$. С другой стороны, $|AA^{-1}| = |A| \cdot |A^{-1}|$, но по условию теоремы $|A| = 0$ и потому $\det(AA^{-1}) = \det A \det A^{-1} = 0$. Получили противоречие — неверное равенство: $1 = 0$. Поэтому предположение о существовании обратной матрицы для вырожденной матрицы необходимо отвергнуть. ■

Следствие. Если матрица A имеет обратную, то она невырожденная ($|A| \neq 0$) и при этом $|A^{-1}| = \frac{1}{|A|}$.

Теорема 1.4. Если матрица A имеет обратную A^{-1} , то обратная матрица единственна.

Доказательство. Предположим, что матрица A имеет две обратные A_1^{-1} и A_2^{-1} , т. е. $AA_1^{-1} = A_1^{-1}A = E$ и $AA_2^{-1} = A_2^{-1}A = E$. Умножим матричное равенство $A \cdot A_1^{-1} = E$ слева на матрицу A_2^{-1} : $A_2^{-1}(AA_1^{-1}) = A_2^{-1}E = A_2^{-1}$. С другой стороны,

$$A_2^{-1}(AA_1^{-1}) = (A_2^{-1}A)A_1^{-1} = EA_1^{-1} = A_1^{-1},$$

и потому

$$A_2^{-1} = A_1^{-1}.$$

Из теорем 1.3 и 1.4 следует, что обратную матрицу может иметь только невырожденная матрица, и если обратная матрица существует, то она единственна. Поэтому если мы сможем указать для данной невырожденной матрицы A такую матрицу B , что $AB = BA = E$, то она будет искомой обратной матрицей A^{-1} к матрице A .

Следующая теорема дает конструктивный алгоритм нахождения такой матрицы B , т. е. обратной матрицы для каждой невырожденной квадратной матрицы A .

Теорема 1.5. Если матрица A является невырожденной, то матрица

$$B = \frac{1}{|A|} \begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} & \cdots & A_{n1} \\ A_{12} & A_{22} & \cdots & A_{n2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ A_{1n} & A_{2n} & \cdots & A_{nn} \end{pmatrix},$$

где A_{ij} — алгебраическое дополнение к элементу a_{ij} ($i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$) является обратной к матрице A .

Доказательство. Достаточно доказать, что

$$AB = BA = E.$$

Докажем равенство $AB = E$:

$$\begin{aligned}
 AB &= \frac{1}{|A|} \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} & \cdots & A_{n1} \\ A_{12} & A_{22} & \cdots & A_{n2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ A_{1n} & A_{2n} & \cdots & A_{nn} \end{pmatrix} = \\
 &= \frac{1}{|A|} \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^n a_{1j}A_{1j} & \sum_{j=1}^n a_{1j}A_{2j} & \cdots & \sum_{j=1}^n a_{1j}A_{nj} \\ \sum_{j=1}^n a_{2j}A_{1j} & \sum_{j=1}^n a_{2j}A_{2j} & \cdots & \sum_{j=1}^n a_{2j}A_{nj} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \sum_{j=1}^n a_{nj}A_{1j} & \sum_{j=1}^n a_{nj}A_{2j} & \cdots & \sum_{j=1}^n a_{nj}A_{nj} \end{pmatrix}.
 \end{aligned}$$

В этой матрице:

- алгебраические суммы на главной диагонали являются разложениями определителя $|A|$ матрицы A соответственно по 1-й, 2-й, ..., n -й строке и потому

$$\sum_{j=1}^n a_{1j}A_{1j} = |A|, \quad \sum_{j=1}^n a_{2j}A_{2j} = |A|, \dots, \sum_{j=1}^n a_{nj}A_{nj} = |A|;$$

- остальные алгебраические суммы (расположенные вне главной диагонали) равны нулю как суммы произведений элементов одной строки определителя на алгебраические дополнения элементов другой строки (свойство 9 определителя).

Таким образом,

$$AB = \frac{1}{|A|} \begin{pmatrix} |A| & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & |A| & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & |A| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix}.$$

Аналогично доказывается равенство $BA = E$. Значит, матрица B действительно является обратной к A и потому $A^{-1} = B$. ■

Алгоритм построения обратной матрицы.

1. Вычисляем определитель $|A|$ для заданной квадратной матрицы A порядка n . Если $|A| \neq 0$, т. е. матрица A невырожденная, то переходим к п. 2. Если же $|A| = 0$, то обратная матрица для данной вырожденной матрицы не существует и вычисления прекращаются.

2. Вычисляем алгебраические дополнения $A_{11}, A_{21}, \dots, A_{n1}; A_{12}, A_{22}, \dots, A_{n2}; \dots, A_{nn}$.

3. Составляем обратную матрицу

$$A^{-1} = \frac{1}{|A|} \begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} & \cdots & A_{n1} \\ A_{12} & A_{22} & \cdots & A_{n2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ A_{1n} & A_{2n} & \cdots & A_{nn} \end{pmatrix}. \quad (1.39)$$

4. ¹⁾ Осуществляем проверку: верно ли равенство $AA^{-1} = E$ или $A^{-1}A = E$? Если произведение AA^{-1} или $A^{-1}A$ равно единичной матрице, то найденная матрица A^{-1} действительно является обратной к A . ■

Замечание. Из двух проверок матричных равенств $AB = E$ и $BA = E$ достаточно выполнить одну. Если для невырожденной матрицы A найдена матрица B такая, что $AB = E$, то $B = A^{-1}$. Действительно, так как $\det A \neq 0$, то существует A^{-1} такая, что $A^{-1}A = E$. Умножим равенство $AB = E$ слева на матрицу A^{-1} :

$$A^{-1}(AB) = A^{-1}E \Rightarrow (A^{-1}A)B = A^{-1} \Rightarrow EB = A^{-1} \Rightarrow B = A^{-1}.$$

Аналогично: если $BA = E$, то $B = A^{-1}$.

Пример 1.9. Выяснить, существует ли обратная матрица для данной матрицы

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 0 & -2 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \end{pmatrix},$$

и если существует, то найти ее.

Решение. 1.

$$|A| = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 0 & -2 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \end{vmatrix} \begin{matrix} \textcircled{-1} \\ \uparrow \\ \leftarrow \end{matrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 0 & -2 & 1 \\ 0 & -1 & -1 \end{vmatrix} = 1 \begin{vmatrix} -2 & 1 \\ -1 & -1 \end{vmatrix} = 3.$$

¹⁾ Этот шаг включен в алгоритм только для проверки отсутствия вычислительных ошибок.

Матрица A невырожденная, значит, обратная к ней существует.

$$\begin{aligned}
 2. \quad A_{11} &= (-1)^{1+1} \begin{vmatrix} -2 & 1 \\ -1 & 1 \end{vmatrix} = -1; & A_{21} &= (-1)^{2+1} \begin{vmatrix} 0 & 2 \\ -1 & 1 \end{vmatrix} = -2; \\
 A_{31} &= (-1)^{3+1} \begin{vmatrix} 0 & 2 \\ -2 & 1 \end{vmatrix} = 4; & A_{12} &= (-1)^{1+2} \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = 1; \\
 A_{22} &= (-1)^{2+2} \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = -1; & A_{32} &= (-1)^{3+2} \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = -1; \\
 A_{13} &= (-1)^{1+3} \begin{vmatrix} 0 & -2 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} = 2; & A_{23} &= (-1)^{2+3} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} = 1; \\
 A_{33} &= (-1)^{3+3} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -2 \end{vmatrix} = -2.
 \end{aligned}$$

$$3. \quad A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} -1 & -2 & 4 \\ 1 & -1 & -1 \\ 2 & 1 & -2 \end{pmatrix}.$$

4. Проверка:

$$\begin{aligned}
 A^{-1} \cdot A &= \frac{1}{3} \begin{pmatrix} -1 & -2 & 4 \\ 1 & -1 & -1 \\ 2 & 1 & -2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 0 & -2 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \end{pmatrix} = \\
 &= \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.
 \end{aligned}$$

Вывод: построенная матрица A^{-1} действительно является обратной к матрице A .

$$\text{Ответ: } A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} -1 & -2 & 4 \\ 1 & -1 & -1 \\ 2 & 1 & -2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{4}{3} \\ \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} \end{pmatrix}.$$

Определение 1.22. Матрица

$$\tilde{A}^T = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} & \cdots & A_{n1} \\ A_{12} & A_{22} & \cdots & A_{n2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ A_{1n} & A_{2n} & \cdots & A_{nn} \end{pmatrix},$$

транспонированная к матрице (A_{ij}) , $i, j = \overline{1, n}$, алгебраических дополнений, называется *присоединенной* к A .

С учетом этого определения формула (1.39) принимает следующий вид:

$$A^{-1} = \frac{1}{|A|} \tilde{A}^T. \quad (1.40)$$

Свойства обратной матрицы.

1. $(A^{-1})^{-1} = A$.

Доказательство. В соответствии с определением обратной матрицы $(A^{-1})^{-1}A^{-1} = A^{-1}(A^{-1})^{-1} = E$, но и $AA^{-1} = A^{-1}A = E$. Поскольку матрица A^{-1} единственна, то $(A^{-1})^{-1} = A$. ■

2. $(A^T)^{-1} = (A^{-1})^T$.

Доказательство. Дано: $(A^T)^{-1}A^T = A^T(A^T)^{-1} = E$. Требуется доказать, что $(A^{-1})^TA^T = E$. Рассмотрим равенство $AA^{-1} = E$ и применим к нему операцию транспонирования:

$$(AA^{-1})^T = E^T \Leftrightarrow (A^{-1})^TA^T = E,$$

а это и есть доказываемое равенство. ■

3. $(AB)^{-1} = B^{-1}A^{-1}$.

Доказательство. Дано: $(AB)(AB)^{-1} = (AB)^{-1}(AB) = E$. Требуется доказать, что $(AB)(B^{-1}A^{-1}) = E$ и $(B^{-1}A^{-1})(AB) = E$. Действительно, по свойству ассоциативности произведения матриц имеем:

$$(AB)(AB)^{-1} = A(BB^{-1})A^{-1} = AEA^{-1} = AA^{-1} = E,$$

$$(B^{-1}A^{-1})(AB) = B^{-1}(A^{-1}A)B = B^{-1}EB = B^{-1}B = E,$$

что и требовалось доказать. ■

Альтернативный способ нахождения обратной матрицы заключается в следующем.

1. Составляем *блочную матрицу* $(A|E) = G$ размера $(n \times 2n)$, где A — исходная матрица порядка n , E — единичная матрица того же порядка.

2. С помощью цепочки *элементарных преобразований* над «сцепленными» строками матрицы G стараемся получить единичную матрицу на месте матрицы A . Тогда на месте матрицы E в блочной матрице G будет находиться искомая обратная матрица A^{-1} .

Определение 1.23. *Элементарными* называются следующие преобразования над строками блочной матрицы G :

- 1) перестановка строк;
- 2) умножение строки на число, отличное от нуля;
- 3) прибавление к одной строке другой, умноженной на некоторое число.

Пример 1.10. Найти с помощью элементарных преобразований обратную матрицу для матрицы, приведенной в примере 1.9.

Решение. При решении примера 1.9 было показано, что обратная матрица A^{-1} к матрице A существует.

1.

$$G = \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right).$$

2.

$$\begin{aligned} & \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \xrightarrow{\text{(-1) R}_3 \leftarrow \text{R}_3 - \text{R}_1} \sim \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 1 \end{array} \right) \xrightarrow{\text{(-2) R}_2 \leftarrow \text{R}_2 + 2\text{R}_3} \sim \\ & \sim \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 2 & 1 & -2 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 1 \end{array} \right) \cdot \frac{1}{3} \sim \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} \\ 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 1 \end{array} \right) \cdot (-1) \xrightarrow{\text{(-1) R}_3 \leftarrow \text{R}_3 + \text{R}_2} \sim \\ & \sim \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & -\frac{1}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{4}{3} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} \\ 0 & 1 & 0 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \end{array} \right) \xrightarrow{\text{R}_2 \leftrightarrow \text{R}_3} \sim \\ & \sim \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & -\frac{1}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{4}{3} \\ 0 & 1 & 0 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} \end{array} \right), \end{aligned}$$

откуда $A^{-1} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{4}{3} \\ \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} -1 & -2 & 4 \\ 1 & -1 & -1 \\ 2 & 1 & -2 \end{pmatrix}.$

Ответ: $A^{-1} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{4}{3} \\ \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} \end{pmatrix}.$

Обоснование метода будет дано в § 4.

Пример 1.11. Выяснить, имеет ли матрица

$$A = \begin{pmatrix} 2 & -1 & 1 \\ 2 & 0 & 1 \\ -2 & 2 & 0 \end{pmatrix}$$

обратную, и если имеет, то найдите ее.

Решение. 1.

$$|A| = \begin{vmatrix} 2 & -1 & 1 \\ 2 & 0 & 1 \\ -2 & 2 & 0 \end{vmatrix} \begin{matrix} \leftarrow \\ \text{⊖} \end{matrix} = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 2 & 0 & 1 \\ -2 & 2 & 0 \end{vmatrix} = (-1)^{2+3} \begin{vmatrix} 0 & -1 \\ -2 & 2 \end{vmatrix} = 2.$$

Поскольку $|A| \neq 0$, то существует обратная матрица.
2.

$$\begin{aligned} (A|E) &= \left(\begin{array}{ccc|ccc} 2 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ -2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \begin{matrix} \text{⊖} \text{⊕} \\ \leftarrow \\ \leftarrow \end{matrix} \sim \left(\begin{array}{ccc|ccc} 2 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{array} \right) \begin{matrix} \text{⊖} \\ \leftarrow \\ \leftarrow \end{matrix} \sim \\ &\sim \left(\begin{array}{ccc|ccc} 2 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & -1 & 1 \end{array} \right) \begin{matrix} \leftarrow \\ \text{⊕} \\ \text{⊖} \end{matrix} \sim \left(\begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & 0 & -2 & 2 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & -1 & 1 \end{array} \right) \begin{matrix} \times \frac{1}{2} \\ \text{⊖} \\ \text{⊖} \end{matrix} \sim \\ &\sim \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & -\frac{1}{2} \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & -1 & 1 \end{array} \right). \end{aligned}$$

На месте матрицы A получена единичная матрица, поэтому на месте матрицы E в составе блочной матрицы должна быть обратная A^{-1} . Проверим это:

$$AA^{-1} = \begin{pmatrix} 2 & -1 & 1 \\ 2 & 0 & 1 \\ -2 & 2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 & 1 & -\frac{1}{2} \\ -1 & 1 & 0 \\ 2 & -1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

$$\text{Ответ: } A^{-1} = \begin{pmatrix} -1 & 1 & -\frac{1}{2} \\ -1 & 1 & 0 \\ 2 & -1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Теперь мы можем ответить на вопросы, поставленные в начале параграфа.

3.2. Решение матричных уравнений

Рассмотрим матричное уравнение $AX = B$, где A — невырожденная квадратная матрица порядка n , $\dim B = n \times m$ и тогда $\dim X = n \times m$. Матрицы A и B заданы, матрицу X необходимо найти.

Определение 1.24. Матрица X_0 называется *решением матричного уравнения* $AX = B$, если при подстановке X_0 вместо матрицы X получаем систему *mn верных равенств*.

Умножим обе части матричного уравнения $AX = B$ слева на матрицу A^{-1} :

$$A^{-1}AX = A^{-1}B \Rightarrow EX = A^{-1}B.$$

Утверждение. Матрица $A^{-1}B$ является решением матричного уравнения $AX = B$.

Доказательство. Имеем

$$A(A^{-1}B) = (AA^{-1})B = EB = B. \quad \blacksquare$$

Пример 1.12. Решить матричное уравнение

$$\begin{pmatrix} 2 & -1 & 1 \\ 2 & 0 & 1 \\ -2 & 2 & 0 \end{pmatrix} X = \begin{pmatrix} 4 & -2 & 5 \\ 3 & -1 & 5 \\ -4 & 2 & -4 \end{pmatrix}.$$

Решение. Матрица $A = \begin{pmatrix} 2 & -1 & 1 \\ 2 & 0 & 1 \\ -2 & 2 & 0 \end{pmatrix}$ совпадает с матрицей A из примера 1.10, поэтому можем воспользоваться результатом этого примера: $A^{-1} = \begin{pmatrix} -1 & 1 & -\frac{1}{2} \\ -1 & 1 & 0 \\ 2 & -1 & 1 \end{pmatrix}$. Тогда

$$X = A^{-1}B = \begin{pmatrix} -1 & 1 & -\frac{1}{2} \\ -1 & 1 & 0 \\ 2 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 4 & -2 & 5 \\ 3 & -1 & 5 \\ -4 & 2 & -4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 \\ -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Ответ: $X = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \end{pmatrix}$.

Таким образом, если в матричном уравнении $AX = B$, где A и B — заданные матрицы, причем A — невырожденная матрица, то решение этого уравнения может быть найдено по формуле

$$X = A^{-1}B.$$

Решением матричного уравнения $XA = B$ будет матрица

$$X = BA^{-1}.$$

Вопросы для самоконтроля к пп. 3.1–3.2

1. Дайте определения вырожденной и невырожденной матриц.

2. Сформулируйте условия, при которых треугольная матрица имеет обратную.

3. Будет ли обратная матрица к невырожденной треугольной также треугольной? Если да, то сохранится ли при этом соответствие: обратная матрица к верхней треугольной является также верхней треугольной? Аналогично для нижней треугольной матрицы.

4. Пусть A , B , C — невырожденные квадратные матрицы одного порядка. Существует ли обратная матрица к матрице $D = ABC$? Если да, то как она связана с обратными матрицами A^{-1} , B^{-1} , C^{-1} ?

Умножим первое равенство на A_{1j} — алгебраическое дополнение элемента a_{1j} , $j \in \{1, 2, \dots, n\}$, второе на A_{2j} , ..., n -е равенство умножим на A_{nj} и сложим полученные равенства. Получим

$$\begin{aligned} (a_{11}A_{1j} + a_{21}A_{2j} + \dots + a_{n1}A_{nj})\tilde{x}_1 + (a_{12}A_{1j} + a_{22}A_{2j} + \dots + \\ + a_{n2}A_{nj})\tilde{x}_2 + \dots + (a_{1j}A_{1j} + a_{2j}A_{2j} + \dots + a_{nj}A_{nj})\tilde{x}_j + \dots + \\ + (a_{1n}A_{1j} + a_{2n}A_{2j} + \dots + a_{nn}A_{nj})\tilde{x}_n = \\ = b_1A_{1j} + b_2A_{2j} + \dots + b_nA_{nj}. \quad (1.42) \end{aligned}$$

В левой части полученного равенства алгебраические суммы перед всеми неизвестными, кроме x_j , равны нулю как алгебраические суммы произведений элементов одного столбца на алгебраические дополнения элементов другого столбца. Алгебраическая сумма перед $\tilde{x}_j$ является разложением определителя $\Delta_0 = |A_0|$ по j -му столбцу, т. е.

$$a_{1j}A_{1j} + a_{2j}A_{2j} + \dots + a_{nj}A_{nj} = \Delta_0.$$

Алгебраическая сумма $b_1A_{1j} + b_2A_{2j} + \dots + b_nA_{nj} = \Delta_j$ является определителем

$$\Delta_j = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & b_1 & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & b_2 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & b_n & \dots & a_{nn} \end{vmatrix}, \quad j \in \{1, 2, \dots, n\}.$$

Этот определитель получается из определителя Δ_0 замещением j -го столбца столбцом свободных членов СЛАУ (1.41).

В итоге равенство (1.42) преобразуется к виду

$$\Delta_0 \tilde{x}_j = \Delta_j, \quad j \in \{1, 2, \dots, n\}. \quad (1.43)$$

Если определитель Δ_0 основной матрицы СЛАУ отличен от нуля, то из (1.43) получаем

$$\tilde{x}_j = \frac{\Delta_j}{\Delta_0}.$$

Поскольку индекс j выбран произвольно, то полученная формула справедлива $\forall j \in \{1, 2, \dots, n\}$. Значит, если СЛАУ (1.41)

совместна, то упорядоченная последовательность n чисел (n -ка чисел)

$$\boxed{\tilde{x}_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta_0}, \tilde{x}_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta_0}, \dots, \tilde{x}_n = \frac{\Delta_n}{\Delta_0}} \quad (1.44)$$

является ее единственным решением.

Утверждение. Упорядоченная n -ка чисел (1.44) удовлетворяет системе уравнений (1.41).

Доказательство. Возьмем произвольное i -е уравнение $a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n = b_i$ системы и подставим в его левую часть числа (1.44):

$$\begin{aligned} a_{i1} \frac{\Delta_1}{\Delta_0} + a_{i2} \frac{\Delta_2}{\Delta_0} + \dots + a_{in} \frac{\Delta_n}{\Delta_0} &= \frac{1}{\Delta_0} \sum_{j=1}^n a_{ij} \Delta_j = \\ &= \frac{1}{\Delta_0} \sum_{k=1}^n a_{ij} \sum_{k=1}^n b_k A_{kj} = \frac{1}{\Delta_0} \sum_{k=1}^n b_k \sum_{j=1}^n a_{ij} A_{kj}. \end{aligned}$$

Здесь мы воспользовались тем, что определитель Δ_j можно записать в виде разложения по k -му столбцу ($\Delta_j = \sum_{k=1}^n b_k A_{kj}$), а на последнем этапе поменяли порядок суммирования. В соответствии со свойствами 3 и 9 определителя (п. 2.3.2) сумма $\sum_{j=1}^n a_{ij} A_{kj}$ будет равна нулю при $k \neq i$ и определителю Δ_0 основной матрицы СЛАУ (1.41) при $k = i$. В итоге получим

$$\frac{1}{\Delta_0} \sum_{k=1}^n b_k \sum_{j=1}^n a_{ij} A_{kj} = \frac{1}{\Delta_0} b_i \Delta_0 = b_i.$$

Равенство $a_{i1} \frac{\Delta_1}{\Delta_0} + a_{i2} \frac{\Delta_2}{\Delta_0} + \dots + a_{in} \frac{\Delta_n}{\Delta_0} = b_i$ доказано для произвольного $i \in \{1, 2, \dots, n\}$. Значит, действительно n -ка чисел (1.44) является решением СЛАУ (1.41). ■

Правило Крамера. Если определитель $\Delta_0 = |A_0|$ основной матрицы A_0 СЛАУ (1.41) отличен от нуля, то СЛАУ имеет единственное решение при любой правой части $B = (b_1, b_2, \dots, b_n)^\top$ и это решение находится по формулам Крамера (1.44).

Пример 1.13. Решить СЛАУ

$$\begin{cases} x_1 - 2x_2 + x_4 = 1, \\ 2x_1 + x_2 - x_3 + 2x_4 = -5, \\ x_2 - x_3 + 2x_4 = -7, \\ -x_1 + 3x_2 + x_3 - x_4 = 0 \end{cases}$$

по правилу Крамера.

Решение. 1. Вычисляем определитель Δ_0 :

$$\begin{aligned} \Delta_0 &= \begin{vmatrix} 1 & -2 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & -1 & 2 \\ 0 & 1 & -1 & 2 \\ -1 & 3 & 1 & -1 \end{vmatrix} \begin{array}{c} \textcircled{-2} \textcircled{1} \\ \leftarrow \\ \leftarrow \end{array} = \begin{vmatrix} 1 & -2 & 0 & 1 \\ 0 & 5 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 2 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} = \\ &= 1 \cdot \begin{vmatrix} 5 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 2 \\ 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 2(-1)^{2+3} \begin{vmatrix} 5 & -1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = -12. \end{aligned}$$

При вычислении определителя Δ_0 :

- получили нули в первом столбце и разложили определитель по этому столбцу;
- в итоге получился определитель третьего порядка, у которого в третьем столбце два нуля; разложили этот определитель по третьему столбцу.

Поскольку $\Delta_0 \neq 0$, то СЛАУ имеет единственное решение, которое находим по формулам (1.44).

2. Вычисляем последовательно определители $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4$ и находим решения x_1, x_2, x_3, x_4 :

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \begin{vmatrix} \boxed{1} & -2 & 0 & 1 \\ -5 & 1 & -1 & 2 \\ -7 & 1 & -1 & 2 \\ 0 & 3 & 1 & -1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -5 & -9 & -1 & 7 \\ -7 & -13 & -1 & 9 \\ 0 & 3 & 1 & -1 \end{vmatrix} = \\ &= 1 \cdot \begin{vmatrix} -9 & -1 & 7 \\ -13 & -1 & 9 \\ 3 & 1 & -1 \end{vmatrix} \begin{array}{c} \textcircled{-1} \textcircled{1} \\ \leftarrow \\ \leftarrow \end{array} = \\ &= \begin{vmatrix} -9 & -1 & 7 \\ -4 & 0 & 2 \\ -6 & 0 & 6 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -4 & 2 \\ -6 & 6 \end{vmatrix} = -12 \Rightarrow x_1 = \frac{-12}{-12} = 1; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta_2 &= \begin{vmatrix} 1 & \boxed{-1} & 0 & 1 \\ 2 & -5 & -1 & 2 \\ 0 & -7 & -1 & 2 \\ -1 & \boxed{0} & 1 & -1 \end{vmatrix} \begin{array}{c} \leftarrow \\ \leftarrow \\ \leftarrow \\ \textcircled{1} \end{array} = \\
 &= \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & -5 & 0 & 1 \\ -1 & -7 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & -1 \end{vmatrix} = 1 \cdot (-1)^{4+3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -5 & 1 \\ -1 & -7 & 1 \end{vmatrix} \begin{array}{c} \textcircled{-1} \\ \leftarrow \\ \leftarrow \end{array} = \\
 &= - \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & -6 & 0 \\ -2 & -8 & 0 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} 0 & -6 \\ -2 & -8 \end{vmatrix} = 12 \Rightarrow x_2 = \frac{12}{-12} = -1;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta_3 &= \begin{vmatrix} 1 & -2 & \boxed{1} & 1 \\ 2 & 1 & -5 & 2 \\ 0 & 1 & -7 & 2 \\ -1 & 3 & \boxed{0} & -1 \end{vmatrix} \begin{array}{c} \textcircled{-2} \textcircled{1} \\ \leftarrow \\ \leftarrow \\ \leftarrow \end{array} = \\
 &= \begin{vmatrix} 1 & -2 & 0 & 1 \\ 0 & 5 & -7 & 0 \\ 0 & 1 & -7 & 2 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 1 \cdot \begin{vmatrix} 5 & -7 & 0 \\ 1 & -7 & 2 \\ 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} = \\
 &= 2(-1)^{2+3} \begin{vmatrix} 5 & -7 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = -24 \Rightarrow x_3 = \frac{-24}{(-12)} = 2;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta_4 &= \begin{vmatrix} 1 & -2 & 0 & \boxed{1} \\ 2 & 1 & -1 & -5 \\ 0 & 1 & -1 & -7 \\ -1 & 3 & 1 & \boxed{0} \end{vmatrix} \begin{array}{c} \textcircled{-2} \textcircled{1} \\ \leftarrow \\ \leftarrow \\ \leftarrow \end{array} = \\
 &= \begin{vmatrix} 1 & -2 & 0 & 1 \\ 0 & 5 & -1 & -7 \\ 0 & 1 & -1 & -7 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} = 1 \cdot \begin{vmatrix} 5 & -1 & -7 \\ 1 & -1 & -7 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \begin{array}{c} \leftarrow \\ \leftarrow \\ \textcircled{-1} \end{array} = \\
 &= \begin{vmatrix} 6 & 0 & -6 \\ 2 & 0 & -6 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} 6 & -6 \\ 2 & -6 \end{vmatrix} = 24 \Rightarrow x_4 = \frac{24}{-12} = -2.
 \end{aligned}$$

Таким образом, $X = (1 \ -1 \ 2 \ -2)^\top$.

Проверка:

$$\begin{cases} 1 - 2(-1) + (-2) = 1, \\ 2 \cdot 1 + (-1) - 2 + 2(-2) = -5, \\ -1 - 2 + 2(-2) = -7, \\ -1 + 3(-1) + 2 - (-2) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 1 = 1, \\ -5 = -5, \\ -7 = -7, \\ 0 = 0. \end{cases}$$

Ответ: $X = (1 \ -1 \ 2 \ -2)^\top$.

Уместно отметить, что формулы Крамера легко выводятся из формулы $X = A^{-1}B$, являющейся решением матричного уравнения $AX = B$. Действительно, если

$$A^{-1} = \frac{1}{\Delta_0} \cdot \begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} & \cdots & A_{n1} \\ A_{12} & A_{22} & \cdots & A_{n2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ A_{1n} & A_{2n} & \cdots & A_{nn} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix},$$

где $\Delta_0 = \det A_0$, A_0 — основная матрица СЛАУ (1.41), то

$$\begin{aligned} X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} &= \frac{1}{\Delta_0} \cdot \begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} & \cdots & A_{n1} \\ A_{12} & A_{22} & \cdots & A_{n2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ A_{1n} & A_{2n} & \cdots & A_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} = \\ &= \frac{1}{\Delta_0} \begin{pmatrix} b_1 A_{11} + b_2 A_{21} + \dots + b_n A_{n1} \\ b_1 A_{12} + b_2 A_{22} + \dots + b_n A_{n2} \\ \vdots \\ b_1 A_{1n} + b_2 A_{2n} + \dots + b_n A_{nn} \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta_0} \begin{pmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \vdots \\ \Delta_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\Delta_1}{\Delta_0} \\ \frac{\Delta_2}{\Delta_0} \\ \vdots \\ \frac{\Delta_n}{\Delta_0} \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Отсюда $x_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta_0}$; $x_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta_0}$; ...; $x_n = \frac{\Delta_n}{\Delta_0}$, что соответствует формулам Крамера (1.44).

Вопросы для самоконтроля к п. 3.3

1. Известно, что каждое из приведенных матричных уравнений: а) $AXB = C$; б) $ABX = C$; в) $XAB = C$, где A , B , C — невырожденные квадратные матрицы, X — неизвестная матрица, имеет единственное решение. Найдите эти решения.

2. Каким условиям должны удовлетворять матрицы A , B , C , чтобы совпали решения матричных уравнений $ABX = C$ и $XAB = C$?

существует) разработан универсальный метод, носящий имя одного из крупнейших математиков всех времен Гаусса ¹⁾.

В теории систем линейных алгебраических уравнений и, в частности, при изложении метода Гаусса, используют следующие понятия, определяющие классификацию СЛАУ по отсутствию или наличию у нее решений и по числу решений.

Определение 1.26. СЛАУ (1.45) называется *совместной*, если она имеет хотя бы одно решение. Если же система уравнений не имеет ни одного решения, то она называется *несовместной*.

Определение 1.27. Совместная СЛАУ называется *определенной*, если она имеет единственное решение, и *неопределенной*, если она имеет более одного решения.

Приведенная классификация СЛАУ отражена также на рис. 1.4.

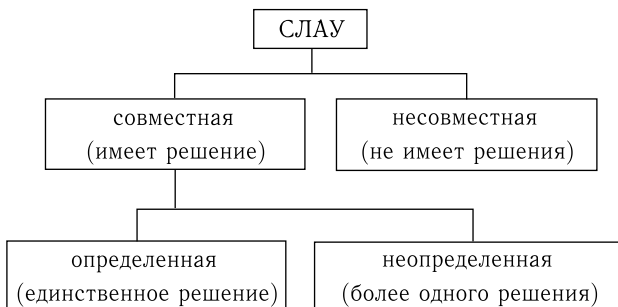


Рис. 1.4. Классификация СЛАУ

Многие методы решения СЛАУ, в том числе метод Гаусса, основаны на последовательном построении конечного числа СЛАУ, каждая из которых *равносильна* исходной системе уравнений.

Определение 1.28. Системы уравнений, имеющие одно и то же множество решений, называются *равносильными*. Преобразование, приводящее к равносильной системе, также называется *равносильным*.

Равносильными, в частности, являются *элементарные преобразования* СЛАУ.

Определение 1.29. *Элементарными* преобразованиями СЛАУ называются следующие преобразования:

¹⁾ Гаусс Карл Фридрих (Gauss Carl Friedrich, 1777–1855) — немецкий математик, основные результаты в различных разделах математики, астрономии, геодезии, теоретической физике.

- перестановка уравнений в системе;
- умножение уравнения на любое число, отличное от нуля;
- прибавление к одному уравнению другого уравнения, умноженного на некоторое число.

Утверждение. *Элементарные преобразования СЛАУ приводят к равносильной системе алгебраических уравнений.*

Доказательство. То, что первые два преобразования приводят к равносильной СЛАУ, очевидно. Равносильный характер третьего преобразования покажем для простоты на примере системы второго порядка.

Пусть

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 = b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 = b_2 \end{cases} \quad (1.46)$$

— СЛАУ второго порядка. Умножим первое уравнение СЛАУ на $\lambda \neq 0$ и вычтем из второго уравнения:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 = b_1, \\ (a_{21} - \lambda a_{11})x_1 + (a_{22} - \lambda a_{12})x_2 = b_2 - \lambda b_1. \end{cases} \quad (1.47)$$

Пусть (x_1^0, x_2^0) — решение системы (1.46), т. е. $a_{11}x_1^0 + a_{12}x_2^0 = b_1$ и $a_{21}x_1^0 + a_{22}x_2^0 = b_2$ — верные равенства. Покажем, что подстановка x_1^0, x_2^0 вместо x_1, x_2 во второе уравнение системы (1.47) в этом случае обращает его в верное равенство

$$(a_{21} - \lambda a_{11})x_1^0 + (a_{22} - \lambda a_{12})x_2^0 = b_2 - \lambda b_1.$$

Перегруппируем слагаемые в этом выражении:

$$(a_{21}x_1^0 - a_{22}x_2^0) - \lambda(a_{11}x_1^0 + a_{12}x_2^0) = b_2 - \lambda b_1.$$

По предположению $a_{21}x_1^0 + a_{22}x_2^0 = b_2$, а $a_{11}x_1^0 + a_{12}x_2^0 = b_1$. В итоге получаем верное равенство $b_2 - \lambda b_1 = b_2 - \lambda b_1$.

Докажем теперь, что вектор $(\tilde{x}_1 \ \tilde{x}_2)^\top$, являющийся решением СЛАУ (1.47), является одновременно и решением СЛАУ (1.46). В соответствии с предположением имеем систему равенств

$$\begin{cases} a_{11}\tilde{x}_1 + a_{12}\tilde{x}_2 = b_1, \\ (a_{21} - \lambda a_{11})\tilde{x}_1 + (a_{22} - \lambda a_{12})\tilde{x}_2 = b_2 - \lambda b_1. \end{cases}$$

Умножим первое равенство на λ и сложим со вторым равенством. После очевидных упрощений получим равенство $a_{21}\tilde{x}_1 + a_{22}\tilde{x}_2 = b_2$, которое, вместе с равенством $a_{11}\tilde{x}_1 + a_{12}\tilde{x}_2 = b_1$, говорит о том, что вектор-столбец $(\tilde{x}_1 \ \tilde{x}_2)^\top$ является решением СЛАУ (1.46). ■

4.2. Общая идея и алгоритм метода Гаусса

Основная идея метода Гаусса заключается в приведении исходной СЛАУ с помощью цепочки последовательных равносильных преобразований над уравнениями системы к виду, в котором основная матрица СЛАУ является либо *треугольной*, либо *ступенчатой*. Между СЛАУ и ее расширенной матрицей $\bar{A} = (A|B)$ существует взаимно однозначное соответствие. С позиций расширенной матрицы цель элементарных преобразований над этой матрицей заключается в приведении ее к виду *ступенчатой* матрицы.

Определение 1.30. Матрица A называется *ступенчатой*, если $a_{11} \neq 0$, а в каждой ее i -й строке, $i \geq 2$, не менее $(i - 1)$ первых элементов равны нулю. При этом число первых нулевых элементов в каждой следующей строке больше, чем в предыдущей.

Например, матрица

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ 0 & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ 0 & 0 & 0 & a_{34} & a_{35} \end{pmatrix}$$

является ступенчатой, а матрица

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ 0 & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} \end{pmatrix}$$

таковой не является. Здесь не завершен процесс получения нулевых элементов в четвертой строке.

Процесс приведения исходной расширенной матрицы $\bar{A}$ к ступенчатому виду составляет содержание первой части метода Гаусса и называется *прямым ходом*. При *обратном ходе*, двигаясь снизу вверх, находят решение СЛАУ.

Элементарные преобразования, выполняемые над уравнениями системы, на самом деле затрагивают только коэффициенты a_{ij} при неизвестных и свободные члены b_i СЛАУ. Поэтому при прямом ходе метода Гаусса обычно работают с расширенной матрицей $\bar{A} = (A|B)$, т. е.

$$\bar{A} = \left(\begin{array}{cccc|c} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} & b_2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} & b_m \end{array} \right).$$

Пусть $a_{11} \neq 0$. Если это не так, то поменяем первую строку с некоторой i -й строкой, в которой коэффициент $a_{i1} \neq 0$. Умножая последовательно первую строку матрицы $\bar{A}$ на $-\frac{a_{21}}{a_{11}}$, $-\frac{a_{31}}{a_{11}}, \dots, -\frac{a_{m1}}{a_{11}}$ и прибавляя ее соответственно ко 2-й, 3-й, ..., m -й строкам, получаем новое состояние расширенной матрицы

$$\bar{A}^{(1)} = \left(\begin{array}{cccc|c} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} & b_1 \\ 0 & a_{22}^{(1)} & \cdots & a_{2n}^{(1)} & b_2^{(1)} \\ 0 & a_{32}^{(1)} & \cdots & a_{3n}^{(1)} & b_3^{(1)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ 0 & a_{m2}^{(1)} & \cdots & a_{mn}^{(1)} & b_m^{(1)} \end{array} \right),$$

в котором все элементы первого столбца равны нулю, кроме элемента a_{11} . Это равносильно тому, что из всех уравнений, начиная со второго, исключена неизвестная x_1 .

Пусть далее в матрице $\bar{A}^{(1)}$ элемент $a_{22}^{(1)} \neq 0$. Аналогично первому шагу прямого хода метода Гаусса получим нули во втором столбце под элементом $a_{22}^{(1)}$. Для этого умножим вторую строку на $\left(-\frac{a_{32}^{(1)}}{a_{22}^{(1)}}\right)$ и прибавим к третьей строке. Затем умножим вторую строку на $\left(-\frac{a_{42}^{(1)}}{a_{22}^{(1)}}\right)$ и прибавим к четвертой строке, и т. д.

до исчерпания всех строк матрицы $\bar{A}^{(1)}$. В результате получим новое состояние расширенной матрицы $\bar{A}$:

$$\bar{A}^{(2)} = \left(\begin{array}{ccccc|c} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} & b_1 \\ 0 & a_{22}^{(1)} & a_{23}^{(1)} & \cdots & a_{2n}^{(1)} & b_2^{(1)} \\ 0 & 0 & a_{33}^{(2)} & \cdots & a_{3n}^{(2)} & b_3^{(2)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & a_{m3}^{(2)} & \cdots & a_{mn}^{(2)} & b_m^{(2)} \end{array} \right).$$

Теперь будем получать нули в третьем столбце под угловым элементом $a_{33}^{(2)}$, затем в четвертом столбце и т. д. до исчерпания всех угловых элементов. Если на некотором шаге получается *нулевая строка* (строка, все элементы которой равны нулю, т. е. $\mathbf{0} = (0, 0, \dots, 0)$), то такую строку вычеркиваем. Если же

на некотором шаге получается строка, в которой все элементы равны нулю, кроме элемента в столбце свободных членов, то делаем вывод о несовместности системы. В этом случае имеем неверное равенство

$$0 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + \dots + 0 \cdot x_n = b_i^{(s)} \Leftrightarrow 0 = b_i^{(s)},$$

где i ($1 < i \leq m$) — номер строки, s ($1 \leq s < \min(m, n)$) — номер шага.

Во всех остальных случаях расширенная матрица на некотором заключительном шаге примет один из двух видов:

$$\overline{A}^{(n-1)} = \left(\begin{array}{cccccc|c} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} & b_1 \\ 0 & a_{22}^{(1)} & a_{23}^{(1)} & \cdots & a_{2n}^{(1)} & b_2^{(1)} \\ 0 & 0 & a_{33}^{(2)} & \cdots & a_{3n}^{(2)} & b_3^{(2)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{nn}^{(n-1)} & b_n^{(n-1)} \end{array} \right) \quad (1.48)$$

либо

$$\overline{A}^{(k-1)} = \left(\begin{array}{cccccc|c} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1k} & \cdots & a_{1n} & b_1 \\ 0 & a_{22}^{(1)} & a_{23}^{(1)} & \cdots & a_{2k}^{(1)} & \cdots & a_{2n}^{(1)} & b_2^{(1)} \\ 0 & 0 & a_{33}^{(2)} & \cdots & a_{3k}^{(2)} & \cdots & a_{3n}^{(2)} & b_3^{(2)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{kk}^{(k-1)} & \cdots & a_{kn}^{(k-1)} & b_k^{(k-1)} \end{array} \right), \quad (1.49)$$

где $k < n$. Заметим, что при $k = n$ вид (1.49) матрицы $\overline{A}$ совпадает с (1.48).

В случае (1.48) исходная СЛАУ (1.45) эквивалентна (равносильна) треугольной СЛАУ

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n = b_1, \\ a_{22}^{(1)}x_2 + a_{23}^{(1)}x_3 + \dots + a_{2n}^{(1)}x_n = b_2^{(1)}, \\ a_{33}^{(2)}x_3 + \dots + a_{3n}^{(2)}x_n = b_3^{(2)}, \\ \dots \dots \dots \\ a_{nn}^{(n-1)}x_n = b_n^{(n-1)}, \end{array} \right.$$

решение которой легко находится (обратный ход): из последнего уравнения находим значение неизвестного x_n , затем из $(n-1)$ -го — значение x_{n-1} и т. д.

Таким образом, если СЛАУ (1.45) приводится к треугольному виду, то она имеет единственное решение (является определенной).

Если же СЛАУ (1.45) (расширенная матрица $\bar{A}$) приводится с помощью элементарных преобразований к ступенчатой форме (1.49), то число уравнений в ней меньше числа неизвестных и соответственно такая СЛАУ не может иметь единственное решение. Система уравнений с расширенной матрицей вида (1.49) имеет бесконечно много решений. Алгоритм нахождения решений такой (неопределенной) СЛАУ будет рассмотрен в п. 4.3.

4.3. Примеры решения СЛАУ методом Гаусса

Рассмотрим три системы линейных алгебраических уравнений: совместную определенную, совместную неопределенную и несовместную.

Пример 1.14. Исследовать на совместность СЛАУ

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 - x_3 = -1, \\ 2x_1 + x_2 - 3x_3 = 0, \\ x_1 + x_2 + x_3 = 2, \\ -2x_2 - 3x_3 = -1 \end{cases}$$

и если она совместна, то найти ее решение.

Решение. Данная СЛАУ является *переопределенной* — число уравнений ($m = 4$) больше числа неизвестных ($n = 3$).

1. Прямой ход метода Гаусса.

$$\begin{aligned} & \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & -1 & -1 \\ 2 & 1 & -3 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & -2 & -3 & -1 \end{array} \right) \xrightarrow{\substack{\text{R}_2 \leftarrow \text{R}_2 - 2\text{R}_1 \\ \text{R}_3 \leftarrow \text{R}_3 - \text{R}_1}} \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & -3 & -1 & 2 \\ 0 & -1 & 2 & 3 \\ 0 & -2 & -3 & -1 \end{array} \right) \sim \\ & \sim \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 2 & 3 \\ 0 & -3 & -1 & 2 \\ 0 & -2 & -3 & -1 \end{array} \right) \xrightarrow{\substack{\text{R}_3 \leftarrow \text{R}_3 - 3\text{R}_2 \\ \text{R}_4 \leftarrow \text{R}_4 - 2\text{R}_2}} \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & -7 & -7 \\ 0 & 0 & -7 & -7 \end{array} \right) \xrightarrow{\text{R}_4 \leftarrow \text{R}_4 - \text{R}_3} \sim \\ & \sim \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \sim \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{array} \right). \end{aligned}$$

2. Обратный ход метода Гаусса.

Итоговому состоянию расширенной матрицы отвечает треугольная СЛАУ

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 - x_3 = -1, & x_3 = 1, \\ -x_2 + 2x_3 = 3, & \Rightarrow x_2 = \frac{(3 - 2 \cdot 1)}{(-1)} = -1, \\ x_3 = 1 & x_1 = -1 + 1 - 2(-1) = 2. \end{cases}$$

Таким образом, исходная СЛАУ является совместной и при этом определенной.

Ответ: $X = (2 \ -1 \ 1)^\top$.

Пример 1.15. Исследовать на совместность СЛАУ

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 - x_3 = -1, \\ 2x_1 + x_2 - 3x_3 = 0, \\ x_1 - x_2 - 2x_3 = 1, \\ x_1 + 5x_2 = -3 \end{cases}$$

и если она совместна, то найти ее решение.

Решение. 1. Прямой ход метода Гаусса.

$$\begin{aligned} \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & -1 & -1 \\ 2 & 1 & -3 & 0 \\ 1 & -1 & -2 & 1 \\ 1 & 5 & 0 & -3 \end{array} \right) & \xrightarrow{\substack{\text{R}_2 \leftarrow \text{R}_2 - \text{R}_1 \\ \text{R}_3 \leftarrow \text{R}_3 - \text{R}_1 \\ \text{R}_4 \leftarrow \text{R}_4 - \text{R}_1}} \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & -3 & -1 & 2 \\ 0 & -3 & -1 & 2 \\ 0 & 3 & 1 & -2 \end{array} \right) \xrightarrow{\substack{\text{R}_3 \leftarrow \text{R}_3 - \text{R}_2 \\ \text{R}_4 \leftarrow \text{R}_4 + \text{R}_2}} \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & -3 & -1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \rightarrow \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & -3 & -1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right). \end{aligned}$$

2. Обратный ход метода Гаусса.

Исходная СЛАУ четвертого порядка оказалась равносильной системе, содержащей только два уравнения:

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 - x_3 = -1, \\ -3x_2 - x_3 = 2. \end{cases} \quad (1.50)$$

Каждое из этих уравнений определяет плоскость в трехмерном пространстве. Пересекаясь, плоскости образуют в нем некоторую прямую. Бесконечное множество точек этой прямой, т. е. упорядоченных троек чисел $(x_1; x_2; x_3)$, являются решениями исходной СЛАУ и равносильной ей СЛАУ (1.50).

Найдем эти решения. Для этого объявляем x_3 свободной переменной, положив $x_3 = c$, $c \in \mathbb{R}$, и переносим все слагаемые с $x_3 = c$ в правые части уравнений:

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 = -1 + c, \\ -3x_2 = 2 + c. \end{cases}$$

Данная СЛАУ является определенной, но относительно параметра c . Находим ее решение:

$$\begin{cases} x_2 = -\frac{2}{3} - \frac{c}{3}, \\ x_1 = -1 + c - 2\left(-\frac{2}{3} - \frac{c}{3}\right) = \frac{1}{3} + \frac{5}{3}c, \\ x_3 = c. \end{cases}$$

Полученные решения (относительно параметра c) являются параметрическими уравнениями прямой в пространстве.

Ответ: $X = \left(\frac{1}{3} + \frac{5}{3}c \quad -\frac{2}{3} - \frac{c}{3} \quad c\right)^\top$, $c \in \mathbb{R}$.

Пример 1.16. Исследовать на совместность СЛАУ

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 - x_3 = -1, \\ 2x_1 + x_2 - 3x_3 = 0, \\ x_1 - x_2 - 2x_3 = 0, \\ x_1 + 5x_2 = -3 \end{cases}$$

и если она совместна, то найти ее решение.

Решение. Обратим внимание читателя на то, что данная система отличается от системы примера 1.15 только свободным членом в третьем уравнении. Как увидим сейчас, эта незначительная по форме корректировка СЛАУ кардинально изменит результат.

1. Прямой ход метода Гаусса.

$$\begin{aligned} \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & -1 & -1 \\ 2 & 1 & -3 & 0 \\ 1 & -1 & -2 & 0 \\ 1 & 5 & 0 & -3 \end{array} \right) & \xrightarrow{\substack{\text{R}_2 \leftarrow \text{R}_2 - \text{R}_1 \\ \text{R}_3 \leftarrow \text{R}_3 - \text{R}_1 \\ \text{R}_4 \leftarrow \text{R}_4 - \text{R}_1}} \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & -3 & -1 & 2 \\ 0 & -3 & -1 & 2 \\ 0 & 3 & 1 & -2 \end{array} \right) & \xrightarrow{\substack{\text{R}_3 \leftarrow \text{R}_3 - \text{R}_2 \\ \text{R}_4 \leftarrow \text{R}_4 + \text{R}_2}} \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & -3 & -1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right). \end{aligned}$$

Третьей строке последнего состояния расширенной матрицы отвечает уравнение

$$0 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + 0 \cdot x_3 = -1,$$

которое не может быть верным равенством ни при каких значениях неизвестных x_1, x_2, x_3 . Это означает, что исходная СЛАУ несовместна.

Ответ: СЛАУ несовместна.

Комментарий к методу Гаусса. При преобразовании расширенной матрицы на этапе прямого хода метода Гаусса могут появляться нулевые строки. Так, в примерах 1.13 и 1.15 появилось по одной нулевой строке, а в примере 1.14 — две строки. Это означает, что в исходных СЛАУ часть уравнений являлась линейной комбинацией других уравнений системы. Соответствующие комбинации можно восстановить по цепочке элементарных преобразований над строками СЛАУ на этапе прямого хода.

Покажем, как это можно сделать, на примере 1.14. Будем обозначать строки матрицы $\mathbf{a}_i^{(s)}$, где i — номер строки, s — номер шага прямого хода.

Шаг 1.

$$\mathbf{a}_2^{(1)} = \mathbf{a}_2 - 2\mathbf{a}_1;$$

$$\mathbf{a}_3^{(1)} = \mathbf{a}_3 - \mathbf{a}_1;$$

$$\mathbf{a}_4^{(1)} = \mathbf{a}_4 - \mathbf{a}_1.$$

Шаг 2.

$$\mathbf{a}_3^{(2)} = \mathbf{a}_3^{(1)} - \mathbf{a}_2^{(1)} = \mathbf{a}_3 - \mathbf{a}_1 - (\mathbf{a}_2 - 2\mathbf{a}_1) = \mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_2 + \mathbf{a}_3;$$

$$\mathbf{a}_4^{(2)} = \mathbf{a}_4^{(1)} + \mathbf{a}_2^{(1)} = \mathbf{a}_4 - \mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2 - 2\mathbf{a}_1 = -3\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2 + \mathbf{a}_4.$$

В результате выполнения элементарных преобразований на втором шаге третья и четвертая строки расширенной матрицы в примере 1.14 получились нулевыми, т. е. $\mathbf{a}_3^{(2)} = \mathbf{0}$ и $\mathbf{a}_4^{(2)} = \mathbf{0}$. Поскольку

$$\mathbf{a}_3^{(2)} = \mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_2 + \mathbf{a}_3, \quad \mathbf{a}_4^{(2)} = -3\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2 + \mathbf{a}_4,$$

то имеем равенства:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_2 + \mathbf{a}_3 &= \mathbf{0}, \\ -3\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2 + \mathbf{a}_4 &= \mathbf{0}; \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} \mathbf{a}_3 &= -\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2, \\ \mathbf{a}_4 &= 3\mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_2. \end{aligned}$$

Последнее соотношение означает, что в системе уравнений из примера 1.14 третье и четвертое уравнения являются линейными комбинациями первых двух уравнений системы. Третье

Понятие линейной зависимости является одним из важнейших понятий не только в теории систем линейных алгебраических уравнений, но и во многих других разделах математики. Изучению свойств СЛАУ и их решений с позиций линейной зависимости или независимости строк (столбцов) расширенной матрицы посвящена гл. 2.

Если же прямой ход метода Гаусса приводит к ступенчатой матрице с числом строк $k < n$, то, как и в примере 1.15, часть переменных, а именно $(n - k)$ переменных, объявляются свободными, принимающими произвольные числовые значения; вместе с коэффициентами при этих свободных переменных они переносятся в правую часть СЛАУ. В результате получается «определенная» СЛАУ (k уравнений и k неизвестных), но относительно $(n - k)$ параметров.

Рассмотрим соответствующий пример.

Пример 1.17. Решить СЛАУ

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 - x_3 + 3x_4 = 0, \\ 2x_1 - x_2 - x_4 = 0, \\ -5x_2 + 2x_3 - 7x_4 = 0, \\ 4x_1 + 3x_2 - 2x_3 + 5x_4 = 0. \end{cases}$$

Решение. 1. Прямой ход:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 & 3 \\ 2 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & -5 & 2 & -7 \\ 4 & 3 & -2 & 5 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{---} \textcircled{-2} \\ \text{---} \textcircled{-2} \\ \text{---} \textcircled{-2} \\ \text{---} \textcircled{-2} \end{matrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 & 3 \\ 0 & -5 & 2 & -7 \\ 0 & -5 & 2 & -7 \\ 0 & 5 & -2 & 7 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{---} \textcircled{-1} \\ \text{---} \textcircled{-1} \\ \text{---} \textcircled{-1} \\ \text{---} \textcircled{+} \end{matrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 & 3 \\ 0 & -5 & 2 & -7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

2. Обратный ход:

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 - x_3 + 3x_4 = 0, \\ 5x_2 - 2x_3 + 7x_4 = 0. \end{cases}$$

Объявляем переменные x_3 и x_4 свободными и полагаем $x_3 = c_1$, $x_4 = c_2$, $c_1, c_2 \in \mathbb{R}$. Преобразуем СЛАУ к виду

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 = c_1 - 3c_2, \\ 5x_2 = 2c_1 - 7c_2. \end{cases}$$

Данная СЛАУ является определенной, но относительно двух параметров c_1 и c_2 . Находим ее решения: $x_2 = \frac{2}{5}c_1 - \frac{7}{5}c_2$, $x_1 = \frac{1}{5}c_1 - \frac{1}{5}c_2$.

Таким образом, исходная СЛАУ является неопределенной, а все ее решения задаются вектором

$$X = \left(\frac{1}{5}c_1 - \frac{1}{5}c_2 \quad \frac{2}{5}c_1 - \frac{7}{5}c_2 \quad c_1 \quad c_2 \right)^T, \quad c_1, c_2 \in \mathbb{R}.$$

$$\text{Ответ: } X = \left(\frac{1}{5}c_1 - \frac{1}{5}c_2 \quad \frac{2}{5}c_1 - \frac{7}{5}c_2 \quad c_1 \quad c_2 \right)^T, \quad c_1, c_2 \in \mathbb{R}.$$

Замечание 1. Если число m уравнений однородной СЛАУ (1.51) меньше числа n неизвестных, то такая СЛАУ заведомо имеет ненулевые решения.

Действительно, в этом случае на этапе прямого хода основная матрица СЛАУ приводится только к ступенчатому (но не к треугольному) виду.

Замечание 2. Важный для приложений частный случай однородной СЛАУ (1.51) представляют СЛАУ с числом уравнений, равным числу неизвестных ($m = n$).

Теорема 1.6. Для того чтобы однородная СЛАУ порядка n имела только нулевое решение, необходимо и достаточно, чтобы определитель основной матрицы был отличен от нуля.

Доказательство. Необходимость. Дано: СЛАУ $A_n X = O$ имеет только нулевое решение. Требуется доказать, что $|A_n| \neq 0$. Поскольку система уравнений имеет только нулевое решение, то прямой ход метода Гаусса приведет к треугольной СЛАУ (1.52) с определителем $\tilde{\Delta}_0 = a_{11}^{(1)} a_{22}^{(2)} a_{33}^{(3)} \cdots a_{nn}^{(n-1)}$, отличным от нуля.

Достаточность. Пусть определитель $\Delta_0 = |A_n| \neq 0$. Тогда в соответствии с правилом Крамера СЛАУ имеет единственное решение $X^0 = (x_1^0 \ x_2^0 \ \cdots \ x_n^0)^\top$, которое находится по формулам $x_j^0 = \frac{\Delta_j}{\Delta_0}$, $j = \overline{1, n}$. Определители Δ_j получаются из Δ_0 замещением j -го столбца столбцом свободных членов, т. е. нулевым столбцом. Определитель с нулевым столбцом, как известно, равен нулю. Таким образом, $\Delta_j = 0 \ \forall j = \overline{1, n}$ и, как следствие, $\forall j = \overline{1, n}: x_j = 0$. ■

Следствие. Однородная СЛАУ n -го порядка имеет ненулевые решения тогда и только тогда, когда определитель $|A_n|$ ее основной матрицы равен нулю.

Обоснование метода нахождения обратной матрицы с помощью элементарных преобразований над строками сцепленной матрицы.

Допустим, что методом Гаусса решается неоднородная СЛАУ $A_n X = B$ с основной матрицей порядка n , причем $\det A_n \neq 0$, B — вектор-столбец размера $n \times 1$.

Составим расширенную матрицу $(A|B)$ и преобразуем ее с помощью элементарных преобразований над строками к виду $(E|B^{(k)})$, т. е.

$$\left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & \cdots & 0 & b_1^{(k)} \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & b_2^{(k)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & b_n^{(k)} \end{array} \right).$$

Это означает, что решением исходной СЛАУ будет вектор-столбец $(b_1^{(k)} \ b_2^{(k)} \ \dots \ b_n^{(k)})^\top$.

Пусть теперь решается матричное уравнение $AX = E$, в котором A и E — квадратные матрицы порядка n , причем A — невырожденная матрица. Значит, решение матричного уравнения существует, и им является обратная матрица A_n^{-1} . Составим из матриц A и E сцепленную матрицу $(A|E)$ размера $n \times 2n$ и с помощью элементарных преобразований над ее строками приведем к виду $(E|B^{(k)})$. В соответствии с алгоритмом метода Гаусса на месте матрицы $B^{(k)}$ должно быть решение исходного матричного уравнения, т. е. матрица A_n^{-1} , что мы и хотели показать. ■

Вопросы для самоконтроля к § 4

1. Дайте определение решения системы m линейных уравнений с n неизвестными.

2. Какая СЛАУ называется: а) совместной; б) несовместной?

3. Сколько решений может иметь совместная СЛАУ? Как называется СЛАУ, имеющая бесконечно много решений?

4. Какие преобразования СЛАУ называются равносильными и какие — элементарными? Перечислите элементарные преобразования СЛАУ.

5. Сформулируйте конечную цель прямого хода метода Гаусса. Опишите по шагам алгоритм прямого хода метода Гаусса.

6. Какая матрица $A_{m \times n}$ называется ступенчатой? Приведите примеры ступенчатых матриц и матриц, не являющихся ступенчатыми.

7. Является ли совместной СЛАУ, расширенная матрица которой на некотором шаге прямого хода метода Гаусса имеет следующий вид:

$$\left(\begin{array}{ccccc|c} \bullet & * & * & * & * & * \\ 0 & \bullet & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & \bullet & * & * \end{array} \right) ?$$

(Здесь и далее символом $\bullet$ обозначены числа, не равные нулю, а символом $*$ — произвольные действительные числа.) Если данная СЛАУ совместна, то сколько решений имеет она?

8. Укажите число свободных переменных для СЛАУ в вопросе 7. Какие переменные являются свободными?

9. Найдите общее решение СЛАУ, расширенная матрица которой на некотором шаге прямого хода метода Гаусса имеет следующий вид (частный случай матрицы из вопроса 7):

$$\left(\begin{array}{ccccc|c} 2 & -1 & 0 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & 2 \end{array} \right).$$

10. Совместна ли СЛАУ, расширенная матрица которой на некотором шаге прямого хода метода Гаусса имеет вид

$$\left(\begin{array}{ccccc|c} \bullet & * & * & * & * & * \\ 0 & \bullet & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & 4 \end{array} \right) ?$$

11. Может ли иметь единственное решение неоднородная система трех линейных уравнений с пятью неизвестными? Может ли такая система быть несовместной? Ответ обоснуйте.

12. Может ли неоднородная СЛАУ порядка n быть: а) несовместной; б) определенной; в) неопределенной? Ответ обоснуйте (укажите для каждого случая общий вид расширенной матрицы СЛАУ на соответствующем шаге прямого хода метода Гаусса).

Ответы

7. Да, является совместной; бесконечное число решений. **8.** Три базисные и две свободные переменные. Базисными являются переменные x_1, x_2, x_4 , а свободными — x_3, x_5 . **9.** $X =$

$$= \left(-1 + \frac{1}{2}c_1 - 2c_2 \quad c_1 - 2c_2 \quad c_1 \quad 1 + \frac{1}{2}c_2 \quad c_2 \right)^T.$$

10. СЛАУ несовместна. **11.** Не может: такая система может быть только либо неопределенной, либо несовместной. **12.** а) Да, если некоторая строка расширенной матрицы СЛАУ на каком-то шаге прямого хода метода Гаусса будет иметь вид $(0 \ 0 \dots 0 | \bullet)$, где $\bullet$ — произвольное, действительное число, не равное нулю; б) да, если прямой ход метода Гаусса приводит к ступенчатой матри-

це $\left(\begin{array}{ccccc|c} \bullet & * & * & \dots & * & * \\ 0 & \bullet & * & \dots & * & * \\ 0 & 0 & \bullet & \dots & * & * \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \bullet & * \end{array} \right)$, число строк которой равно n ; в) да,

если прямой ход метода Гаусса приводит в итоге к ступенчатой форме расширенной матрицы СЛАУ с числом строк $k < n$.

Упражнения

Матричная алгебра

Вычислите (1–7).

$$1. \begin{pmatrix} -1 & 2 \\ 7 & 3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & 3 \\ -5 & 4 \end{pmatrix}. \quad 2. 2 \begin{pmatrix} 1 & -2 & 3 \\ 1 & 0 & 4 \end{pmatrix} - 3 \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 2 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}^T.$$

$$3. \text{ а) } A + B^T; \text{ б) } 2 \cdot A^T - B; \text{ в) } 3A - 2B^T, \\ \text{где } A^T = \begin{pmatrix} 2 & 4 & -7 & 4 \\ -1 & 5 & 0 & -2 \\ 3 & 6 & 2 & 1 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -2 & 3 \\ -1 & 2 & 4 & -1 \\ 3 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

$$4. \text{ а) } AB^T; \text{ б) } A^TB; \text{ в) } B^TA; \text{ г) } A^TB \text{ и } B^TA, \text{ где } A = \\ = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 4 & -5 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 3 & -2 & 4 & 10 \end{pmatrix}; \text{ сравните эти матрицы.}$$

$$5. \text{ а) } AB; \text{ б) } BA^T; \text{ в) } B^TA^T, \\ \text{где } A^T = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 4 & 2 \\ -3 & 1 & -1 & 3 \\ 1 & 2 & 0 & 1 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 1 \end{pmatrix}.$$

$$6. \text{ а) } \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 4 & 3 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}; \text{ б) } \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 4 & 3 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}.$$

$$7. \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -2 & 2 \end{pmatrix}^3.$$

8. Найдите все матрицы, перестановочные с данной:

$$\text{а) } \begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 2 & 0 \end{pmatrix}; \text{ б) } \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -2 & 3 \end{pmatrix}.$$

Определители второго и третьего порядков

Вычислите определители второго порядка (9–11).

$$9. \begin{vmatrix} 3 & -5 \\ 4 & 10 \end{vmatrix}. \quad 10. \begin{vmatrix} \sin \alpha & \cos \alpha \\ \cos \alpha & \sin \alpha \end{vmatrix}. \quad 11. \begin{vmatrix} 1+i & 1-i \\ 1-i & 1-i \end{vmatrix}.$$

Вычислите определители третьего порядка двумя способами:
а) по правилу треугольников или по правилу Саррюса; б) разложением по некоторой строке (столбцу) (12–17).

$$12. \begin{vmatrix} 2 & 5 & 7 \\ 1 & 3 & 2 \\ 1 & 4 & 6 \end{vmatrix}. \quad 13. \begin{vmatrix} -2 & 0 & 2 \\ 2 & -1 & -2 \\ 1 & 3 & -1 \end{vmatrix}. \quad 14. \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 4 & 5 \\ -1 & 0 & 6 \end{vmatrix}.$$

$$15. \begin{vmatrix} 1 & i & 1-i \\ 0 & 1+i & 1 \\ i & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad 16. \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x & y & z \\ x^2 & y^2 & z^2 \end{vmatrix}.$$

$$17. \begin{vmatrix} \sin \alpha & -1 & 0 \\ 1 & -2 \sin \alpha & -1 \\ 0 & 1 & 2 \sin \alpha \end{vmatrix}.$$

Решите системы уравнений по правилу Крамера (18–24).

$$18. \begin{cases} 3x - 4y = 18, \\ 5x + y = 7. \end{cases} \quad 19. \begin{cases} 6x + 5y = -8, \\ 5x - 3y = 22. \end{cases}$$

$$20. \begin{cases} (\cos \alpha)x - (\sin \alpha)y = \cos 2\alpha, \\ (\sin \alpha)x - (\cos \alpha)y = 0. \end{cases}$$

$$21. \begin{cases} 2x_1 - x_2 + 3x_3 = -3, \\ x_1 + 3x_2 + 2x_3 = 5, \\ 3x_1 + 4x_3 = -1. \end{cases} \quad 22. \begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 = -1, \\ x_1 + 2x_2 + x_3 = 0, \\ x_1 + 3x_2 + 2x_3 = 2. \end{cases}$$

$$23. \begin{cases} 3x_1 - x_2 = 15, \\ 5x_2 + 4x_3 = 5, \\ 4x_1 + 5x_2 + x_3 = 6. \end{cases} \quad 24. \begin{cases} x_1 - x_2 - x_3 = 4, \\ x_1 - 4x_2 + 5x_3 = 1, \\ -x_1 + 5x_2 - 6x_3 = \alpha, \alpha \in \mathbb{R}. \end{cases}$$

Определители n -го порядка

Вычислите определители, используя свойства определителей (25–29).

$$25. \begin{vmatrix} -2 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 2 & 3 \\ -2 & 3 & 1 & -1 \\ 0 & 4 & 1 & 3 \end{vmatrix} \quad 26. \begin{vmatrix} 2 & -3 & 4 & -1 \\ 5 & 2 & -1 & 0 \\ 4 & -1 & 2 & 1 \\ 0 & -2 & 1 & -1 \end{vmatrix}$$

$$27. \begin{vmatrix} 3 & -5 & 7 & 1 \\ 5 & 8 & 2 & 1 \\ -2 & 4 & 3 & -2 \\ 9 & 2 & 19 & 1 \end{vmatrix} \quad 28. \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 2 & 1 & 0 & 0 & 4 \\ 3 & 0 & 1 & 0 & 3 \\ 4 & 0 & 0 & 1 & 2 \\ 5 & 4 & 3 & 2 & 1 \end{vmatrix} \quad 29. \begin{vmatrix} 2 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2 \end{vmatrix}$$

30. Вычислите определитель 10-го порядка, используя результаты упр. 29.

$$\begin{vmatrix} 2 & 3 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 3 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 2 \end{vmatrix}.$$

Найдите обратную матрицу к данной (31–39).

$$31. \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 4 & 3 \end{pmatrix}. \quad 32. \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}.$$

$$33. \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad 34. \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}. \quad 35. \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix}.$$

$$36. \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix}. \quad 37. \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}. \quad 38. \begin{pmatrix} 1 & -1 & 2 \\ 0 & 2 & 1 \\ 2 & 0 & 5 \end{pmatrix}.$$

$$39. \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 2 & -1 & 1 \\ 2 & 1 & 2 & 2 \end{pmatrix}.$$

Решите СЛАУ методом Гаусса (40–47).

$$40. \begin{cases} 2x_1 - x_2 + 5x_3 = 0, \\ x_1 + 3x_2 + x_3 = -2, \\ 4x_1 - 2x_2 + x_3 = 9. \end{cases} \quad 41. \begin{cases} 2x_1 - x_2 + 5x_3 = 0, \\ x_1 + 3x_2 + x_3 = -2, \\ 5x_1 + x_2 + 11x_3 = -2. \end{cases}$$

$$42. \begin{cases} 2x_1 - x_2 + 5x_3 = 0, \\ x_1 + 3x_2 + x_3 = -2, \\ x_1 - 11x_2 + 7x_3 = 3. \end{cases} \quad 43. \begin{cases} x_1 - 2x_2 + x_3 - 3x_4 = 1, \\ 3x_1 + x_2 + 2x_4 = 2, \\ -2x_1 - x_2 - 3x_3 + x_4 = -1, \\ x_1 + x_2 + x_3 + 2x_4 = -1. \end{cases}$$

$$44. \begin{cases} x_1 - x_2 + 2x_3 - x_4 = -1, \\ 2x_1 + x_2 - x_3 - x_4 = 2, \\ 3x_2 - 5x_3 + x_4 = 4, \\ -x_1 - 5x_2 + 8x_3 - x_4 = -7. \end{cases} \quad 45. \begin{cases} x_1 + 2x_2 - x_3 = 0, \\ 2x_1 - x_2 + 2x_3 = 0, \\ x_1 + x_2 + x_3 = 0. \end{cases}$$

$$46. \begin{cases} x_1 + 2x_2 - 3x_3 = 0, \\ 2x_1 + 3x_2 - 5x_3 = 0, \\ x_1 + 3x_2 - 4x_3 = 0. \end{cases} \quad 47. \begin{cases} x_1 - 2x_3 + x_4 = 0, \\ 3x_1 + 2x_2 - x_3 = 0, \\ x_1 + 2x_2 + 3x_3 - 2x_4 = 0, \\ 2x_1 + 2x_2 + x_3 - x_4 = 0. \end{cases}$$

48. Решите СЛАУ в упр. 40, 43 и 45 по правилу Крамера и с помощью обратной матрицы.

49. Решите матричные уравнения:

$$а) \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} X = \begin{pmatrix} 4 & -1 \\ -1 & 7 \end{pmatrix};$$

$$б) \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & -2 \end{pmatrix} X = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ -2 & 4 & 0 \\ -6 & 5 & -2 \end{pmatrix}.$$

Ответы

$$1. \begin{pmatrix} -1 & -1 \\ 12 & -1 \end{pmatrix}. \quad 2. \begin{pmatrix} -1 & -10 & 3 \\ -1 & 3 & 5 \end{pmatrix}.$$

$$3. а) \begin{pmatrix} 3 & -2 & 6 \\ 4 & 7 & 7 \\ -9 & 4 & 3 \\ 7 & -3 & 1 \end{pmatrix}; \quad б) \begin{pmatrix} 3 & 8 & -12 & 5 \\ -1 & 8 & -4 & -3 \\ 3 & 11 & 3 & 2 \end{pmatrix};$$

$$в) \begin{pmatrix} 4 & -1 & 3 \\ 12 & 11 & 16 \\ -17 & -8 & 4 \\ 6 & -4 & 3 \end{pmatrix}.$$

$$4. а) -27; \quad б) \begin{pmatrix} 3 & -2 & 4 & 10 \\ -6 & 4 & -8 & -20 \\ 12 & -8 & 16 & 40 \\ -15 & 10 & -20 & -50 \end{pmatrix};$$

$$в) \begin{pmatrix} 3 & -6 & 12 & -15 \\ -2 & 4 & -8 & 10 \\ 4 & -8 & 16 & -20 \\ 10 & -20 & 40 & -50 \end{pmatrix}; \quad г) A^T B = (B^T A)^T.$$

$$5. а) \begin{pmatrix} 7 & -1 & 3 \\ 3 & 5 & 2 \\ 5 & -1 & 4 \\ 1 & 5 & 3 \end{pmatrix}; \quad б) \begin{pmatrix} 3 & 2 & 4 & 3 \\ -5 & 1 & -5 & 1 \\ -1 & 4 & 6 & 11 \end{pmatrix}; \quad в) \begin{pmatrix} 7 & 3 & 5 & 1 \\ -1 & 5 & -1 & 5 \\ 3 & 2 & 4 & 3 \end{pmatrix}.$$

$$6. а) \begin{pmatrix} 3 & -3 \\ 7 & -7 \end{pmatrix}; \quad б) \begin{pmatrix} -2 & -2 \\ -2 & -2 \end{pmatrix} = -2 \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

$$7. \begin{pmatrix} 9 & -9 \\ -18 & 18 \end{pmatrix} = 9 \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -2 & 2 \end{pmatrix}.$$

$$8. а) \begin{pmatrix} a & -c \\ c & a - \frac{1}{2}c \end{pmatrix}, \quad a, c \in \mathbb{R}; \quad б) \begin{pmatrix} a & b \\ 2b & a - 2b \end{pmatrix}, \quad a, b \in \mathbb{R}.$$

$$9. 50. \quad 10. -\cos 2\alpha. \quad 11. 2 + 2i. \quad 12. 7. \quad 13. 0. \quad 14. 26. \quad 15. -i.$$

$$16. (y-x)(z-x)(z-y). \quad 17. \sin 3\alpha. \quad 18. X = (2 \ -3)^T.$$

$$19. X = (2 \ -4)^T. \quad 20. X = (\cos \alpha \ \sin \alpha)^T, \quad \left(\alpha \neq \frac{\pi}{4} + \frac{\pi n}{2}, \ n \in \mathbb{Z} \right).$$

$$21. X = (1 \ 2 \ -1)^T. \quad 22. X = (-3 \ 1 \ 1)^T. \quad 23. X = (4 \ -3 \ 5)^T.$$

$$24. X = (5 + 3c \ 1 + 2c \ c)^T, \ c \in \mathbb{R}. \quad 25. 31. \quad 26. 44. \quad 27. 0.$$

$$28. 384. \quad 29. -10.$$

$$30. -263. \text{ Указание. Получите рекуррентную формулу}$$

$$\Delta_n = 2\Delta_{n-1} - 3\Delta_{n-2}.$$

$$31. \frac{1}{7} \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ -4 & 1 \end{pmatrix}. \quad 32. \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}. \quad 33. \begin{pmatrix} 1 & -2 & 4 \\ 0 & 1 & -2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

$$34. \frac{1}{6} \begin{pmatrix} 2 & 4 & -4 \\ 2 & -2 & 2 \\ -1 & 1 & 2 \end{pmatrix}. \quad 35. \frac{1}{6} \begin{pmatrix} -1 & 3 & -1 \\ 5 & 3 & -7 \\ -1 & -3 & 5 \end{pmatrix}.$$

$$36. \frac{1}{18} \begin{pmatrix} -5 & 1 & 7 \\ 1 & 7 & -5 \\ 7 & -5 & 1 \end{pmatrix}. \quad 37. \begin{pmatrix} 3 & -2 & 1 \\ -2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

$$38. \text{Обратная матрица не существует.} \quad 39. \begin{pmatrix} -1 & -11 & 4 & 3 \\ 0 & -4 & 2 & 1 \\ 1 & 8 & -3 & -2 \\ 0 & 5 & -2 & -1 \end{pmatrix}.$$

$$40. (2 \ -1 \ -1)^\top. \quad 41. \left(-\frac{2}{7} - \frac{16c}{7} \ -\frac{4}{7} + \frac{3c}{7} \ c \right)^\top, \ c \in \mathbb{R}.$$

$$42. \text{СЛАУ несовместна.} \quad 43. (1 \ 1 \ -1 \ -1)^\top.$$

$$44. \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{3}c_1 + \frac{2}{3}c_2 \ \frac{4}{3} + \frac{5}{3}c_1 - \frac{1}{3}c_2 \ c_1 \ c_2 \right)^\top, \ c_1, c_2 \in \mathbb{R}.$$

$$45. (0 \ 0 \ 0)^\top. \quad 46. (c \ c \ c)^\top, \ c \in \mathbb{R}.$$

$$47. \left(2c_1 - c_2 \ -\frac{5}{2}c_1 + \frac{3}{2}c_2 \ c_1 \ c_2 \right)^\top.$$

$$49. \text{а) } \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 3 \end{pmatrix}; \quad \text{б) } \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -2 & 3 & -2 \\ 2 & -1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Глава 2

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

§ 5. n -мерное арифметическое пространство

В курсе элементарной математики рассматриваются двумерные $\mathbf{x} = (x; y)$ и трехмерные векторы $\mathbf{x} = (x; y; z)$ с действительными компонентами x, y, z . Эти векторы отождествляются одновременно с точками соответственно на плоскости (в пространстве $\mathbb{R}^2$) и в трехмерном пространстве $\mathbb{R}^3$. Векторы в этих пространствах можно складывать, умножать на число. Более того, в этих пространствах были введены скалярное произведение векторов, модуль (норма) вектора и расстояние между двумя точками, что позволяет успешно решать на алгебраической основе некоторые задачи геометрии на плоскости и в пространстве.

Естественным представляется распространение этих понятий на множества упорядоченных наборов (n -ок) чисел $(x_1; x_2; \dots; x_n)$ для произвольного натурального n . Это, как увидим ниже, позволяет сформировать иной, более глубокий, взгляд на системы линейных алгебраических уравнений, и развить в итоге изящную общую теорию систем линейных алгебраических уравнений.

Определение 2.1. n -мерным арифметическим вектором называется упорядоченная система n действительных чисел $x_1; x_2; \dots; x_n$ (n -ок чисел).

n -мерный арифметический вектор обозначается так: $\mathbf{x} = (x_1; x_2; \dots; x_n)$. Числа $x_i, i = \overline{1, n}$ называются *компонентами* вектора.

Например, m строк матрицы $A_{m \times n}$ образуют n -мерные векторы $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m$, где $\mathbf{a}_i = (a_{i1} \ a_{i2} \ \dots \ a_{in})$, $i = \overline{1, m}$. Аналогично m столбцов этой же матрицы образуют систему m -мерных векторов $\mathbf{a}'_1, \mathbf{a}'_2, \dots, \mathbf{a}'_m$, где $\mathbf{a}'_j = (a_{1j} \ a_{2j} \ \dots \ a_{mj})$, $j = \overline{1, m}$. Сама матрица $A_{m \times n}$ может рассматриваться как (mn) -мерный век-

Использование арифметических векторов позволяет записать СЛАУ, наряду со скалярной или координатной формой записи (1.45), а также матричной $AX = B$, еще и в векторной форме. Действительно, СЛАУ

[illegible]

$$\begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \vdots \\ a_{m1} \end{pmatrix} x_1 + \begin{pmatrix} a_{12} \\ a_{22} \\ \vdots \\ a_{m2} \end{pmatrix} x_2 + \dots + \begin{pmatrix} a_{1n} \\ a_{2n} \\ \vdots \\ a_{mn} \end{pmatrix} x_n = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}.$$
$$\mathbf{a}'_1 = \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \vdots \\ a_{m1} \end{pmatrix}, \mathbf{a}'_2 = \begin{pmatrix} a_{12} \\ a_{22} \\ \vdots \\ a_{m2} \end{pmatrix}, \dots, \mathbf{b}' = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix},$$
$$x_1 \mathbf{a}'_1 + x_2 \mathbf{a}'_2 + \dots + x_n \mathbf{a}'_n = \mathbf{b}'. \quad (2.2)$$

Сложение векторов. Пусть $\mathbf{x} = (x_1; x_2; \dots; x_n)$, $\mathbf{y} = (y_1; y_2; \dots; y_n)$ — арифметические векторы. Суммой $\mathbf{x} + \mathbf{y}$ этих векторов называется вектор

$$\mathbf{z} = \mathbf{x} + \mathbf{y} \stackrel{\text{def}}{=} (x_1 + y_1; x_2 + y_2; \dots; x_n + y_n).$$

$$\mathbf{b} = \lambda \mathbf{x} \stackrel{\text{def}}{=} (\lambda x_1; \lambda x_2; \dots; \lambda x_n).$$

Вектор $\mathbf{0} = (0; 0; \dots; 0)$ называется *нулевым вектором*, а вектор $-\mathbf{x} = (-x_1; -x_2; \dots; -x_n)$ — вектором, *противоположным* вектору $\mathbf{x}$. По определению

$$\mathbf{x} = \mathbf{y} \stackrel{\text{def}}{=} x_i = y_i \quad \forall i = \overline{1, n}.$$

Поскольку операция сложения двух векторов сводится к n операциям сложения действительных чисел, а операция умножения вектора на действительное число — к n операциям умножения действительных чисел, то для введенных операций над векторами справедливы все свойства, имеющие место для аналогичных операций над действительными числами, а именно, для любых n -мерных векторов $\mathbf{x}, \mathbf{y}$ и любых чисел $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$:

1. $\mathbf{x} + \mathbf{y} = \mathbf{y} + \mathbf{x}$ (*свойство коммутативности*);
2. $\mathbf{x} + (\mathbf{y} + \mathbf{z}) = (\mathbf{x} + \mathbf{y}) + \mathbf{z}$ (*свойство ассоциативности*);
3. $\mathbf{x} + \mathbf{0} = \mathbf{x}$;
4. $\mathbf{x} + (-\mathbf{x}) = \mathbf{0}$;
5. $1 \cdot \mathbf{x} = \mathbf{x}$;
6. $\alpha(\beta\mathbf{x}) = (\alpha\beta)\mathbf{x}$ (*свойство ассоциативности относительно умножения на число*);
7. $(\alpha + \beta)\mathbf{x} = \alpha\mathbf{x} + \beta\mathbf{x}$ (*свойство дистрибутивности относительно сложения чисел*);
8. $\alpha(\mathbf{x} + \mathbf{y}) = \alpha\mathbf{x} + \alpha\mathbf{y}$ (*свойство дистрибутивности относительно сложения векторов*).

Определение 2.2. Множество всех n -мерных векторов $\mathbf{x} = (x_1; x_2; \dots; x_n)$, $x_i \in \mathbb{R}$, $i = \overline{1, n}$, с введенными на этом множестве операциями сложения векторов и умножения вектора на число называется *n -мерным арифметическим векторным пространством* и обозначается $\mathbb{R}^n$.

При $n = 2$ и $n = 3$ получаем хорошо известные пространства $\mathbb{R}^2$ и $\mathbb{R}^3$.

Уместно отметить, что аналогичными свойствами, с точностью до обозначений, обладают линейные операции над матрицами одинакового размера (п. 1.2). Пространство $\mathbb{R}^n$ и пространство $\mathbb{M}_{m \times n}$ матриц размера $m \times n$ хотя и имеют различное наполнение, но введенные на них линейные операции (сложение элементов и умножение элемента на число) обладают одинаковыми свойствами. Такие пространства называются *линейными пространствами*. Перечень конкретных пространств, являющихся линейными пространствами, обширен. Некоторые из них будут изучаться ниже. Общая теория линейных пространств изучается в курсе линейной алгебры.

§ 6. Линейная зависимость векторов

При изложении метода Гаусса (п. 4.3) уже использовалось понятие линейной комбинации строк матрицы — n -мерных арифметических векторов.

Будем рассматривать пространство $\mathbb{R}^n$, состоящее из n -мерных арифметических векторов.

Определение 2.3. *Линейной комбинацией* векторов $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m$ пространства $\mathbb{R}^n$ будем называть сумму произведений этих векторов на произвольные действительные числа $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$, т. е.

$$\alpha_1 \mathbf{a}_1 + \alpha_2 \mathbf{a}_2 + \dots + \alpha_m \mathbf{a}_m. \quad (2.3)$$

Линейная комбинация векторов (2.3) является некоторым арифметическим вектором $\mathbf{b}$:

$$\mathbf{b} = \alpha_1 \mathbf{a}_1 + \alpha_2 \mathbf{a}_2 + \dots + \alpha_m \mathbf{a}_m.$$

Особый интерес представляет случай, когда для данной системы векторов $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m$ удастся подобрать числа $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ так, что вектор $\mathbf{b} = \mathbf{0}$ и при этом $\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \dots + \alpha_m^2 \neq 0$, т. е. хотя бы одно число α_i отлично от нуля.

Определение 2.4. Совокупность векторов $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m$ называется *линейно зависимой*, если существуют числа $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$, не равные нулю одновременно и такие, что

$$\alpha_1 \mathbf{a}_1 + \alpha_2 \mathbf{a}_2 + \dots + \alpha_m \mathbf{a}_m = \mathbf{0}. \quad (2.4)$$

Если же равенство (2.4) возможно только при $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_m = 0$, то эта совокупность векторов называется *линейно независимой*.

Например, совокупность векторов $\mathbf{a}_1 = (1; -2; 3; 0)$, $\mathbf{a}_2 = (3; -1; 4; -1)$, $\mathbf{a}_3 = 2\mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_2 = (-1; -3; 2; 1)$ линейно зависима. Действительно, тройка чисел $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, удовлетворяющих определению линейной зависимости арифметических векторов, здесь очевидна: $\alpha_1 = 2$, $\alpha_2 = -1$, $\alpha_3 = -1$ и $2 \cdot \mathbf{a}_1 + (-1) \cdot \mathbf{a}_2 + (-1) \times \mathbf{a}_3 = \mathbf{0}$.

Следующие три теоремы позволяют установить некоторые общие признаки линейной зависимости совокупности векторов.

Теорема 2.1. *Если в совокупности векторов $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m$ хотя бы один вектор нулевой, то вся совокупность линейно зависима.*

Доказательство. Пусть $\mathbf{a}_1 = \mathbf{0}$. Если это не так ($\mathbf{a}_1 \neq \mathbf{0}$), то можно перенумеровать векторы совокупности, приписав

нулевому вектору номер 1. Примем $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = \alpha_3 = \dots = \alpha_m = 0$, тогда $1 \cdot \mathbf{0} + 0 \cdot \mathbf{a}_2 + \dots + 0 \cdot \mathbf{a}_m = \mathbf{0}$, что означает линейную зависимость совокупности векторов. ■

Теорема 2.2. *Если в совокупности векторов $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m$ содержится подсистема $k, k < m$, линейно зависимых векторов, то и вся система векторов линейно зависима.*

Доказательство. Не умаляя общности, можно считать, что линейно зависимы первые k векторов $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_k$. Это означает, что имеется набор k действительных чисел $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$, среди которых хотя бы одно число отлично от нуля, таких, что $\alpha_1 \mathbf{a}_1 + \alpha_2 \mathbf{a}_2 + \dots + \alpha_k \mathbf{a}_k = \mathbf{0}$. Положим $\alpha_{k+1} = 0, \alpha_{k+2} = 0, \dots, \alpha_m = 0$. Тогда

$$\alpha_1 \mathbf{a}_1 + \alpha_2 \mathbf{a}_2 + \dots + \alpha_k \mathbf{a}_k + 0 \cdot \mathbf{a}_{k+1} + 0 \cdot \mathbf{a}_{k+2} + \dots + 0 \cdot \mathbf{a}_m = \mathbf{0},$$

поскольку $\alpha_1 \mathbf{a}_1 + \alpha_2 \mathbf{a}_2 + \dots + \alpha_k \mathbf{a}_k = \mathbf{0}$ по условию теоремы, а $0 \cdot \mathbf{a}_{k+1} + 0 \cdot \mathbf{a}_{k+2} + \dots + 0 \cdot \mathbf{a}_m = \mathbf{0}$ по построению. ■

Наиболее важной и с теоретической и, что не менее важно, с прикладной точек зрения является следующая теорема.

Теорема 2.3. *Совокупность векторов $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m$ линейно зависима тогда и только тогда, когда один из векторов совокупности является линейной комбинацией остальных векторов.*

Доказательство. *Необходимость.* Дано: векторы $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m$ линейно зависимы, т. е. $\exists \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m: \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \dots + \alpha_m^2 \neq 0$ и

$$\alpha_1 \mathbf{a}_1 + \alpha_2 \mathbf{a}_2 + \dots + \alpha_m \mathbf{a}_m = \mathbf{0}. \quad (2.5)$$

Требуется доказать, что некоторый вектор, например $\mathbf{a}_1$ (при $\alpha_1 \neq 0$; если это не так, то воспользуемся перенумерацией), является линейной комбинацией остальных векторов, т. е.

$$\mathbf{a}_1 = \beta_1 \mathbf{a}_2 + \beta_2 \mathbf{a}_3 + \dots + \beta_{m-1} \mathbf{a}_m. \quad (2.6)$$

Разделим равенство (2.5) на α_1 и преобразуем его к виду

$$\mathbf{a}_1 = \left(-\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right) \mathbf{a}_2 + \left(-\frac{\alpha_3}{\alpha_1}\right) \mathbf{a}_3 + \dots + \left(-\frac{\alpha_m}{\alpha_1}\right) \mathbf{a}_m,$$

а это и есть комбинация (2.6), если принять обозначения $\beta_1 = -\frac{\alpha_2}{\alpha_1}, \beta_2 = -\frac{\alpha_3}{\alpha_1}, \dots, \beta_m = -\frac{\alpha_m}{\alpha_1}$.

Достаточность. Дано: некоторый вектор совокупности, например $\mathbf{a}_1$, является линейной комбинацией (2.6) остальных векторов.

Перепишем равенство (2.6) в виде

$$(-1)\mathbf{a}_1 + \beta_1\mathbf{a}_2 + \dots + \beta_{m-1}\mathbf{a}_2 = \mathbf{0}.$$

В теоремах 2.1–2.3 обсуждались условия *линейной зависимости* системы векторов. Не менее важным являются ответы на вопросы о числе *линейно независимых* векторов в заданной совокупности n -мерных векторов, и о максимальном числе линейно независимых векторов в арифметическом пространстве заданной размерности. Необходимо также построить алгоритмы выделения подсистемы линейно независимых векторов из данной системы.

Очевидно, что *минимальное число* линейно независимых векторов в системе n -мерных векторов, среди которых хотя бы один ненулевой, равно 1.

Следующая теорема позволяет получить оценку сверху числа линейно независимых векторов в пространстве $\mathbb{R}^n$.

Теорема 2.4. Любые m векторов пространства $\mathbb{R}^n$ линейно зависимы при $m > n$.

Доказательство. Пусть

$$\begin{aligned}\mathbf{a}_1 &= (a_{11}; a_{12}; \dots; a_{1n}), \\ \mathbf{a}_2 &= (a_{21}; a_{22}; \dots; a_{2n}), \\ &\vdots \\ \mathbf{a}_m &= (a_{m1}; a_{m2}; \dots; a_{mn})\end{aligned}$$

- совокупность n -мерных векторов, причем $m > n$.

Требуется доказать, что существует набор чисел $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ такой, что $\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \dots + \alpha_m^2 \neq 0$ и

$$\alpha_1 \mathbf{a}_1 + \alpha_2 \mathbf{a}_2 + \dots + \alpha_m \mathbf{a}_m = \mathbf{0},$$

Доказательство. Рассмотрим совокупность векторов $\mathbf{x}, \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_n$. Эта совокупность содержит $(n+1)$ n -мерных векторов. По теореме 2.4 она линейно зависима, т. е. существует набор чисел $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n+1}$, в составе которых хотя бы одно число отлично от нуля, такой, что

$$\lambda_1 \mathbf{x} + \lambda_2 \mathbf{e}_1 + \lambda_3 \mathbf{e}_2 + \dots + \lambda_{n+1} \mathbf{e}_n = \mathbf{0}. \quad (2.10)$$

В (2.10) $\lambda_1 \neq 0$. Действительно, в противном случае ($\lambda_1 = 0$) из равенства $\lambda_2 \mathbf{e}_1 + \lambda_3 \mathbf{e}_2 + \dots + \lambda_{n+1} \mathbf{e}_n = \mathbf{0}$ при $\lambda_2^2 + \lambda_3^2 + \dots + \lambda_{n+1}^2 \neq 0$ следовала бы линейная зависимость системы базисных векторов $\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_n \rangle$.

Разделим обе части равенства (2.10) на λ_1 и выразим из полученного соотношения $\mathbf{x}$:

$$\mathbf{x} = \left(-\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) \mathbf{e}_1 + \left(-\frac{\lambda_3}{\lambda_1}\right) \mathbf{e}_2 + \dots + \left(-\frac{\lambda_{n+1}}{\lambda_1}\right) \mathbf{e}_n.$$

Введем обозначения $\alpha_1 = -\frac{\lambda_2}{\lambda_1}$, $\alpha_2 = -\frac{\lambda_3}{\lambda_1}$, $\dots$, $\alpha_n = -\frac{\lambda_{n+1}}{\lambda_1}$. В итоге получим искомое равенство (2.9)

$$\mathbf{x} = \alpha_1 \mathbf{e}_1 + \alpha_2 \mathbf{e}_2 + \dots + \alpha_n \mathbf{e}_n.$$

Докажем единственность разложения (2.9). Предположим противное: пусть существует еще одно, отличное от (2.9), разложение вектора $\mathbf{x}$ по базису $\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_n \rangle$:

$$\mathbf{x} = \beta_1 \mathbf{e}_1 + \beta_2 \mathbf{e}_2 + \dots + \beta_n \mathbf{e}_n$$

и $\exists i \in \{1, 2, \dots, n\}$: $\beta_i \neq \alpha_i$.

Но тогда

$$\mathbf{x} - \mathbf{x} = \mathbf{0} = (\alpha_1 - \beta_1) \mathbf{e}_1 + (\alpha_2 - \beta_2) \mathbf{e}_2 + \dots + (\alpha_n - \beta_n) \mathbf{e}_n,$$

откуда, ввиду линейной независимости векторов $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_n$, следует, что $\alpha_1 - \beta_1 = 0$, $\alpha_2 - \beta_2 = 0$, $\dots$, $\alpha_n - \beta_n = 0$, т. е. $\forall i = 1, n : \beta_i = \alpha_i$. Получили противоречие с предположением. ■

Замечание. Компоненты вектора $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ совпадают с его координатами $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ только в каноническом базисе (2.8).

Пример 2.1. Доказать, что система векторов $\mathbf{e}_1 = (1; -1; 0)$, $\mathbf{e}_2 = (0; 1; 1)$, $\mathbf{e}_3 = (1; 1; 3)$ образует базис $\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3 \rangle$ в пространстве $\mathbb{R}^3$. Найти разложение вектора $\mathbf{x} = (2; -3; 5)$ по этому базису.

Решение. Система векторов $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ образует базис, если, в соответствии с определением линейной независимости системы векторов, равенство

$$\alpha_1 \mathbf{e}_1 + \alpha_2 \mathbf{e}_2 + \alpha_3 \mathbf{e}_3 = \mathbf{0}$$

возможно только при $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0$. Покажем, что в данном примере имеет место именно такая ситуация.

Из равенства

$$\alpha_1(1; -1; 0) + \alpha_2(0; 1; 1) + \alpha_3(1; 1; 3) = (0; 0; 0)$$

получаем однородную систему уравнений

$$\begin{cases} \alpha_1 + \alpha_3 = 0, \\ -\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 0, \\ \alpha_2 + 3\alpha_3 = 0. \end{cases}$$

Поскольку определитель Δ_0 основной матрицы этой СЛАУ отличен от нуля:

$$\Delta_0 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 3 \end{vmatrix} \begin{matrix} \textcircled{-1} \\ \leftarrow \\ \end{matrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 3 \end{vmatrix} \begin{matrix} \textcircled{-1} \\ \leftarrow \\ \end{matrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 1,$$

то данная однородная система уравнений имеет только нулевое решение: $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0$.

Это означает, что векторы $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ образуют базис в пространстве $\mathbb{R}^3$. Для нахождения координат $(x_1; x_2; x_3)$ вектора $\mathbf{x}$ в базисе $\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3 \rangle$ составим уравнение

$$x_1(1; -1; 0) + x_2(0; 1; 1) + x_3(1; 1; 3) = (2; -3; 5).$$

Ему соответствует СЛАУ

$$\begin{cases} x_1 + x_3 = 2, \\ -x_1 + x_2 + x_3 = -3, \\ x_2 + 3x_3 = 5. \end{cases}$$

Решение системы найдем методом Гаусса:

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 1 & 2 \\ -1 & 1 & 1 & -3 \\ 0 & 1 & 3 & 5 \end{array} \right) \begin{matrix} \textcircled{1} \\ \leftarrow \\ \end{matrix} \sim \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & -1 \\ 0 & 1 & 3 & 5 \end{array} \right) \begin{matrix} \textcircled{-1} \\ \leftarrow \\ \end{matrix} \sim \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 6 \end{array} \right).$$

Последнему состоянию расширенной матрицы отвечает СЛАУ

$$\begin{cases} x_1 + x_3 = 2, \\ x_2 + 2x_3 = -1, \\ x_3 = 6. \end{cases}$$

Ее решением является вектор $(-4 \ -13 \ 6)^\top$.

Ответ: $\mathbf{x} = -4\mathbf{e}_1 - 13\mathbf{e}_2 + 6\mathbf{e}_3$.

Решим еще одну задачу — выделение подсистемы линейно независимых векторов из данной совокупности векторов.

Пример 2.2. Определить число линейно независимых векторов в совокупности $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3, \mathbf{a}_4$, если $\mathbf{a}_1 = (1; -2; 0; 1)$, $\mathbf{a}_2 = (0; 1; 3; -1)$, $\mathbf{a}_3 = (1; -3; -3; 2)$, $\mathbf{a}_4 = (1; -1; 3; 0)$.

Если система линейно зависима, то выделить некоторую подсистему линейно независимых векторов.

Решение. Согласно определению 2.4 выясним, существует ли ненулевой набор из 4 чисел $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ такой, что имеет место равенство (2.4), т. е.

$$\alpha_1(1; -2; 0; 1) + \alpha_2(0; 1; 3; -1) + \alpha_3(1; -3; -3; 2) + \alpha_4(1; -1; 3; 0) = (0; 0; 0; 0).$$

Отсюда получаем однородную СЛАУ

$$\begin{cases} \alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_4 = 0, \\ -2\alpha_1 + \alpha_2 - 3\alpha_3 - \alpha_4 = 0, \\ 3\alpha_2 - 3\alpha_3 + 3\alpha_4 = 0, \\ \alpha_1 - \alpha_2 + 2\alpha_3 = 0. \end{cases}$$

Исследуем эту систему на совместность по методу Гаусса. Преобразуем сначала основную матрицу СЛАУ к ступенчатому виду:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ -2 & 1 & -3 & -1 \\ 0 & 3 & -3 & 3 \\ 1 & -1 & 2 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} \textcircled{2} \textcircled{-1} \\ \leftarrow \\ \leftarrow \\ \leftarrow \end{matrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 3 & -3 & 3 \\ 0 & -1 & 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \textcircled{-3} \textcircled{1} \\ \leftarrow \\ \leftarrow \\ \leftarrow \end{matrix} \sim \\ \sim \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Получили равносильную исходной СЛАУ

$$\begin{cases} \alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_4 = 0, \\ \alpha_2 - \alpha_3 + \alpha_4 = 0, \end{cases}$$

в которой число уравнений меньше числа неизвестных. Это означает, что СЛАУ имеет и ненулевые решения $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, а заданная система векторов $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3, \mathbf{a}_4$, как следствие, линейно зависима.

Найдем какую-нибудь линейную комбинацию векторов системы, равную нулевому вектору. Положив в последней системе $\alpha_3 = 2, \alpha_4 = 1$, получаем: $\alpha_1 = -3, \alpha_2 = 1$. При этих значениях коэффициентов $\alpha_i, i = \overline{1, 4}$, получаем линейную комбинацию

$$-3\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2 + 2\mathbf{a}_3 + \mathbf{a}_4 = \mathbf{0}.$$

Основная матрица однородной СЛАУ приведена с помощью элементарных преобразований к ступенчатому виду с двумя ненулевым строками. Можно предположить, что и число линейно независимых векторов в совокупности $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3, \mathbf{a}_4$ равно 2. Однако это предположение требует доказательства.

Сформируем из векторов $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3, \mathbf{a}_4$ матрицу, записав в нее координаты векторов построчно, и приведем эту матрицу к ступенчатому виду:

$$\begin{array}{l} \mathbf{a}_1 \rightarrow \\ \mathbf{a}_2 \rightarrow \\ \mathbf{a}_3 \rightarrow \\ \mathbf{a}_4 \rightarrow \end{array} \begin{pmatrix} 1 & -2 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 3 & -1 \\ 1 & -3 & -3 & 2 \\ 1 & -1 & 3 & 0 \end{pmatrix} \begin{array}{c} \textcircled{-1} \\ \\ \leftarrow \\ \leftarrow \end{array} \sim \begin{pmatrix} 1 & -2 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 3 & -1 \\ 0 & -1 & -3 & 1 \\ 0 & 1 & 3 & -1 \end{pmatrix} \begin{array}{cc} \textcircled{1} & \textcircled{-1} \\ \leftarrow & \leftarrow \\ \leftarrow & \leftarrow \end{array} \sim \begin{pmatrix} 1 & -2 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Запишем выполненные преобразования над строками матрицы в явном виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_3^{(1)} &= \mathbf{a}_3 - \mathbf{a}_1, & \mathbf{a}_3^{(2)} &= \mathbf{a}_3^{(1)} + \mathbf{a}_2 = \mathbf{a}_3 - \mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2 = \mathbf{0}, \\ \mathbf{a}_4^{(1)} &= \mathbf{a}_4 - \mathbf{a}_1, & \mathbf{a}_4^{(2)} &= \mathbf{a}_4^{(1)} - \mathbf{a}_2 = \mathbf{a}_4 - \mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_2 = \mathbf{0} \end{aligned}$$

(здесь верхние индексы обозначают номер шага преобразования матрицы к ступенчатому виду). Отсюда $\mathbf{a}_3 = \mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_4 = \mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2$.

Последний результат следует понимать так: векторы $\mathbf{a}_3$ и $\mathbf{a}_4$ выражаются через $\mathbf{a}_1$, $\mathbf{a}_2$ линейно по формулам: $\mathbf{a}_3 = \mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_2$; $\mathbf{a}_4 = \mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2$.

Линейная независимость векторов $\mathbf{a}_1$ и $\mathbf{a}_2$ легко доказывается методом от противного. Допустим, что эти векторы линейно зависимы. Значит, существуют числа α_1 , α_2 , не равные нулю одновременно и такие, что $\alpha_1 \mathbf{a}_1 + \alpha_2 \mathbf{a}_2 = \mathbf{0}$, или в координатной форме: $\alpha_1(1; -2; 0; 1) + \alpha_2(0; 1; 3; -1) = \mathbf{0}$, что соответствует системе линейных однородных уравнений

$$\begin{cases} \alpha_1 = 0, \\ -2\alpha_1 + \alpha_2 = 0, \\ 3\alpha_2 = 0, \\ \alpha_1 - \alpha_2 = 0. \end{cases}$$

Ее единственным решением является нулевой вектор $(0\ 0)^T$. Значит, предположение о линейной зависимости векторов $\mathbf{a}_1$ и $\mathbf{a}_2$ ошибочно.

Ответ: число линейно независимых векторов в системе равно 2; подсистема линейно независимых векторов $\langle \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2 \rangle$.

§ 8. Скалярное произведение и норма

В школьном курсе математики вводится скалярное произведение векторов $\mathbf{x}$, $\mathbf{y}$, заданных своими координатами $\mathbf{x} = (x_1; x_2; x_3)$, $\mathbf{y} = (y_1; y_2; y_3)$ в прямоугольной декартовой системе координат $Oxyz$ (в каноническом базисе $\langle \mathbf{e}_1^0, \mathbf{e}_2^0, \mathbf{e}_3^0 \rangle$). Оно вычисляется по формуле $(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = x_1 y_1 + x_2 y_2 + x_3 y_3$.

Скалярное произведение в пространстве $\mathbb{R}^n$ логично ввести на основании общего правила, которое с точностью до обозначений элементов подходило бы и для других линейных пространств¹⁾. Пусть $\mathbb{X}^n$ — линейное пространство.

Определение 2.6. Линейное пространство $\mathbb{X}^n$ называется *евклидовым пространством* и обозначается $\mathbb{E}^n$, если в нем определено *правило*, по которому любым двум векторам $\mathbf{x} = (x_1; x_2; \dots; x_n)$ и $\mathbf{y} = (y_1; y_2; \dots; y_n)$ этого пространства ставится в соответствие действительное число, которое обозначается $(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ и называется *скалярным произведением*.

¹⁾ Например: для пространства $\mathbb{M}_{m \times k}$ матриц ($mk = n$), для пространства $\mathbb{V}^n$ геометрических векторов ($n = 1, 2, 3$).

Правило может вводиться произвольно, но при этом должно удовлетворять следующим аксиомам (*аксиомам скалярного произведения*):

1. $\forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{X}^n: (\mathbf{x}, \mathbf{y}) = (\mathbf{y}, \mathbf{x});$
2. $\forall \lambda \in \mathbb{R} \forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{X}^n: (\lambda \mathbf{x}, \mathbf{y}) = \lambda(\mathbf{x}, \mathbf{y});$
3. $\forall \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z} \in \mathbb{X}^n: (\mathbf{x} + \mathbf{y}, \mathbf{z}) = (\mathbf{x}, \mathbf{z}) + (\mathbf{y}, \mathbf{z});$
4. $\forall \mathbf{x} \in \mathbb{X}^n: (\mathbf{x}, \mathbf{x}) \geq 0$, причем $(\mathbf{x}, \mathbf{x}) = 0 \Leftrightarrow \mathbf{x} = \mathbf{0}$.

Легко проверяется, что правило

$$(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \stackrel{\text{def}}{=} x_1 y_1 + x_2 y_2 + \cdots + x_n y_n, \quad (2.11)$$

являющееся обобщением формулы скалярного произведения в пространстве $\mathbb{R}^3$, удовлетворяет всем аксиомам скалярного произведения. Значит, пространство $\mathbb{R}^n$ с введенным в нем скалярным произведением (2.11) является *евклидовым пространством*.

Для любой пары векторов $\mathbf{x}, \mathbf{y}$ в евклидовом пространстве $\mathbb{E}^n$ имеет место *неравенство Коши* ¹⁾–*Буняковского* ²⁾, которое составляет содержание следующей теоремы.

Теорема 2.6.

$$\forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{E}^n: (\mathbf{x}, \mathbf{y})^2 \leq (\mathbf{x}, \mathbf{x})(\mathbf{y}, \mathbf{y}). \quad (2.12)$$

Доказательство. Для произвольных $\lambda \in \mathbb{R}$ и $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{E}^n$ вектор $\mathbf{z} = \lambda \mathbf{x} - \mathbf{y} \in \mathbb{E}^n$. В силу аксиомы 4 скалярного произведения $(\mathbf{z}, \mathbf{z}) \geq 0$, или $(\lambda \mathbf{x} - \mathbf{y}, \lambda \mathbf{x} - \mathbf{y}) \geq 0$, откуда $\lambda^2(\mathbf{x}, \mathbf{x}) - 2\lambda(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + (\mathbf{y}, \mathbf{y}) \geq 0$ для любого $\lambda \in \mathbb{R}$.

Квадратное неравенство относительно λ неотрицательно для всех λ тогда и только тогда, когда его дискриминант $D = (\mathbf{x}, \mathbf{y})^2 - (\mathbf{x}, \mathbf{x})(\mathbf{y}, \mathbf{y})$ неположителен, т. е.

$$(\mathbf{x}, \mathbf{y})^2 - (\mathbf{x}, \mathbf{x})(\mathbf{y}, \mathbf{y}) \leq 0 \Leftrightarrow (\mathbf{x}, \mathbf{y})^2 \leq (\mathbf{x}, \mathbf{x})(\mathbf{y}, \mathbf{y}),$$

а это и есть искомое неравенство (2.12). В частности, если $(\mathbf{x}, \mathbf{x}) = 0$, т. е. $\mathbf{x} = \mathbf{0}$, то обе части неравенства (2.12) обращаются в нуль и оно остается справедливым. ■

¹⁾ Коши Огюстен Луи (Cauchy Augustin Louis, 1789–1857) — французский математик. Основные труды по математическому анализу, математической физике. Его теория предела стала основой для современных курсов математического анализа.

²⁾ Буняковский Виктор Яковлевич (1804–1889) — русский математик. Основные результаты в теории вероятностей, теории чисел и в анализе.

Неравенство Коши–Буняковского в векторной форме справедливо для произвольной пары векторов в любом евклидовом пространстве $\mathbb{E}^n$. В координатной форме оно принимает свой уникальный вид в конкретном евклидовом пространстве. Так, в пространстве $\mathbb{R}^n$ со скалярным произведением (2.11) будем иметь неравенство

$$x_1y_1 + x_2y_2 + \cdots + x_ny_n \leq (x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2)(y_1^2 + y_2^2 + \cdots + y_n^2).$$

В пространствах $\mathbb{R}^2$ и $\mathbb{R}^3$ вводились и достаточно широко использовались в школьном курсе алгебры длина (модуль) вектора и расстояние между двумя точками. Обобщением этих понятий в линейном пространстве $\mathbb{X}^n$ являются соответственно *норма* и *метрика*.

Определение 2.7. Арифметическое пространство $\mathbb{X}^n$ называется *нормированным пространством*, если в нем определено правило, по которому каждому вектору $\mathbf{x} \in \mathbb{X}^n$ ставится в соответствие действительное число $\|\mathbf{x}\|$, называемое *нормой вектора* $\mathbf{x}$.

Правило может вводиться произвольно, но при этом должно удовлетворять трем *аксиомам нормы*:

1. $\forall \mathbf{x} \in \mathbb{X}^n : \|\mathbf{x}\| \geq 0$, причем $\|\mathbf{x}\| = 0 \Leftrightarrow \mathbf{x} = \mathbf{0}$;
2. $\forall \lambda \in \mathbb{R} \forall \mathbf{x} \in \mathbb{X}^n : \|\lambda \mathbf{x}\| = |\lambda| \cdot \|\mathbf{x}\|$;
3. $\forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{X}^n : \|\mathbf{x} + \mathbf{y}\| \leq \|\mathbf{x}\| + \|\mathbf{y}\|$ (*неравенство треугольника*).

В евклидовом пространстве $\mathbb{E}^n$ норму можно задать по единому правилу. Справедлива следующая теорема.

Теорема 2.6. *Всякое евклидово пространство $\mathbb{E}^n$ можно сделать нормированным, если норму определить так:*

$$\boxed{\|\mathbf{x}\| \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{(\mathbf{x}, \mathbf{x})}}. \quad (2.13)$$

Доказательство. Необходимо доказать, что правило (2.13) удовлетворяет всем аксиомам нормы.

Аксиома 1 нормы следует из аксиомы 4 скалярного произведения:

$$\forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n : (\mathbf{x}, \mathbf{x}) \geq 0 \Rightarrow \|\mathbf{x}\| = \sqrt{(\mathbf{x}, \mathbf{x})} \geq 0.$$

$$2. \|\lambda \mathbf{x}\| = \sqrt{(\lambda \mathbf{x}, \lambda \mathbf{x})} = \sqrt{\lambda^2 (\mathbf{x}, \mathbf{x})} = |\lambda| \sqrt{(\mathbf{x}, \mathbf{x})} = |\lambda| \cdot \|\mathbf{x}\|.$$

3. Воспользуемся неравенством Коши–Буняковского:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{x} + \mathbf{y}\| &\leq \sqrt{(\mathbf{x} + \mathbf{y}, \mathbf{x} + \mathbf{y})} = \sqrt{(\mathbf{x}, \mathbf{x}) + 2(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + (\mathbf{y}, \mathbf{y})} \leq \\ &\leq \left| (\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq \sqrt{(\mathbf{x}, \mathbf{x})} \sqrt{(\mathbf{y}, \mathbf{y})}, \quad (\mathbf{x}, \mathbf{x}) = (\sqrt{(\mathbf{x}, \mathbf{x})})^2 \right| \leq \\ &\leq \sqrt{(\sqrt{(\mathbf{x}, \mathbf{x})})^2 + 2\sqrt{(\mathbf{x}, \mathbf{x})} \sqrt{(\mathbf{y}, \mathbf{y})} + (\sqrt{(\mathbf{y}, \mathbf{y})})^2} = \\ &= \sqrt{(\sqrt{(\mathbf{x}, \mathbf{x})} + \sqrt{(\mathbf{y}, \mathbf{y})})^2} = \sqrt{(\mathbf{x}, \mathbf{x})} + \sqrt{(\mathbf{y}, \mathbf{y})} = \|\mathbf{x}\| + \|\mathbf{y}\|. \blacksquare \end{aligned}$$

В координатной форме в пространстве $\mathbb{R}^n$ со скалярным произведением (2.11) формула (2.13) принимает следующий вид:

$$\|\mathbf{x}\|_2 \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}, \quad (2.14)$$

или с использованием знака $\sum$ суммы: $\|\mathbf{x}\|_2 = \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right)^{1/2}$. Норму $\|\mathbf{x}\|_2$ называется *евклидовой нормой*.

Однако норму в пространстве $\mathbb{R}^n$ можно ввести и другими правилами, например:

$$\|\mathbf{x}\|_1 \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{i=1}^n |x_i|,$$

$$\|\mathbf{x}\|_\infty \stackrel{\text{def}}{=} \max |x_i|, \quad 1 \leq i \leq n.$$

Проверка выполнения аксиом нормы для этих правил не вызывает затруднений. Их выполнение обеспечивается свойствами действительного числа. В частности, для нормы $\|\mathbf{x}\|_1$ справедливость третьей аксиомы доказывается с использованием свойства модуля суммы двух чисел ($|a + b| \leq |a| + |b|$):

$$\begin{aligned} \|\mathbf{x} + \mathbf{y}\|_1 &= |x_1 + y_1| + |x_2 + y_2| + \dots + |x_n + y_n| \leq \\ &\leq |x_1| + |y_1| + |x_2| + |y_2| + \dots + |x_n| + |y_n| = \\ &= (|x_1| + |x_2| + \dots + |x_n|) + (|y_1| + |y_2| + \dots + |y_n|) = \|\mathbf{x}\|_1 + \|\mathbf{y}\|_1. \end{aligned}$$

Норма $\|\mathbf{x}\|_1$ называется ℓ_1 -нормой, а $\|\mathbf{x}\|_\infty$ — ℓ_∞ -нормой.

Эти нормы и евклидова норма в арифметическом пространстве $\mathbb{R}^n$ связаны неравенством

$$\|\mathbf{x}\|_\infty \leq \|\mathbf{x}\|_2 \leq \|\mathbf{x}\|_1. \quad (2.15)$$

Докажем его. Пусть $\|\mathbf{x}\|_\infty = \max_{1 \leq i \leq n} |x_i| = |x_{i_0}|$, где $i_0 \in \{1, 2, \dots, n\}$.

Тогда

$$\|\mathbf{x}\|_\infty = |x_{i_0}| = \sqrt{(x_{i_0})^2} \leq \sqrt{x_1^2 + \dots + x_{i_0}^2 + \dots + x_n^2} = \|\mathbf{x}\|_2.$$

Далее, $\|\mathbf{x}\|_2 \leq \|\mathbf{x}\|_1 \Leftrightarrow \|\mathbf{x}\|_2^2 \leq \|\mathbf{x}\|_1^2$, поэтому достаточно доказать, что $\forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ выполняется неравенство $\|\mathbf{x}\|_2^2 \leq \|\mathbf{x}\|_1^2$. Имеем

$$\begin{aligned} \|\mathbf{x}\|_2^2 &= \sum_{k=1}^n x_k^2 = \sum_{k=1}^n |x_k|^2 \leq \sum_{k=1}^n |x_k|^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |x_i| \cdot |x_j| = \\ &= (|x_1| + \dots + |x_n|)^2 = \|\mathbf{x}\|_1^2. \end{aligned}$$

Неравенство (2.15) доказано.

Рассмотрим пример вычисления каждой из трех норм в пространстве $\mathbb{R}^4$. Пусть $\mathbf{x} = (-3; 20; 9; -100)$. Тогда:

$$\|\mathbf{x}\|_2 = \sqrt{(-3)^2 + 20^2 + 9^2 + (-100)^2} = \sqrt{10490} \approx 102,42;$$

$$\|\mathbf{x}\|_1 = |-3| + 20 + 9 + |-100| = 132;$$

$$\|\mathbf{x}\|_\infty = \max\{|-3|, 20, 9, |-100|\} = 100.$$

Неравенство (2.15) для данного вектора $\mathbf{x}$ принимает следующий вид: $100 < \sqrt{10490} < 132$.

Каждому вектору $\mathbf{x}$, приведенному к началу координат в пространстве $\mathbb{R}^n$, соответствует единственная точка этого пространства с координатами $(x_1; x_2; \dots; x_n)$. Естественным является желание находить каким-то образом расстояние между двумя точками этого пространства. Соответствующее правило должно обладать достаточной общностью, т. е. подходить для пространств, имеющих различное наполнение.

Пусть $\mathbb{X}^n$ — некоторое пространство.

Определение 2.8. Пространство $\mathbb{X}^n$ называется *метрическим (метризованным)*, если в нем введена *метрика (расстояние)* — однозначная неотрицательная действительная функция $\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y})$, определенная для любых двух элементов $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{X}^n$.

Метрика может вводиться произвольно, но при этом должна удовлетворять следующим трем аксиомам метрики:

1. $\forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{X}^n : \rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \geq 0$, причем $\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0 \Leftrightarrow \mathbf{x} = \mathbf{y}$ — аксиома тождества;

2. $\forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{X}^n : \rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \rho(\mathbf{y}, \mathbf{x})$ — аксиома симметрии;

3. $\forall \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z} \in \mathbb{X}^n : \rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq \rho(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \rho(\mathbf{y}, \mathbf{z})$ — аксиома треугольника.

В нормированном пространстве $\mathbb{X}^n$ расстояние можно вычислять по единому правилу. Справедлива следующая теорема.

Теорема 2.7. *Всякое линейное нормированное пространство можно наделить метрикой, которая порождена нормой, введенной в этом пространстве,*

$$\boxed{\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \stackrel{\text{def}}{=} \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|}. \quad (2.16)$$

Доказательство. Требуется доказать, что для правила (2.16) выполняются все три аксиомы метрики. С учетом свойств нормы имеем:

1. $\forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{X}^n : \rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \geq 0$ в соответствии со свойством 1) нормы; при этом $\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0 \Leftrightarrow \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\| = 0 \Leftrightarrow \mathbf{x} = \mathbf{y}$;

2. $\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\| = \|(-1) \cdot (\mathbf{y} - \mathbf{x})\| = |-1| \cdot \|\mathbf{y} - \mathbf{x}\| = \rho(\mathbf{y}, \mathbf{x})$;

3. $\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\| = \|\mathbf{x} - \mathbf{y} + (\mathbf{z} - \mathbf{z})\| = \|(\mathbf{x} - \mathbf{z}) + (\mathbf{y} - \mathbf{z})\| \leq \|\mathbf{x} - \mathbf{z}\| + \|\mathbf{y} - \mathbf{z}\| = \rho(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \rho(\mathbf{y}, \mathbf{z})$.

Значит, все аксиомы метрики выполняются, если метрика введена правилом (2.16). ■

Каждая из трех норм $\|\mathbf{x}\|_2$, $\|\mathbf{x}\|_1$, $\|\mathbf{x}\|_\infty$ пространства $\mathbb{R}^n$ порождает свое правило вычисления расстояния в этом пространстве:

$$\rho_2(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \left(\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \right)^{1/2};$$

$$\rho_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|;$$

$$\rho_\infty(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \max_{1 \leq i \leq n} |x_i - y_i|.$$

Подчеркнем, что, хотя аксиомы метрики кажутся не очень обременительными, далеко не всякая неотрицательная функция $f(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ может выступать в качестве метрики пространства $\mathbb{X}^n$. Например, функция $f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sqrt{(x_1 - y_1)^6 + (x_2 - y_2)^6}$, введенная в пространстве $\mathbb{R}^2$, удовлетворяет первым двум аксиомам метрики, но не удовлетворяет аксиоме треугольника. Действительно, если $\mathbf{x} = (0; 0)$, $\mathbf{y} = (4; 4)$, $\mathbf{z} = (1; 1)$, то $f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 64\sqrt{2}$, $f(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \sqrt{2}$, $f(\mathbf{y}, \mathbf{z}) = 27\sqrt{2}$ и, как следствие, аксиома треугольника ($\forall \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z} \in \mathbb{X}^n : \rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq \rho(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \rho(\mathbf{y}, \mathbf{z})$) не выполняется: $64\sqrt{2} > \sqrt{2} + 27\sqrt{2}$.

Однако можно показать, что функция $\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = ((x_1 - y_1)^6 + (x_2 - y_2)^6)^{1/6}$ уже будет удовлетворять всем аксиомам метрики в двумерном арифметическом пространстве.

Более подробно эти вопросы рассматриваются в курсе линейной алгебры в разделе «Линейные пространства».

Применим введенный аппарат нормированного пространства $\mathbb{E}^n$ к анализу системы векторов (2.8). Получаем следующие свойства:

1. $(\mathbf{e}_i^0, \mathbf{e}_j^0) = 0 \quad \forall i \neq j$;
2. $\|\mathbf{e}_i^0\| = 1 \quad \forall i = \overline{1, n}$.

Первое свойство означает, что векторы системы *попарно ортогональны*, а второе — что норма («длина») каждого вектора системы равна единице.

Определение 2.9. Система векторов $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_n$, в которой векторы попарно ортогональны и каждый вектор имеет единичную длину, называется *ортонормированной системой*.

Свойства 1, 2 ортонормированной системы векторов можно объединить одной формулой

$$(\mathbf{e}_i, \mathbf{e}_j) = \delta_{ij} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j. \end{cases} \quad (2.17)$$

Здесь δ_{ij} — *дельта-символ Кронекера*. При объединении свойств 1, 2 в формулу (2.17) учтено, что в соответствии с (2.13) $\|\mathbf{e}_i\| = \sqrt{(\mathbf{e}_i, \mathbf{e}_i)}$ и поскольку $\|\mathbf{e}_i\| = 1$, то и $(\mathbf{e}_i, \mathbf{e}_i) = 1$.

Множество ортонормированных базисов в пространстве $\mathbb{E}^n$ не исчерпывается только *каноническим базисом* (2.8). Таких базисов в пространстве $\mathbb{E}^n$ бесконечно много. Доказательство этого утверждения будет приведено в курсе линейной алгебры. Но только в *каноническом базисе* (2.8) компоненты $x_i, i = \overline{1, n}$, вектора $\mathbf{x} = (x_1; x_2; \dots; x_n)$ совпадают с координатами $\alpha_i, i = \overline{1, n}$, разложения вектора $\mathbf{x}$ по этому базису ($\forall i = \overline{1, n}: \alpha_i = x_i$).

Пример 2.3. Найти решение СЛАУ

$$\begin{cases} x + 2y - z = 2, \\ 2x + y + z = 1, \end{cases}$$

наименее уклоняющееся в евклидовой метрике от нуля (от нулевого вектора $(0; 0; 0)$).

Решение. Уравнения системы задают в пространстве $\mathbb{R}^3$ две пересекающиеся плоскости. Значит, система уравнений определяет в пространстве некоторую прямую. По условию задачи требуется найти на прямой точку, ближайшую к точке $(0; 0; 0)$. С позиций систем линейных уравнений необходимо найти минимальное по норме решение $\mathbf{X}^0 = (x^0 \ y^0 \ z^0)^\top$ системы.

Сначала найдем общее решение СЛАУ в параметрической форме (параметр t — свободная переменная), а затем из бесконечного множества решений выберем вектор $X^0 = X(t_0)$ с минимальной нормой.

Имеем

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & -1 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right) \xrightarrow{\substack{\text{⊖} \\ \leftarrow}} \sim \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & -1 & 2 \\ 0 & -3 & 3 & -3 \end{array} \right).$$

Полученной ступенчатой форме расширенной матрицы СЛАУ отвечает система уравнений, равносильная исходной СЛАУ,

$$\begin{cases} x + 2y = 2 + t, \\ y = 1 + t, \\ z = t, \quad t \in \mathbb{R}. \end{cases}$$

Ее решение $X(t) = (-t \ 1 + t \ t)^\top$. Находим норму вектора $X(t)$: $\|X(t)\| = \sqrt{(-t)^2 + (1+t)^2 + t^2} = \sqrt{3t^2 + 2t + 1}$.

Теперь необходимо найти наименьшее значение нормы $\|X(t)\|$ вектора $X(t)$, т. е. найти $\min_{t \in \mathbb{R}} \sqrt{3t^2 + 2t + 1}$. Поскольку $3t^2 + 2t + 1 = 3 \left(t + \frac{1}{3}\right)^2 + \frac{2}{3}$, то наименьшее значение нормы равно $\sqrt{2/3}$, а достигается оно при $t_0 = -1/3$, что соответствует точке $\left(\frac{1}{3}; \frac{2}{3}; -\frac{1}{3}\right)$.

$$\text{Ответ: } X^0 = \left(\frac{1}{3} \ \frac{2}{3} \ -\frac{1}{3}\right)^\top, \quad \|X^0\|_{\min} = \sqrt{\frac{2}{3}}.$$

§ 9. Ранг системы векторов. Ранг матрицы

Пусть $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m$ — система n -мерных арифметических векторов $\mathbf{a}_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$.

Определение 2.10. Максимальное число линейно независимых векторов, входящих в заданную систему векторов, называется *рангом* этой системы и обозначается $\text{rg}\{\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m\}$.

Замечание. Ранг системы векторов обозначается также символами $\text{rang}\{\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m\}$, $\text{rank}\{\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m\}$.

Естественно теперь определить ранг некоторой матрицы $A_{m \times n}$ как максимальное число линейно независимых строк (векторов-строк) этой матрицы.

Определение 2.11. Рангом матрицы A называется ранг системы ее строк, т. е. максимальное число линейно независимых строк этой матрицы.

Ранг матрицы A будем обозначать символом $\text{rg } A$. Нахождение ранга матрицы с помощью элементарных преобразований является, очевидно, наиболее простой и естественной процедурой. Тем не менее она требует обоснования.

Теорема 2.8. Элементарные преобразования над строками матрицы не меняют ее ранга.

Доказательство. Требуется доказать, что при элементарных преобразованиях над строками матрицы число линейно независимых строк остается без изменения. Будем рассматривать строки матрицы как упорядоченные наборы координат n -мерных векторов $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m$. Пусть $\text{rg } A = k$, $k \leq \min\{m, n\}$, и линейно независимы первые k строк матрицы (векторы $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_k$), а векторы $\mathbf{a}_{k+1}, \mathbf{a}_{k+2}, \dots, \mathbf{a}_m$ (при $k < m$) линейно выражаются через $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_k$ по формулам (2.19).

Очевидно, что перестановка строк матрицы и умножение строки на некоторое число не влияют на количество линейно независимых строк.

Докажем, что сложение некоторой строки матрицы с другой строкой, умноженной на произвольное число, также не меняет ранга матрицы. Пусть матрица $A^{(1)}$ получена из матрицы A прибавлением к ее i -й строке строки с номером j , умноженной на некоторое число λ , т. е.

$$A = (\mathbf{a}_1 \ \mathbf{a}_2 \ \dots \ \mathbf{a}_m)^\top, \quad \text{а} \quad A^{(1)} = (\mathbf{a}_1 \ \mathbf{a}_2 \ \dots \ \mathbf{a}_i + \lambda \mathbf{a}_j \ \mathbf{a}_m)^\top.$$

Покажем, что $\text{rg } A^{(1)} = \text{rg } A = k$.

Если $i > k$, $j \in \{1, 2, \dots, m\}$, то линейно независимая подсистема векторов $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_k$ сохраняется в $A^{(1)}$ без изменения и потому $\text{rg } A^{(1)} = k$.

Пусть теперь $i \leq k$, $j \in \{1, 2, \dots, m\}$. В этом случае система первых k векторов

$$(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_i + \lambda \mathbf{a}_j, \dots, \mathbf{a}_k) \tag{2.20}$$

может быть линейно зависимой.

Например, если $\lambda = 1$, $\mathbf{a}_j = -\mathbf{a}_i + \alpha \mathbf{a}_s$, $\alpha \neq 0$, $s \leq k$, $s \neq i$, то $\mathbf{a}_i + \lambda \mathbf{a}_j = \mathbf{a}_i - \mathbf{a}_i + \alpha \mathbf{a}_s = \alpha \mathbf{a}_s$, тогда система векторов (2.20)

содержит два пропорциональных вектора $\mathbf{a}_s$ и $\alpha \mathbf{a}_s$, а потому линейно зависима.

Однако линейно независимой в этом случае будет либо система k векторов

$$\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_{i-1}, \mathbf{a}_j, \mathbf{a}_{i+1}, \dots, \mathbf{a}_k, \quad (2.21)$$

либо система (2.20).

Если система векторов (2.21) линейно независима, то утверждение теоремы справедливо и в этом случае ($i \leq k$, $j \in \{1, 2, \dots, m\}$). Если же система (2.21) линейно зависима, то это означает, что вектор $\mathbf{a}_j$ линейно выражается через другие

векторы этой системы, т. е. $\mathbf{a}_j = \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq i}}^k \beta_s \mathbf{a}_s$.

Покажем, что в этом случае равенство

$$\alpha_1 \mathbf{a}_1 + \alpha_2 \mathbf{a}_2 + \dots + \alpha_i (\mathbf{a}_i + \lambda \mathbf{a}_j) + \dots + \alpha_k \mathbf{a}_k = \mathbf{0}$$

возможно только при $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_k = 0$. Имеем

$$\alpha_1 \mathbf{a}_1 + \alpha_2 \mathbf{a}_2 + \dots + \alpha_i \left(\mathbf{a}_i + \lambda \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq i}}^k \beta_s \mathbf{a}_s \right) + \dots + \alpha_k \mathbf{a}_k = \mathbf{0},$$

или

$$\sum_{s=1}^k (\alpha_s + \alpha_i \lambda \beta_s) \mathbf{a}_s + \alpha_i \mathbf{a}_i = \mathbf{0}.$$

Но векторы $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_k$ по условию теоремы линейно независимы, поэтому $\alpha_s + \alpha_i \lambda \beta_s = 0 \quad \forall s = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, k$ и $\alpha_i = 0$. Отсюда следует, что все $\alpha_i = 0$, $i = \overline{1, n}$. Таким образом, при $i \leq k$ линейно независимой будет либо система (2.20), либо (2.21), так что и при $i \leq k$: $\text{rg } A^{(1)} = \text{rg } A = k$. ■

Следствие. Ранг матрицы A равен числу ненулевых строк ступенчатой матрицы, полученной из исходной матрицы с помощью элементарных преобразований.

Это утверждение представляется вполне очевидным и легко доказывается методом от противного (см. пример 2.2).

Пример 2.4. 1) Найти ранг матрицы

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -2 & -1 \\ 2 & -1 & -2 & 3 \\ 3 & 0 & -3 & 8 \\ 0 & 2 & -1 & 1 \\ 4 & -1 & -6 & 1 \end{pmatrix}.$$

2) Выделить базисную подсистему векторов-строк матрицы и разложить остальные векторы-строки по базисным векторам.

Решение. 1) Приведем матрицу A к ступенчатому виду:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -2 & -1 \\ 2 & -1 & -2 & 3 \\ 3 & 0 & -3 & 8 \\ 0 & 2 & -1 & 1 \\ 4 & -1 & -6 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \textcircled{-2} \textcircled{-3} \textcircled{-4} \\ \leftarrow \\ \leftarrow \\ \leftarrow \\ \leftarrow \end{matrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & 0 & -2 & -1 \\ 0 & -1 & 2 & 5 \\ 0 & 0 & 3 & 11 \\ 0 & 2 & -1 & 1 \\ 0 & -1 & 2 & 5 \end{pmatrix} \begin{matrix} \textcircled{2} \textcircled{-1} \\ \leftarrow \\ \leftarrow \\ \leftarrow \end{matrix} \sim \\ \sim \begin{pmatrix} 1 & 0 & -2 & -1 \\ 0 & -1 & 2 & 5 \\ 0 & 0 & 3 & 11 \\ 0 & 0 & 3 & 11 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} \textcircled{-1} \\ \leftarrow \\ \leftarrow \end{matrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & 0 & -2 & -1 \\ 0 & -1 & 2 & 5 \\ 0 & 0 & 3 & 11 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Ступенчатая матрица получена элементарными преобразованиями над строками матрицы A :

$$A \rightarrow A^{(1)} \rightarrow A^{(2)} \rightarrow A^{(3)}.$$

Число ненулевых строк матрицы $A^{(3)}$ равно 3; значит, и ее ранг равен 3 ($\text{rg } A = 3$). При этом векторы $\mathbf{a}_1$, $\mathbf{a}_2$, $\mathbf{a}_3$ образуют базисную подсистему векторов.

2) Выпишем преобразования над векторами-строками пошагово.

Шаг 1.

$$\mathbf{a}_2^{(1)} = \mathbf{a}_2 - 2\mathbf{a}_1;$$

$$\mathbf{a}_3^{(1)} = \mathbf{a}_3 - 3\mathbf{a}_1;$$

$$\mathbf{a}_5^{(1)} = \mathbf{a}_5 - 4\mathbf{a}_1;$$

$$\mathbf{a}_4^{(1)} = \mathbf{a}_4.$$

Шаг 2.

$$\mathbf{a}_4^{(2)} = \mathbf{a}_4^{(1)} + 2\mathbf{a}_2^{(1)} = \mathbf{a}_4 + 2\mathbf{a}_2 - 4\mathbf{a}_1;$$

$$\mathbf{a}_5^{(2)} = \mathbf{a}_5^{(1)} - \mathbf{a}_2^{(1)} = \mathbf{a}_5 - 4\mathbf{a}_1 - (\mathbf{a}_2 - 2\mathbf{a}_1) = \mathbf{a}_5 - \mathbf{a}_2 - 2\mathbf{a}_1;$$

$$\mathbf{a}_3^{(2)} = \mathbf{a}_3^{(1)}.$$

Шаг 3.

$$\mathbf{a}_4^{(3)} = \mathbf{a}_4^{(2)} - \mathbf{a}_3^{(2)} = \mathbf{a}_4 + 2\mathbf{a}_2 - 4\mathbf{a}_1 - (\mathbf{a}_3 - 3\mathbf{a}_1) = \mathbf{a}_4 + 2\mathbf{a}_2 - \mathbf{a}_3 - \mathbf{a}_1.$$

Поскольку $\mathbf{a}_4^{(3)} = \mathbf{0}$ и $\mathbf{a}_5^{(3)} = \mathbf{0}$, то

$$\mathbf{a}_4 + 2\mathbf{a}_2 - \mathbf{a}_3 - \mathbf{a}_1 = \mathbf{0} \Rightarrow \mathbf{a}_4 = \mathbf{a}_1 - 2\mathbf{a}_2 + \mathbf{a}_3;$$

$$\mathbf{a}_5 - \mathbf{a}_2 - 2\mathbf{a}_1 = \mathbf{0} \Rightarrow \mathbf{a}_5 = 2\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2.$$

Ответ: 1) $\text{rg } A = 3$. 2) $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$ — базисные векторы;

$$\mathbf{a}_4 = \mathbf{a}_1 - 2\mathbf{a}_2 + \mathbf{a}_3; \quad \mathbf{a}_5 = 2\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2.$$

Замечание 1. Преобразования над строками матрицы на каждом шаге иногда записывают рядом с матрицей, на одной линии с соответствующей строкой. В условиях примера 2.4 это выглядело бы так:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -2 & -1 \\ 2 & -1 & -2 & 3 \\ 3 & 0 & -3 & 8 \\ 0 & 2 & -1 & 1 \\ 4 & -1 & -6 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \\ \mathbf{a}_3 \\ \mathbf{a}_4 \\ \mathbf{a}_5 \end{matrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & 0 & -2 & -1 \\ 0 & -1 & 2 & 5 \\ 0 & 0 & 3 & 11 \\ 0 & 2 & -1 & 1 \\ 0 & -1 & 2 & 5 \end{pmatrix} \begin{matrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 - 2\mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_3 - 3\mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_4 \\ \mathbf{a}_5 - 4\mathbf{a}_1 \end{matrix} \sim$$

$$\sim \begin{pmatrix} 1 & 0 & -2 & -1 \\ 0 & -1 & 2 & 5 \\ 0 & 0 & 3 & 11 \\ 0 & 0 & 3 & 11 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 - 2\mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_3 - 3\mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_4 + 2(\mathbf{a}_2 - 2\mathbf{a}_1) \\ \mathbf{a}_5 - 4\mathbf{a}_1 - (\mathbf{a}_2 - 2\mathbf{a}_1) \end{matrix} \sim$$

$$\sim \begin{pmatrix} 1 & 0 & -2 & 1 \\ 0 & -1 & 2 & 5 \\ 0 & 0 & 3 & 11 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 - 2\mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_3 - 3\mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_4 + 2\mathbf{a}_2 - 4\mathbf{a}_1 - (\mathbf{a}_3 - 3\mathbf{a}_1) \\ \mathbf{a}_5 - \mathbf{a}_2 - 2\mathbf{a}_1 \end{matrix}.$$

Отсюда, в частности, получаем:

$$\mathbf{a}_4 + 2\mathbf{a}_2 - \mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_3 = \mathbf{0}, \Rightarrow \mathbf{a}_4 = \mathbf{a}_1 - 2\mathbf{a}_2 + \mathbf{a}_3;$$

$$\mathbf{a}_5 - \mathbf{a}_2 - 2\mathbf{a}_1 = \mathbf{0}, \Rightarrow \mathbf{a}_5 = 2\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2.$$

Замечание 2. В качестве базисных в системе векторов $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3, \mathbf{a}_4, \mathbf{a}_5$ можно выбрать не только векторы $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$, но и, например, $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_4$. Действительно, эти векторы линейно независимы (проверьте!). В этом случае $\mathbf{a}_3 = -\mathbf{a}_1 + 2\mathbf{a}_2 + \mathbf{a}_4$, $\mathbf{a}_5 = 2\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2$.

Определение 2.12. Прямоугольная матрица A размера $m \times n$ называется *матрицей полного ранга*, если $\text{rg } A = \min\{m, n\}$.

Матрица в примере 2.4 не является матрицей полного ранга, так как ее ранг равен 3, размер 5×4 , а $3 < \min\{5, 4\}$. Матрица

$$\begin{pmatrix} 2 & 3 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 7 \end{pmatrix}$$

является матрицей полного ранга, так как ее ранг равен 3 и $3 = \min\{3, 4\}$.

Альтернативный способ вычисления ранга матрицы (системы векторов) основан на вычислении миноров матрицы A . Теоретической основой этого метода является теорема о базисном миноре.

Определение 2.13. Минором M_k порядка k прямоугольной матрицы $A_{m \times n}$ ($k \leq \min(m, n)$) называется определитель k -го порядка, сформированный из элементов a_{ij} матрицы A , стоящих на пересечении произвольно выбранных k строк и k столбцов.

Число различных миноров k -го порядка равно $C_m^k C_n^k$. Например, из элементов матрицы

$$A_{3 \times 4} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -2 & -1 \\ 0 & 1 & 3 & 4 \\ 2 & 1 & -1 & 3 \end{pmatrix}$$

можно составить $C_4^2 C_3^2 = \frac{4 \cdot 3}{1 \cdot 2} \cdot \frac{4 \cdot 2}{1 \cdot 2} = 12$ миноров второго порядка и $C_4^3 C_3^3 = 4$ минора третьего порядка:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & -2 \\ 0 & 1 & 3 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 4 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 1 & -2 & -1 \\ 0 & 3 & 4 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 0 & -2 & -1 \\ 1 & 3 & 4 \end{vmatrix},$$

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & -2 \\ 2 & 1 & -1 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 1 & 3 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 1 & -2 & -1 \\ 2 & -1 & 3 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} 0 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & 3 \end{vmatrix}.$$

Теорема 2.9 (о базисном миноре). Ранг матрицы равен наибольшему порядку отличных от нуля миноров этой матрицы.

Доказательство. Пусть ранг матрицы $A_{m \times n}$ равен k . Требуется доказать, что в этом случае:

1) в матрице A найдется минор k -го порядка, отличный от нуля;

2) все миноры M_s порядка s , где $k < s \leq \min(m, n)$, равны нулю.

В соответствии с определением ранга в матрице A имеется ровно k линейно независимых строк (*базисных строк*). Значит, любые $(k + 1)$ строк или больше линейно зависимы. Отсюда сразу же следует вывод о том, что все миноры $(k + 1)$ -го и более высоких порядков равны нулю (свойство 10 определителя).

Докажем теперь, что из базисных строк можно сформировать минор M_k , отличный от нуля. Не нарушая общности, допустим, что базисными являются первые k строк $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_k$ матрицы A .

Приведем матрицу A с помощью элементарных преобразований к ступенчатой форме $\tilde{A}$:

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1i_1} & \cdots & a_{1i_2} & \cdots & a_{1i_k} & \cdots & a_{1n} \\ 0 & 0 & \cdots & a_{2i_1} & \cdots & a_{2i_2} & \cdots & a_{2i_k} & \cdots & a_{2n} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & a_{3i_2} & \cdots & a_{3i_k} & \cdots & a_{3n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & a_{ki_k} & \cdots & a_{kn} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}.$$

Сформируем из элементов первых k базисных строк, расположенных в столбцах с номерами $i_1 = 1, i_2, i_3, \dots, i_k$ (всего k столбцов), минор

$$\tilde{M}_k = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{1i_1} & a_{1i_2} & \cdots & a_{1i_k} \\ 0 & a_{2i_1} & a_{2i_2} & \cdots & a_{2i_k} \\ 0 & 0 & a_{3i_2} & \cdots & a_{3i_k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{ki_k} \end{vmatrix}.$$

По определению ступенчатой матрицы диагональные элементы минора $\tilde{M}_k$, расположенные в углах ступеньки, отличны от нуля. Поэтому $\tilde{M}_k = a_{11} a_{2i_2} a_{3i_3} \dots a_{ki_k} \neq 0$.

Минор $\tilde{M}_k$ получен из минора M_k исходной матрицы A с помощью элементарных преобразований над его строками. Нужно показать, что оба минора одновременно либо отличны от нуля, либо равны нулю.

Из свойств определителей и элементарных преобразований матрицы следует, что они (преобразования) сохраняют отношения равенства или неравенства определителя нулю. Если в исходной матрице имеется минор $M_k \neq 0$, то и в преобразованной матрице, отвечающей ему, минор $\tilde{M}_k \neq 0$ и, наоборот, если $M_k = 0$, то и $\tilde{M}_k = 0$. Действительно, перестановка строк может изменить лишь знак определителя; умножение строки на число $\alpha \neq 0$ приводит к тому, что $\tilde{M}_k = \alpha M_k$, так что если $M_k \neq 0$, то и $\tilde{M}_k \neq 0$.

Таким образом, в матрице A отличен от нуля минор M_k , сформированный из элементов первых k строк и столбцов с номерами $1, i_2, i_3, \dots, i_k$. ■

Следствие 1. Ранг системы векторов-строк матрицы $A_{m \times n}$ равен рангу ее системы векторов-столбцов.

В частности, $\operatorname{rg} A^T = \operatorname{rg} A$, т. е. при транспонировании матрицы ее ранг не меняется.

Действительно, если $M_k \neq 0$ — отличный от нуля минор наивысшего порядка k в матрице A , то в транспонированной матрице $A_{n \times m}^T$ отличным от нуля будет минор $\tilde{M}_k$, который получается из данного M_k перестановкой его строк на место столбцов. Таким образом, $\operatorname{rg} A^T = \operatorname{rg} A$. С другой стороны, ранг матрицы A^T по определению равен рангу системы ее строк, являющихся столбцами матрицы A , т. е. ранг системы строк матрицы A равен рангу ее системы столбцов.

Следствие 2. Если найден минор M_k , не равный нулю, то для поиска миноров $(k+1)$ -го порядка, отличных от нуля, далее достаточно вычислить только те миноры $(k+1)$ -го порядка, которые содержат внутри себя минор M_k . (Такие миноры M_{k+1} называются минорами, окаймляющими минор M_k .)

Следствие 3. Определитель квадратной матрицы A равен нулю тогда и только тогда, когда ее строки (столбцы) линейно зависимы.

Следствие 4. Если определитель $|A| \neq 0$, то строки (столбцы) матрицы A линейно независимы.

Следствие 5. Ранг нулевой матрицы равен нулю ($\operatorname{rg} O_{m \times n} = 0$).

Алгоритм нахождения ранга матрицы методом окаймляющих миноров.

1. Если A — нулевая матрица, то $\operatorname{rg} A = 0$. Если же в матрице A имеется хотя бы один отличный от нуля элемент, то $\operatorname{rg} A \geq 1$. Если при этом $\min \{m, n\} = 1$, то $\operatorname{rg} A = 1$.

2. При $\min\{m, n\} > 1$ составляем и вычисляем миноры 2-го порядка, содержащие найденный ненулевой элемент. Если некоторый минор 2-го порядка $M_2^{(i)} \neq 0$, то $\operatorname{rg} A \geq 2$. Если при этом $\min\{m, n\} = 2$, то $\operatorname{rg} A = 2$, иначе переходим к шагу 3. В противном случае (все миноры $M_2^{(i)} = 0$) $\operatorname{rg} A = 1$.

3. Составляем и вычисляем миноры третьего порядка M_3 , окаймляющие отличный от нуля минор $M_2^{(i)}$. Если все окаймляющие миноры M_3 равны нулю, то $\operatorname{rg} A = 2$. Если же обнаруживается минор $M_3 \neq 0$, то $\operatorname{rg} A \geq 3$. Если при этом $\min\{m, n\} = 3$, то $\operatorname{rg} A = 3$, иначе переходим к вычислению миноров 4-го порядка, окаймляющих найденный минор $M_3 \neq 0$.

4. Продолжаем процесс поиска миноров M_{k+1} , окаймляющих минор $M_k \neq 0$, до тех пор, пока на некотором шаге не окажется, что либо $k = \min\{m, n\}$, либо все миноры M_{k+1} , окаймляющие минор $M_k \neq 0$, равны нулю. Тогда $\operatorname{rg} A = k$.

Пример 2.5. Вычислить ранг матрицы из примера 2.4 методом окаймляющих миноров.

Решение. 1. Матрица $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -2 & -1 \\ 2 & -1 & -2 & 3 \\ 3 & 0 & -3 & 8 \\ 0 & 2 & -1 & 1 \\ 4 & -1 & -6 & 1 \end{pmatrix}$ ненулевая,

$$\operatorname{rg} A \geq 1; \min\{m, n\} = 4.$$

2. В матрице A отличен от нуля, например, угловой минор $M_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 2 & -1 \end{vmatrix}$. Поэтому $\operatorname{rg} A \geq 2$. Так как $\min\{m, n\} > 2$, то работа алгоритма продолжается.

3. Переходим к вычислению миноров 3-го порядка M_3 , окаймляющих данный минор $M_2 \neq 0$:

$$M_3^{(1)} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -2 \\ 2 & -1 & -2 \\ 3 & 0 & -3 \end{vmatrix} = (-1) \cdot \begin{vmatrix} 1 & -2 \\ 3 & -3 \end{vmatrix} = -(-3 + 6) = -3.$$

Поскольку $M_3^{(1)} \neq 0$, то $\operatorname{rg} A \geq 3$. Но $\min\{m, n\} > 3$, поиск продолжается.

4. Составим и вычислим миноры 4-го порядка M_4 , окаймляющие минор $M_3^{(1)}$:

$$\begin{aligned}
 M_4^{(1)} &= \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 & -1 \\ 2 & -1 & -2 & 3 \\ 3 & 0 & -3 & 8 \\ 0 & 2 & -1 & 1 \end{vmatrix} \begin{matrix} \textcircled{2} \\ \downarrow \\ \leftarrow \end{matrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -2 & -1 \\ 2 & -1 & -2 & 3 \\ 3 & 0 & -3 & 8 \\ 4 & 0 & -5 & 7 \end{vmatrix} = \\
 &= (-1) \begin{vmatrix} 1 & -2 & -1 \\ 3 & -3 & 8 \\ 4 & -5 & 7 \end{vmatrix} \begin{matrix} \textcircled{2} \uparrow \\ \textcircled{1} \rightarrow \end{matrix} = - \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 3 & 3 & 11 \\ 4 & 3 & 11 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} 3 & 11 \\ 3 & 11 \end{vmatrix}; \\
 M_4^{(2)} &= \begin{vmatrix} 1 & 0 & -2 & -1 \\ 2 & -1 & -2 & 3 \\ 3 & 0 & -3 & 8 \\ 4 & -1 & -6 & 1 \end{vmatrix} \begin{matrix} \textcircled{-1} \\ \downarrow \\ \leftarrow \end{matrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -2 & -1 \\ 2 & -1 & -2 & 3 \\ 3 & 0 & -3 & 8 \\ 2 & 0 & -4 & -2 \end{vmatrix} = 0.
 \end{aligned}$$

Минор $M_4^{(2)} = 0$, поскольку в нем оказались пропорциональными первая и четвертая строки.

Таким образом, все миноры $M_4^{(j)}$, $j = 1, 2$, окаймляющие минор $M_3^{(1)} \neq 0$, равны нулю, поэтому ранг матрицы A равен 3.

Ответ: $\text{rg } A = 3$.

Вопросы для самоконтроля к § 5–9

1. Даны четыре арифметических вектора: $\mathbf{x} = (1; -1; 2)$, $\mathbf{y} = (2; 1; -1)$, $\mathbf{z} = (-1; 1; 2)$, $\mathbf{p} = (2; 1; -1)$. Укажите их размерность. Имеются ли среди них равные векторы? Найдите вектор $\mathbf{q} = 2\mathbf{x} - \mathbf{y} + 3\mathbf{z}$.

2. Является ли система векторов $\mathbf{x}$, $\mathbf{y}$, $\mathbf{z}$ из вопроса 1 линейно зависимой? Если нет, то найдите разложения векторов $\mathbf{p} = (2; 1; -1)$ и $\mathbf{r} = (-3; 0; 11)$ по этой системе векторов.

3. Могут ли 3 пятимерных арифметических вектора образовывать базис в пространстве $\mathbb{R}^5$? Могут ли 6 пятимерных векторов быть линейно независимыми?

4. Можно ли выделить базис пространства $\mathbb{R}^5$ из 5 линейно зависимых векторов? из 7 линейно зависимых векторов? Дайте аргументированный развернутый ответ.

5. Может ли вектор, равный сумме пяти 10-мерных арифметических векторов, иметь норму, равную нулю?

В соответствии с общей теорией ранга системы векторов (и ранга матрицы) либо $\text{rg } \bar{A} = \text{rg } A$, либо $\text{rg } \bar{A} = \text{rg } A + 1$. Действительно, если вектор $\mathbf{b}$ линейно выражается через векторы $\mathbf{a}_j$, $j = \overline{1, n}$, то число линейно независимых векторов в основной и в расширенной матрицах одинаково и потому $\text{rg } \bar{A} = \text{rg } A$. Если же вектор-столбец свободных членов $\mathbf{b}$ не выражается линейно через векторы-столбцы $\mathbf{a}_j$, $j = \overline{1, n}$ основной матрицы, то ранг расширенной матрицы на 1 больше ранга основной матрицы СЛАУ, т. е.

$$\text{rg } \bar{A} = \text{rg } A + 1.$$

Оказывается, что равенство и неравенство рангов основной и расширенной матриц непосредственно связаны с совместностью или несовместностью СЛАУ (2.22). Устанавливает эту связь следующая теорема.

Теорема 2.10 (Кронекера¹⁾–Капелли²⁾). СЛАУ (2.22) совместна тогда и только тогда, когда ранг расширенной матрицы СЛАУ равен рангу основной, или в символьной форме:

$$\exists X^0 = (x_1^0 \ x_2^0 \ \dots \ x_n^0) : x_1^0 \mathbf{a}_1 + x_2^0 \mathbf{a}_2 + \dots + x_n^0 \mathbf{a}_n = \mathbf{b} \Leftrightarrow \text{rg } \bar{A} = \text{rg } A.$$

Доказательство. Необходимость. Дано: СЛАУ (2.22) совместна, т. е. существует вектор $X^0 = (x_1^0 \ x_2^0 \ \dots \ x_n^0)$ такой, что

$$x_1^0 \mathbf{a}_1 + x_2^0 \mathbf{a}_2 + \dots + x_n^0 \mathbf{a}_n = \mathbf{b}. \quad (2.24)$$

Требуется доказать: $\text{rg } \bar{A} = \text{rg } A$.

Из равенства (2.24) следует, что вектор $\mathbf{b}$ линейно выражается через векторы-столбцы $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n$ основной матрицы СЛАУ. Поэтому его наличие не может изменить число линейно независимых векторов-столбцов в расширенной матрице $\bar{A}$ и, как следствие, $\text{rg } \bar{A} = \text{rg } A$.

Достаточность. Дано: $\text{rg } \bar{A} = \text{rg } A$. Требуется доказать, что СЛАУ (2.23) совместна.

Равенство рангов основной A и расширенной $\bar{A}$ матриц СЛАУ означает, что вектор-столбец $\mathbf{b}$ линейно выражается через векторы-столбцы $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n$, т. е. $\exists \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$:

$$\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \dots + \alpha_n^2 \neq 0$$

¹⁾ Кронекер Леопольд (Kronecker Leopold, 1823–1891) — немецкий математик. Основные труды по алгебре и теории чисел.

²⁾ Капелли Альфредо (Capelli Alfredo, 1855–1910) — итальянский математик. Основные труды по алгебре и эллиптическим функциям.

Доказательство. Дано: $AX_1 = B$, $AX_2 = B$.

Требуется доказать, что $A(X_1 - X_2) = 0$.

Имеем $A(X_1 - X_2) = AX_1 - AX_2 = B - B = O$.

Следствие. Если X_0 – решение однородной СЛАУ $AX = 0$, а $\tilde{X}$ – некоторое решение неоднородной СЛАУ $AX = B$, то столбец $X = X_0 + \tilde{X}$ будет решением неоднородной СЛАУ.

В пп. 10.3 и 10.4 рассматриваются вопросы о структуре общих решений X_o однородной СЛАУ и $X = X_o + \tilde{X}$ неоднородной СЛАУ.

10.3. Структура решений однородной СЛАУ

Теорема 2.11. Пусть ранг основной матрицы $A_{m \times n}$ однородной СЛАУ

[illegible]

равен k . Тогда:

1) если $k = n$ (ранг равен числу неизвестных), то СЛАУ имеет единственное нулевое решение;

2) если $k < n$, то СЛАУ имеет бесконечное множество решений.

Доказательство. Утверждение 1) теоремы доказано в п. 4.4. В этом случае СЛАУ (2.25) с помощью элементарных преобразований приводится к равносильной треугольной СЛАУ (1.52), имеющей только нулевое решение.

Во (случае 2) СЛАУ (2.25) приводится с помощью элементарных преобразований к равносильной форме со ступенчатой основной матрицей. Не умаляя общности, можем считать, что базисный минор $M_k \neq 0$ расположен в левом верхнем углу матрицы A :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1k}x_k + a_{1,k+1}x_{k+1} + \cdots + a_{1n}x_n = 0, \\ a_{22}^{(1)}x_2 + \cdots + a_{2k}^{(1)}x_k + a_{2,k+1}^{(1)}x_{k+1} + \cdots + a_{2n}^{(1)}x_n = 0, \\ \dots\dots\dots \\ a_{kk}^{(k-1)}x_k + a_{k,k+1}^{(k-1)}x_{k+1} + \cdots + a_{kn}^{(k-1)}x_n = 0. \end{array} \right. \quad (2.26)$$

Перепишем еще раз систему уравнений (2.26), оставив в левой части базисные переменные $x_1, x_2, \dots, x_k$ и перенеся в правую часть свободные (независимые) переменные $x_{k+1}, x_{k+2}, \dots, x_n$ вместе с коэффициентами при них. Для подчеркивания неза-

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_{11}c_1 + \beta_{12}c_2 + \cdots + \beta_{1,n-k}c_{n-k} \\ \beta_{21}c_1 + \beta_{22}c_2 + \cdots + \beta_{2,n-k}c_{n-k} \\ \vdots \\ \beta_{k1}c_1 + \beta_{k2}c_2 + \cdots + \beta_{k,n-k}c_{n-k} \end{pmatrix},$$

а решение СЛАУ (2.25):

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \\ x_{k+1} \\ x_{k+2} \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_{11}c_1 + \beta_{12}c_2 + \cdots + \beta_{1,n-k}c_{n-k} \\ \beta_{21}c_1 + \beta_{22}c_2 + \cdots + \beta_{2,n-k}c_{n-k} \\ \vdots \\ \beta_{k1}c_1 + \beta_{k2}c_2 + \cdots + \beta_{k,n-k}c_{n-k} \\ c_1 + 0 + \cdots + 0 \\ 0 + c_2 + \cdots + 0 \\ \vdots \\ 0 + 0 + \cdots + c_{n-k} \end{pmatrix},$$

ИЛИ

$$X = c_1 \begin{pmatrix} \beta_{11} \\ \beta_{21} \\ \vdots \\ \beta_{k1} \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} + c_2 \begin{pmatrix} \beta_{12} \\ \beta_{22} \\ \vdots \\ \beta_{k2} \\ 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} + \cdots + c_{n-k} \begin{pmatrix} \beta_{1,n-k} \\ \beta_{2,n-k} \\ \vdots \\ \beta_{k,n-k} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Обозначим $E_i = (\beta_{1i} \ \beta_{2i} \ \dots \ \beta_{ki} \ 0 \ 0 \ \dots \ 1 \ \dots \ 0)^T$. В итоге окончательная форма записи решения однородной СЛАУ (2.25) при условии, что $\text{rg } A = k < n$, будет иметь вид

$$X = c_1 E_1 + c_2 E_2 + \cdots + c_{n-k} E_{n-k}. \quad (2.28)$$

Каждый вектор E_i , $i = \overline{1, n-k}$, является решением СЛАУ (2.26), а значит и равносильной ей (2.25). Легко видеть, что n -мерные арифметические векторы $E_1, E_2, \dots, E_{n-k}$ линейно независимы (докажите самостоятельно).

Определение 2.14. Совокупность $(n - k)$ линейно независимых n -мерных арифметических векторов, являющихся решениями однородной СЛАУ $A_{m \times n}X = 0$, при условии, что $\text{rg } A = k$, $k < n$, называется *фундаментальной системой решений* (ФСР) этой СЛАУ.

Таким образом, векторы $E_1, E_2, \dots, E_{n-k}$ образуют фундаментальную систему решений СЛАУ (2.25), а любое решение

этой однородной СЛАУ получается как линейная комбинация векторов ФСР при некотором наборе чисел (значений свободных переменных) $c_1, c_2, \dots, c_{n-k}$.

Полученные результаты позволяют сформулировать следующую теорему.

Теорема 2.12. Любая однородная СЛАУ $AX = 0$, у которой ранг основной матрицы A меньше числа неизвестных, т. е. $\text{rg } A = k < n$, имеет фундаментальную систему решений, состоящую из $(n - k)$ векторов E_i , а общее решение X этой СЛАУ является линейной комбинацией (2.28) векторов ее ФСР.

Пример 2.6. Решить однородную СЛАУ

$$\begin{cases} x_1 - 2x_2 + x_3 + 2x_4 - x_5 = 0, \\ -2x_1 + 4x_2 + 3x_3 - x_4 + x_5 = 0, \\ x_1 - 2x_2 + 6x_3 + 5x_4 - 2x_5 = 0, \\ -x_1 + 2x_2 + 4x_3 + x_4 = 0, \\ -x_1 + 2x_2 + 9x_3 + 4x_4 - x_5 = 0. \end{cases}$$

Решение. 1. Приведем основную матрицу СЛАУ к ступенчатому виду:

$$\begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 & 2 & -1 \\ -2 & 4 & 3 & -1 & 1 \\ 1 & -2 & 6 & 5 & -2 \\ -1 & 2 & 4 & 1 & 0 \\ -1 & 2 & 9 & 4 & -1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \textcircled{2} \textcircled{-1} \textcircled{1} \\ \leftarrow \\ \leftarrow \\ \leftarrow \\ \leftarrow \end{matrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 5 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & 5 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & 5 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & 10 & 6 & -2 \end{pmatrix} \begin{matrix} \textcircled{-1} \textcircled{-2} \\ \leftarrow \\ \leftarrow \\ \leftarrow \\ \leftarrow \end{matrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 5 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Полученная ступенчатая матрица имеет две ненулевые строки, поэтому $\text{rg } A = 2$. Число различных вариантов базисных миноров здесь равно 9. Действительно, лишь минор $M_2^{(1)} = \begin{vmatrix} 1 & -2 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$, образованный первым и вторым столбцами, равен нулю. Остальные $C_2^2 C_5^2 - 1 = 9$ миноров отличны от нуля.

Теорема 2.13. Если:

- 1) $\operatorname{rg} \bar{A} \neq \operatorname{rg} A$, то СЛАУ (2.27) несовместна;
- 2) $\operatorname{rg} \bar{A} = \operatorname{rg} A = k$ и $k = n$, то СЛАУ имеет единственное решение;
- 3) $\operatorname{rg} \bar{A} = \operatorname{rg} A = k$ и $k < n$, то СЛАУ имеет бесконечное множество решений.

Теорема доказывается аналогично доказательству теоремы 2.9.

С позиций структуры решений неоднородной СЛАУ особый интерес представляет случай 3), а именно, когда $\operatorname{rg} \bar{A} = \operatorname{rg} A = k$ и $k < n$.

В п. 10.2 было доказано, что общее решение X неоднородной СЛАУ $AX = B$ состоит из общего решения X_0 , отвечающей ей однородной СЛАУ $AX = 0$ и некоторого частного решения $\tilde{X}$ неоднородной СЛАУ, т. е. $X = X_0 + \tilde{X}$.

Пример 2.7. Исследовать на совместность и в случае совместности найти общее решение СЛАУ

$$\begin{cases} x_1 + 3x_2 - 2x_3 - x_4 + x_5 = 2, \\ 2x_1 + 5x_2 - x_3 - 2x_4 + 3x_5 = 0, \\ x_1 + 2x_2 + x_3 - x_4 + 2x_5 = -2, \\ x_1 + x_2 + 4x_3 - x_4 + 3x_5 = -6. \end{cases}$$

Решение. Число уравнений в данной СЛАУ меньше числа неизвестных. Поэтому система уравнений может быть либо несовместной, если $\operatorname{rg} \bar{A} \neq \operatorname{rg} A$, либо совместной, но неопределенной.

1. Приведем расширенную матрицу СЛАУ к ступенчатому виду:

$$\left(\begin{array}{ccccc|c} 1 & 3 & -2 & -1 & 1 & 2 \\ 2 & 5 & -1 & -2 & 3 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & -1 & 2 & -2 \\ 1 & 1 & 4 & -1 & 3 & -6 \end{array} \right) \xrightarrow{\substack{\text{R}_2 - \text{R}_1, \\ \text{R}_3 - \text{R}_1, \\ \text{R}_4 - \text{R}_1}} \left(\begin{array}{ccccc|c} 1 & 3 & -2 & -1 & 1 & 2 \\ 0 & -1 & 3 & 0 & 1 & -4 \\ 0 & -1 & 3 & 0 & 1 & -4 \\ 0 & -2 & 6 & 0 & 2 & -8 \end{array} \right) \xrightarrow{\substack{\text{R}_3 - \text{R}_2, \\ \text{R}_4 - 2\text{R}_2}} \left(\begin{array}{ccccc|c} 1 & 3 & -2 & -1 & 1 & 2 \\ 0 & -1 & 3 & 0 & 1 & -4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right).$$

Имеем $\operatorname{rg} A = 2$ и $\operatorname{rg} \bar{A} = 2$. В соответствии с теоремой Кронекера–Капелли исходная СЛАУ совместна. Поскольку $n - k = 5 - 2 = 3$, то ФСР однородной СЛАУ, отвечающей данной неоднородной, будет состоять из 3 векторов.

2. Запишем СЛАУ, отвечающую последнему состоянию расширенной матрицы:

$$\begin{cases} x_1 + 3x_2 - 2x_3 - x_4 + x_5 = 2, \\ x_2 - 3x_3 - x_5 = 4. \end{cases}$$

Выберем в качестве базисных неизвестные x_1, x_2 , а остальные переменные x_3, x_4, x_5 объявим свободными, положив: $x_3 = c_1, x_4 = c_2, x_5 = c_3$.

Выразим базисные неизвестные через свободные:

$$\begin{cases} x_1 + 3x_2 = 2 + 2c_1 + c_2 - c_3, \\ x_2 = 4 + 3c_1 + c_3, \end{cases}$$

откуда находим:

$$x_2 = 4 + 3c_1 + c_3,$$

$$x_1 = 2 + 2c_1 + c_2 - c_3 - 3(4 + 3c_1 + c_3) = -10 - 7c_1 + c_2 - 4c_3.$$

Запишем решение в векторной форме:

$$\begin{aligned} X &= \begin{pmatrix} -10 - 7c_1 + c_2 - 4c_3 \\ 4 + 3c_1 + c_3 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} -10 \\ 4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + c_1 \begin{pmatrix} -7 \\ 3 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + c_2 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + c_3 \begin{pmatrix} -4 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \\ &= \tilde{X} + c_1 E_1 + c_2 E_2 + c_3 E_3 = \tilde{X} + X_o. \end{aligned}$$

В полученном решении вектор-столбец $\tilde{X}$ является частным решением исходной неоднородной СЛАУ (проверьте!), векторы-столбцы $E_1 = (-7 \ 3 \ 1 \ 0 \ 0)^T$, $E_2 = (1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0)^T$, $E_3 = (-4 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1)^T$ образуют ФСР соответствующей однородной СЛАУ, а вектор-столбец $X_o = c_1 E_1 + c_2 E_2 + c_3 E_3$ является общим решением этой однородной СЛАУ.

Ответ: $X = \tilde{X} + c_1 E_1 + c_2 E_2 + c_3 E_3$, где

$$\tilde{X} = (-10 \ 4 \ 0 \ 0 \ 0)^T, \quad E_1 = (-7 \ 3 \ 1 \ 0 \ 0)^T, \quad E_2 = (1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0)^T,$$

$$E_3 = (-4 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1)^T, \quad c_1, c_2, c_3 \in \mathbb{R}.$$

Пример 2.8. Исследовать на совместность и в случае совместности найти общее решение СЛАУ

$$\begin{cases} x_1 + 3x_2 - 2x_3 - x_4 + x_5 = 2, \\ 2x_1 + 5x_2 - x_3 - 2x_4 + 3x_5 = 0, \\ x_1 + 2x_2 + x_3 - x_4 + 2x_5 = -2, \\ x_1 + x_2 + 4x_3 - x_4 + 3x_5 = 0. \end{cases}$$

Решение. Преобразуем расширенную матрицу СЛАУ к ступенчатому виду:

$$\left(\begin{array}{ccccc|ccc} 1 & 3 & -2 & -1 & 1 & 2 & \textcircled{-2} & \textcircled{-1} \\ 2 & 5 & -1 & -2 & 3 & 0 & & \\ 1 & 2 & 1 & -1 & 2 & -2 & & \\ 1 & 1 & 4 & -1 & 3 & 0 & & \end{array} \right) \sim \left(\begin{array}{ccccc|ccc} 1 & 3 & -2 & -1 & 1 & 2 & \textcircled{-1} & \textcircled{-2} \\ 0 & -1 & 3 & 0 & 1 & -4 & & \\ 0 & -1 & 3 & 0 & 1 & -4 & & \\ 0 & -2 & 6 & 0 & 2 & -2 & & \end{array} \right) \sim \left(\begin{array}{ccccc|ccc} 1 & 3 & -2 & -1 & 1 & 2 & & \\ 0 & -1 & 3 & 0 & 1 & -4 & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & & \end{array} \right).$$

В преобразованной матрице A две ненулевые строки, поэтому $\text{rg } A = 2$, а в расширенной матрице $\bar{A}$ — три ненулевые строки и поэтому $\text{rg } \bar{A} = 3$. Поскольку $\text{rg } \bar{A} \neq \text{rg } A$, то в соответствии с теоремой Кронекера–Капелли исходная СЛАУ несовместна. ■

Комментарий к примерам 2.7 и 2.8. В расширенной матрице, отвечающей СЛАУ из примера 2.6, линейно независимы две строки. Две другие линейно выражаются через них: $\mathbf{a}_3 = -\mathbf{a}_2 + \mathbf{a}_2$; $\mathbf{a}_4 = -3\mathbf{a}_1 + 2\mathbf{a}_2$, где $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3, \mathbf{a}_4$ — 6-мерные арифметические векторы — строки расширенной матрицы. Как следствие, $\text{rg } \bar{A} = \text{rg } A = 2$, СЛАУ совместна и имеет бесконечно много решений.

Расширенная матрица $\bar{A}$ в примере 2.8 по сравнению с матрицей $\bar{A}$ из примера 2.7 изменилась *только в одном элементе* b_4 : было $b_4 = -6$, стало $b_4 = 0$. Это изменение приводит к тому, что число линейно независимых строк в основной матрице A по-прежнему равно 2 и по-прежнему $\mathbf{a}_3 = -\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2$, $\mathbf{a}_4 = -3\mathbf{a}_1 + 2\mathbf{a}_2$, но уже только для строк матрицы A , т. е. для 5-мерных векторов.

При этом $b_3 = -b_1 + b_2$ ($b_3 = -2 + 0 = -2$), а $b_4 \neq -3b_1 + 2b_2$ ($-3b_1 + 2b_2 = -3 \cdot 2 + 2 \cdot 0 = -6 \neq 0$). Именно по этой причине ранг расширенной матрицы $\bar{A}$ равен 3, что на 1 больше ранга основной матрицы A . В соответствии с теоремой Кронекера–Капелли СЛАУ несовместна.

Вопросы для самоконтроля к § 10

1. Сформулируйте теорему Кронекера–Капелли.
2. Если в неоднородной СЛАУ $\operatorname{rg} \bar{A} = \operatorname{rg} A = k$ и $k < m$, где m — число уравнений системы, то можно ли утверждать, что СЛАУ: а) совместная? б) определенная? в) неопределенная?
3. Если в неоднородной СЛАУ $\operatorname{rg} \bar{A} = \operatorname{rg} A = k$ и $k < n$, где n — число неизвестных, то можно ли утверждать, что СЛАУ: а) совместная? б) определенная?
4. Сформулируйте необходимые и достаточные условия совместности и определенности неоднородной СЛАУ через ранги и размеры основной и расширенной матриц СЛАУ.
5. Если в неоднородной СЛАУ $\operatorname{rg} \bar{A} = \operatorname{rg} A = k$ и $k < n$, где n — число неизвестных, то чему равны число базисных и число свободных переменных?
6. Дайте определение фундаментальной системы решений однородной СЛАУ.
7. Чему равно число векторов фундаментальной системы решений однородной СЛАУ?
8. Если известна фундаментальная система решений $E_1, E_2, \dots, E_k$ однородной СЛАУ, то какой вид будет иметь ее общее решение?
9. Какому условию должен удовлетворять ранг основной матрицы СЛАУ, чтобы она имела фундаментальную систему решений?
10. Известно, что неоднородная СЛАУ, состоящая из 10 уравнений относительно 7 неизвестных, содержит: а) 3, б) 5 уравнений, линейно выражающихся через остальные уравнения системы. Что можно сказать о совместности СЛАУ и числе ее решений в случаях а) и б)?

Упражнения

1. Дана система векторов:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_1 &= (3; -1; 4; -2); & \mathbf{a}_2 &= (-2; 1; 0; 3); \\ \mathbf{a}_3 &= (0; 4; -2; 5), & \mathbf{a}_4 &= (8; 9; 2; 8). \end{aligned}$$

Найдите линейные комбинации векторов:

$$\text{а) } -\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2 - \mathbf{a}_3 + \mathbf{a}_4; \quad \text{б) } 2\mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_2 + 3\mathbf{a}_3 - \mathbf{a}_4.$$

Выясните, являются ли системы векторов линейно зависимыми или линейно независимыми (2–8).

2. $\mathbf{a}_1 = (2; -1; 3)$, $\mathbf{a}_2 = (3; 0; -2)$.

$$\mathbf{3.} \quad \mathbf{a}_1 = (-3; 2; 4), \quad \mathbf{a}_2 = \left(-\frac{5}{4}; \frac{5}{6}; \frac{5}{3}\right).$$

$$\mathbf{4.} \quad \mathbf{a}_1 = (2; -4; 1), \quad \mathbf{a}_2 = (-1; 3; 2), \quad \mathbf{a}_3 = (0; -4; 5).$$

$$\mathbf{5.} \quad \mathbf{a}_1 = (2; -4; 1), \quad \mathbf{a}_2 = (-1; 3; 2), \quad \mathbf{a}_3 = (0; 2; 5).$$

$$\mathbf{6.} \quad \mathbf{a}_1 = (2; -4; 8), \quad \mathbf{a}_2 = (-1; 2; -4), \quad \mathbf{a}_3 = (5; -10; 20).$$

$$\mathbf{7.} \quad \mathbf{a}_1 = (1; 0; -2; 4), \quad \mathbf{a}_2 = (-2; 3; 4; 0), \quad \mathbf{a}_3 = (-1; 3; 2; 4),$$

$$\mathbf{a}_4 = (-1; 6; 2; 12).$$

$$\mathbf{8.} \quad \mathbf{a}_1 = (1; -1; 2; -2), \quad \mathbf{a}_2 = (0; 2; -3; 4), \quad \mathbf{a}_3 = (2; -1; 0; 3),$$

$$\mathbf{a}_4 = (3; 4; -2; 0).$$

Найдите ранги систем векторов (9–14).

$$\mathbf{9.} \quad \mathbf{a}_1 = (1; -3; 2), \quad \mathbf{a}_2 = (2; -1; 4).$$

$$\mathbf{10.} \quad \mathbf{a}_1 = (-3; 2; 12), \quad \mathbf{a}_2 = \left(-2; \frac{4}{3}; 8\right).$$

$$\mathbf{11.} \quad \mathbf{a}_1 = (1; 0; -2), \quad \mathbf{a}_2 = (2; -3; 1), \quad \mathbf{a}_3 = (0; -3; 5),$$

$$\mathbf{a}_4 = (-1; 6; -8).$$

$$\mathbf{12.} \quad \mathbf{a}_1 = (1; 0; -2), \quad \mathbf{a}_2 = (2; -3; 1), \quad \mathbf{a}_3 = (0; 4; 3),$$

$$\mathbf{a}_4 = (0; 5; 11).$$

$$\mathbf{13.} \quad \mathbf{a}_1 = (-3; 0; 0; 1; 4), \quad \mathbf{14.} \quad \mathbf{a}_1 = (1; -2; 3; -4; 5),$$

$$\mathbf{a}_2 = (2; 1; -1; 0; 1), \quad \mathbf{a}_2 = (3; 0; 2; 1; -1),$$

$$\mathbf{a}_3 = (-1; 1; -1; 1; 5), \quad \mathbf{a}_3 = (-1; 3; 0; -2; 2),$$

$$\mathbf{a}_4 = (0; 3; -3; 2; 11), \quad \mathbf{a}_4 = (3; 8; 1; 2; -3).$$

Выделите какую-нибудь базисную систему векторов и выразите через них остальные векторы системы (15, 16).

$$\mathbf{15.} \quad \mathbf{a}_1 = (1, -1, 2), \quad \mathbf{16.} \quad \mathbf{a}_1 = (2, -1, 3, 5),$$

$$\mathbf{a}_2 = (2, -3, 1), \quad \mathbf{a}_2 = (1, 0, -2, 4),$$

$$\mathbf{a}_3 = (0, -1, -3), \quad \mathbf{a}_3 = (0, -1, 3, 1),$$

$$\mathbf{a}_4 = (-1, 3, 4), \quad \mathbf{a}_4 = (0, 0, 4, -4).$$

17. Докажите, что векторы $\mathbf{e}_1 = (1; -2; 0)$, $\mathbf{e}_2 = (0; 1; -1)$, $\mathbf{e}_3 = (1; -1; 1)$ образуют базис в пространстве $\mathbb{R}^3$, и разложите вектор $\mathbf{x} = (1; 0; -4)$ по этому базису.

18. Докажите, что векторы $\mathbf{e}_1 = (1; -1; 0; 2)$, $\mathbf{e}_2 = (0; -1; 1; 1)$, $\mathbf{e}_3 = (1; 0; 0; -1)$, $\mathbf{e}_4 = (0; 0; 1; -1)$ образуют базис в пространстве $\mathbb{R}^4$, и разложите вектор $\mathbf{x} = (-1; 2; -3; 3)$ по этому базису.

Найдите ранги матриц двумя способами: с помощью элементарных преобразований и методом окаймляющих миноров (19–22).

$$\begin{array}{ll}
 19. \begin{pmatrix} 2 & -4 & 6 & -12 \\ 1 & -2 & 3 & -6 \\ 6 & -12 & 18 & -36 \end{pmatrix}. & 20. \begin{pmatrix} 1 & -2 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 2 & 3 \\ 1 & -3 & 1 & 5 \end{pmatrix}. \\
 21. \begin{pmatrix} 3 & 0 & -2 & 1 & -1 \\ -2 & 1 & 0 & -1 & 2 \\ 4 & -3 & 2 & 0 & 1 \\ 5 & -2 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}. & 22. \begin{pmatrix} 1 & -2 & 3 & -4 & 5 \\ -5 & 4 & -3 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 3 & -5 & 7 \\ -13 & 8 & -3 & -2 & 7 \\ 2 & -1 & 0 & 1 & -2 \end{pmatrix}.
 \end{array}$$

Системы линейных уравнений

Найдите фундаментальную систему решений и общее решение однородной СЛАУ (23–30).

$$\begin{array}{ll}
 23. \begin{cases} 2x_1 - x_2 + 3x_3 = 0, \\ 3x_1 - 2x_2 + 4x_3 = 0. \end{cases} & 24. \begin{cases} 3x_1 - 6x_2 + 12x_3 = 0, \\ x_1 - 2x_2 + 4x_3 = 0. \end{cases} \\
 25. \begin{cases} x_1 - 2x_2 + 4x_3 = 0, \\ 3x_1 - x_2 - x_3 = 0, \\ x_1 + 3x_2 - 9x_3 = 0. \end{cases} & 26. \begin{cases} x_1 - 2x_2 + 4x_3 = 0, \\ 3x_1 - x_2 - x_3 = 0, \\ x_1 + x_2 + 3x_3 = 0. \end{cases} \\
 27. \begin{cases} x_1 - 2x_2 + 3x_3 - 4x_4 = 0, \\ 2x_1 + x_2 - 2x_3 = 0, \\ x_1 + 3x_2 - 5x_3 + 4x_4 = 0, \\ 5x_2 - 8x_3 + 8x_4 = 0. \end{cases} \\
 28. \begin{cases} x_1 + 4x_2 - x_3 + 2x_4 = 0, \\ -x_1 + x_2 + 2x_3 - x_4 = 0, \\ 3x_1 - x_2 + 2x_4 = 0, \\ 2x_1 + 5x_2 + 3x_3 + 2x_4 = 0, \\ x_1 + 9x_2 + 3x_4 = 0. \end{cases} \\
 29. \begin{cases} x_1 + 2x_2 - x_3 + 2x_4 - x_5 = 0, \\ 2x_1 - x_2 + 2x_3 - x_4 + 2x_5 = 0, \\ -5x_2 + 4x_3 - 5x_4 + 4x_5 = 0. \end{cases} \\
 30. \begin{cases} x_1 - x_3 + x_5 = 0, \\ x_2 + x_4 = 0, \\ x_1 - x_2 + x_4 = 0, \\ x_3 + x_4 + x_5 = 0, \\ x_1 - x_4 - x_5 = 0. \end{cases}
 \end{array}$$

Исследуйте совместность и найдите решение неоднородной СЛАУ; выделите частное решение $\tilde{X}$ неоднородной СЛАУ и ФСР отвечающей ей однородной СЛАУ (31–37).

$$31. \begin{cases} x_1 - 2x_2 - x_3 = 3, \\ 3x_1 + x_2 + x_3 = 3, \\ x_1 + x_2 + 2x_3 = 3. \end{cases} \quad 32. \begin{cases} x_1 - 2x_2 + x_3 = 0, \\ 2x_1 - x_2 + x_3 = 2, \\ -2x_1 - 5x_2 + x_3 = -6. \end{cases}$$

$$33. \begin{cases} 3x_1 - x_2 + 4x_3 - x_4 = 5, \\ 2x_1 + x_3 - 2x_4 = 1, \\ x_1 + x_2 + 3x_3 - 4x_4 = 1, \\ 4x_1 - 4x_2 - 3x_3 + 7x_4 = 4. \end{cases}$$

$$34. \begin{cases} x_1 - 2x_2 + 3x_3 - x_4 = 0, \\ 2x_1 + x_2 + 4x_4 = 2, \\ 5x_2 - 6x_3 + 6x_4 = 1, \\ 3x_1 - x_2 + 3x_3 + 3x_4 = 2. \end{cases}$$

$$35. \begin{cases} x_1 - x_2 + 2x_3 + x_4 = 3, \\ 2x_1 - x_3 + 2x_4 = 3, \\ 2x_2 - 5x_3 = -3, \\ x_1 - 3x_2 + 7x_3 + x_4 = 6, \\ x_1 - x_2 + 3x_3 - x_4 = 0. \end{cases}$$

$$36. \begin{cases} x_1 - 3x_2 + 4x_3 - x_4 = 1, \\ -2x_1 + 6x_2 - 8x_3 + 2x_4 = -2. \end{cases}$$

$$37. \begin{cases} x_1 - x_3 + x_5 = 3, \\ x_2 + x_4 = 2, \\ 2x_1 - x_2 - 2x_3 - x_4 + 2x_5 = 0, \\ x_1 + x_2 - x_3 + x_4 + x_5 = 3. \end{cases}$$

Ответы

1. а) (3; 7; 0; 8); б) (0; 0; 0; 0). 2. Линейно независима.

3. Линейно зависима. 4. Линейно независима.

5. Линейно зависима. 6. Линейно зависима.

7. Линейно зависима. 8. Линейно независима. 9. 2. 10. 1.

11. 2. 12. 3. 13. 2. 14. 3.

15. $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ — базисная система; $\mathbf{a}_3 = -2\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2$, $\mathbf{a}_4 = 3\mathbf{a}_1 - 2\mathbf{a}_2$.

16. $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$ — базисная система векторов; $\mathbf{a}_4 = \mathbf{a}_1 - 2\mathbf{a}_2 - \mathbf{a}_3$.

17. $\mathbf{x} = 2\mathbf{e}_1 + 3\mathbf{e}_2 - \mathbf{e}_3$. 18. $\mathbf{x} = -3\mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2 + 2\mathbf{e}_3 - 4\mathbf{e}_4$. 19. 1.

20. 3. 21. 3. 22. 2. 23. $\mathbf{X} = c_1 \mathbf{E}_1$, $\mathbf{E}_1 = (-2 \ -1 \ 1)^\top$.

24. $\mathbf{X} = c_1 \mathbf{E}_1 + c_2 \mathbf{E}_2$, $\mathbf{E}_1 = (2 \ 1 \ 0)^\top$; $\mathbf{E}_2 = (-4 \ 0 \ 1)^\top$.

25. $\mathbf{X} = c_1 \mathbf{E}_1$, $\mathbf{E}_1 = (6 \ 13 \ 5)^\top$. 26. $\mathbf{X} = (0 \ 0 \ 0)^\top$.

27. $\mathbf{X} = c_1 \mathbf{E}_1 + c_2 \mathbf{E}_2$, $\mathbf{E}_1 = (1 \ 8 \ 5 \ 0)^\top$; $\mathbf{E}_2 = (4 \ -8 \ 0 \ 5)^\top$.

28. $X = c_1 E_1$, $E_1 = (-3 \ -1 \ 1 \ 4)^\top$.

29. $X = c_1 E_1 + c_2 E_2 + c_3 E_3$, $E_1 = (-3 \ 4 \ 5 \ 0 \ 0)^\top$;

$E_2 = (0 \ -1 \ 0 \ 1 \ 0)^\top$; $E_3 = (-3 \ 4 \ 0 \ 0 \ 5)^\top$.

30. $X = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^\top$. **31.** $X = (1 \ -2 \ 2)^\top$.

32. $X = \left(\frac{4}{3} - \frac{1}{3}c_1 \ \frac{2}{3} + \frac{1}{3}c_1 \ c_1 \right)^\top$, или $X = \tilde{X} + c_1 E$, где $\tilde{X} = \left(\frac{4}{3} \ \frac{2}{3} \ 0 \right)^\top$, $E = (-1 \ 1 \ 3)^\top$.

33. $X = \left(\frac{1}{10} + \frac{9}{10}c_1 \ -\frac{3}{2} + \frac{5}{2}c_1 \ \frac{4}{5} + \frac{1}{5}c_1 \ c_1 \right)^\top$, или $X = \tilde{X} + c_1 E$,

где $\tilde{X} = \left(\frac{1}{10} \ -\frac{3}{2} \ \frac{4}{5} \ 0 \right)^\top$, $E = (9 \ 25 \ 2 \ 10)^\top$.

34. СЛАУ несовместна, так как $\text{rg } \bar{A} \neq \text{rg } A$, ($\text{rg } A = 2$, $\text{rg } \bar{A} = 3$).

35. $X = \left(\frac{3}{2} + \frac{1}{2}c_1 - c_2 \ -\frac{3}{2} + \frac{5}{2}c_1 \ c_1 \ c_2 \right)^\top$, или

$X = \tilde{X} + c_1 E_1 + c_2 E_2$, где $\tilde{X} = \left(\frac{3}{2} \ -\frac{3}{2} \ 0 \ 0 \right)^\top$,

$E_1 = (1 \ 5 \ 2 \ 0)^\top$, $E_2 = (-1 \ 0 \ 0 \ 1)^\top$.

36. $X = (1 + 3c_1 - 4c_2 + c_3 \ c_1 \ c_2 \ c_3)^\top$, или

$X = \tilde{X} + c_1 E_1 + c_2 E_2 + c_3 E_3$, где $\tilde{X} = (1 \ 0 \ 0 \ 0)^\top$,

$E_1 = (3 \ 1 \ 0 \ 0)^\top$, $E_2 = (-4 \ 0 \ 1 \ 0)^\top$, $E_3 = (1 \ 0 \ 0 \ 1)^\top$.

37. $X = (1 + c_1 - c_3 \ 2 - c_2 \ c_1 \ c_2 \ c_3)^\top$, или

$X = \tilde{X} + c_1 E_1 + c_2 E_2 + c_3 E_3$, где $\tilde{X} = (1 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0)^\top$,

$E_1 = (3 \ 1 \ 0 \ 0)^\top$, $E_2 = (0 \ -1 \ 0 \ 1 \ 0)^\top$, $E_3 = (-1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)^\top$.

Глава 3

ВЕКТОРНАЯ АЛГЕБРА

§ 11. Скалярные и векторные величины

В физических и технических приложениях приходится оперировать величинами различного характера. Одни из них вполне определяются заданием их числового значения. Например, высказывание «температура воздуха равна плюс 15 градусов Цельсия» однозначно характеризует температуру окружающей среды в данный момент.

Определение 3.1. Величина, которая полностью определяется своим числовым значением, называется *скалярной величиной*, или просто *скаляром*.

Скалярными являются, например, следующие величины: масса и объем тела, площадь плоской фигуры, температура тела, давление газа в сосуде и т. п.

С другой стороны, такие величины, как скорость тела, сила тяготения, вектор напряженности электрического поля и т. п. характеризуются не только числовым значением (длиной вектора), но и направлением. Такие величины называются *векторными величинами* или просто *векторами* (вектор напряженности поля, вектор магнитной индукции и т. п.).

Определение 3.2. *Геометрическим вектором*, или просто *вектором*, называется направленный отрезок $\overline{AB}$ с начальной точкой A и конечной B (рис. 3.1). Обозначают вектор $\overline{AB}$ или $\mathbf{a}$.

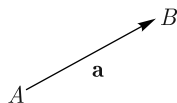


Рис. 3.1

Если начало A и конец B вектора $\mathbf{a} = \overline{AB}$ совпадают, то такой вектор называется *нулевым вектором* (вектором нулевой длины) и обозначается $\mathbf{0}$.

Числовой характеристикой вектора $\mathbf{a} = \overline{AB}$ является длина отрезка AB . Она называется *модулем*, или *длиной* этого вектора и обозначается $|\overline{AB}|$ или $|\mathbf{a}|$. Модуль нулевого

вектора равен нулю, а направление ему можно приписать произвольное с учетом условий решаемой задачи.

Определение 3.3. Два вектора называются *коллинеарными*, если они лежат на одной прямой или на параллельных прямых.

Если векторы $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ коллинеарны, то это обозначают следующим образом: $\mathbf{a} \parallel \mathbf{b}$. Если направления коллинеарных векторов совпадают, то они называются *сонаправленными* (обозначение $\mathbf{a} \uparrow \uparrow \mathbf{b}$), если же коллинеарные векторы имеют противоположные направления, то они называются *противоположно направленными* (обозначение $\mathbf{a} \uparrow \downarrow \mathbf{b}$). На рис. 3.2, *a* представлены сонаправленные векторы, а на рис. 3.2, *б* — противоположно направленные.

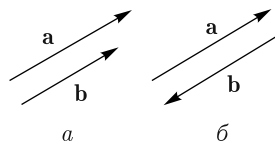


Рис. 3.2

Определение 3.4. Три или более векторов называются *компланарными*, если они лежат в одной плоскости или в параллельных плоскостях.

Определение 3.5. Два вектора называются *равными*, если:

- 1) они сонаправлены ($\mathbf{a} \uparrow \uparrow \mathbf{b}$);
- 2) их модули равны ($|\mathbf{a}| = |\mathbf{b}|$).

Таким образом,

$$\mathbf{a} = \mathbf{b} \Leftrightarrow \mathbf{a} \uparrow \uparrow \mathbf{b} \wedge |\mathbf{a}| = |\mathbf{b}|.$$

Из данного определения следует, что два или более сонаправленных векторов, имеющих равные модули, равны между собой, даже если их начала находятся в разных точках плоскости или пространства. Такие векторы называются *свободными*. Это означает, что каждый вектор $\mathbf{a}$ определяет бесконечное множество сонаправленных с ним векторов равной длины.

Всюду далее мы будем рассматривать только свободные векторы.

§ 12. Линейные операции над векторами

Из множества операций, выполняемых над векторами, к числу линейных относятся две операции:

- операция сложения векторов;
- операция умножения вектора на число.

Определение 3.6. Суммой $\mathbf{a} + \mathbf{b}$ двух векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ называется вектор $\mathbf{c}$, который можно построить либо по *правилу параллелограмма*, либо по *правилу треугольника*.

Правило параллелограмма:

- отложить векторы $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ от общего начала;
- построить на паре векторов $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ параллелограмм;
- построить вектор $\mathbf{c} = \mathbf{a} + \mathbf{b}$ как диагональ параллелограмма с началом в общей точке приложения векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ и концом в противоположной вершине параллелограмма (рис. 3.3, б).

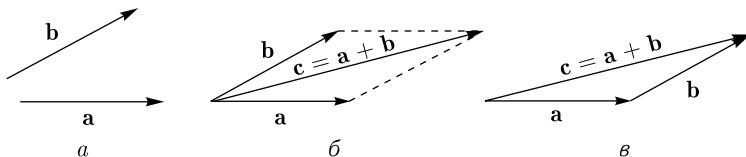


Рис. 3.3

Правило треугольника:

- совместить начало вектора $\mathbf{b}$ с концом вектора $\mathbf{a}$;
- соединить начало вектора $\mathbf{a}$ с концом вектора $\mathbf{b}$; это и будет искомый вектор $\mathbf{c} = \mathbf{a} + \mathbf{b}$ (рис. 3.3, в)

Из сопоставления правил параллелограмма и треугольника а также из рис. 3.3, б, в видно, что оба правила определяют один и тот же вектор $\mathbf{c}$, т. е. эти правила эквивалентны.

Операция сложения геометрических векторов удовлетворяет таким же четырем свойствам, что и операция сложения арифметических векторов.

1. Свойство коммутативности:

$$\mathbf{a} + \mathbf{b} = \mathbf{b} + \mathbf{a}.$$

2. Свойство ассоциативности:

$$(\mathbf{a} + \mathbf{b}) + \mathbf{c} = \mathbf{a} + (\mathbf{b} + \mathbf{c}).$$

3. Существование нулевого элемента (нулевого вектора):

$$\forall \mathbf{a}: \mathbf{a} + \mathbf{0} = \mathbf{a}.$$

4. Существование противоположного элемента (вектора):

$$\forall \mathbf{a} \exists \mathbf{b}: \mathbf{a} + \mathbf{b} = \mathbf{0}.$$

Свойство коммутативности следует естественным образом из правила параллелограмма. Докажите самостоятельно коммутативность сложения векторов с помощью правила треугольника.

Свойство ассоциативности легко доказывается с помощью правила треугольника (рис. 3.4). Поместим начало вектора $\mathbf{b}$ в конец вектора $\mathbf{a}$, а начало вектора $\mathbf{c}$ — в конец вектора $\mathbf{b}$.

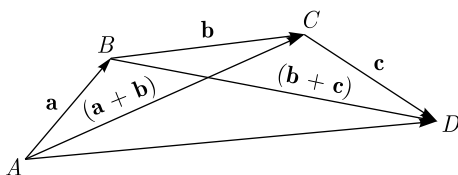


Рис. 3.4

Складывая векторы $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ по правилу треугольника и прибавляя к полученному вектору $\overline{AC} = \mathbf{a} + \mathbf{b}$ вектор $\overline{CD} = \mathbf{c}$, получаем вектор

$$\overline{AD} = \overline{AC} + \overline{CD} = (\mathbf{a} + \mathbf{b}) + \mathbf{c}. \quad (3.1)$$

Если же сначала найдем сумму векторов $\mathbf{b} + \mathbf{c} = \overline{BD}$, а затем сложим вектор $\mathbf{a}$ с вектором $\overline{BD}$, то вновь получим вектор $\overline{AD}$:

$$\overline{AD} = \overline{AB} + \overline{BD} = \mathbf{a} + (\mathbf{b} + \mathbf{c}). \quad (3.2)$$

Из равенств (3.1) и (3.2) следует доказываемое утверждение:

$$(\mathbf{a} + \mathbf{b}) + \mathbf{c} = \mathbf{a} + (\mathbf{b} + \mathbf{c}).$$

То, что нулевой вектор является искомым нулевым элементом, очевидно. Действительно, поскольку нулевой вектор коллинеарен любому вектору, в том числе и вектору $\mathbf{a}$, и при этом имеет нулевую длину, то в соответствии с правилом треугольника: $\mathbf{a} + \mathbf{0} = \mathbf{a}$ для любого вектора $\mathbf{a}$.

Справедливость свойства 4 следует из того, что вектор $\mathbf{b} = (-\mathbf{a})$ имеет равную с вектором $\mathbf{a}$ длину, но противоположное направление, и потому по правилу треугольника $\mathbf{a} + (-\mathbf{a}) = \mathbf{0}$. Вектор $(-\mathbf{a})$ называется *противоположным* вектору $\mathbf{a}$.

Прием, использованный при доказательстве свойства ассоциативности суммы трех векторов, подсказывает способ нахождения суммы произвольного числа m геометрических векторов $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m$. Соответствующее правило нахождения суммы векторов $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m$ называется *правилом многоугольника* и является обобщением правила треугольника.

В соответствии с правилом многоугольника необходимо построить первый вектор $\mathbf{a}_1$, поместить начало вектора $\mathbf{a}_2$ в конец $\mathbf{a}_1$, начало вектора $\mathbf{a}_3$ в конец вектора $\mathbf{a}_2$ и т. д., т. е. начало каждого последующего вектора помещается в конец предыдущего.

Соединив начало первого вектора $\mathbf{a}_1$ с концом последнего $\mathbf{a}_m$, получим искомый вектор

$$\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2 + \dots + \mathbf{a}_m \quad (\text{рис. 3.5}).$$

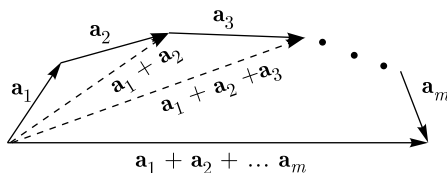


Рис. 3.5

Справедливость правила многоугольника доказывается последовательным, $(m - 1)$ -кратным, применением правила треугольников. Сначала находим сумму $\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2$; затем, складывая этот вектор с вектором $\mathbf{a}_3$, получаем вектор $(\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2) + \mathbf{a}_3 = \mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2 + \mathbf{a}_3$ (рис. 3.5) и т. д.

Определение 3.7. Разностью $(\mathbf{a} - \mathbf{b})$ векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ называется вектор $\mathbf{c}$ такой, что $\mathbf{b} + \mathbf{c} = \mathbf{a}$.

Утверждение. Для любых векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ разность $\mathbf{c} = \mathbf{a} - \mathbf{b}$ существует и единственна.

Доказательство. Условию $\mathbf{b} + \mathbf{c} = \mathbf{a}$ удовлетворяет вектор $\mathbf{c} = \mathbf{a} + (-\mathbf{b})$. Действительно,

$$\mathbf{b} + (\mathbf{a} + (-\mathbf{b})) = \mathbf{b} + ((-\mathbf{b}) + \mathbf{a}) = (\mathbf{b} + (-\mathbf{b})) + \mathbf{a} = \mathbf{0} + \mathbf{a} = \mathbf{a}.$$

Здесь последовательно были использованы свойства коммутативности (на первом шаге) и ассоциативности (на втором шаге), а также свойства 3 и 4 сложения векторов.

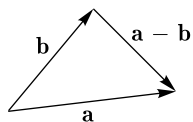


Рис. 3.6

Докажем единственность вектора $\mathbf{c}$. Пусть два вектора $\mathbf{c}_1$ и $\mathbf{c}_2$ удовлетворяют условиям $\mathbf{b} + \mathbf{c}_1 = \mathbf{a}$, $\mathbf{b} + \mathbf{c}_2 = \mathbf{a}$. Тогда $\mathbf{b} + \mathbf{c}_1 = \mathbf{b} + \mathbf{c}_2$. Прибавим вектор $(-\mathbf{b})$ к обеим частям этого равенства:

$$\begin{aligned} -\mathbf{b} + (\mathbf{b} + \mathbf{c}_1) &= -\mathbf{b} + (\mathbf{b} + \mathbf{c}_2) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow (-\mathbf{b} + \mathbf{b}) + \mathbf{c}_1 &= (-\mathbf{b} + \mathbf{b}) + \mathbf{c}_2 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \mathbf{0} + \mathbf{c}_1 &= \mathbf{0} + \mathbf{c}_2 \Leftrightarrow \mathbf{c}_1 = \mathbf{c}_2. \blacksquare \end{aligned}$$

Для построения вектора $(\mathbf{a} - \mathbf{b})$ следует отложить от общего начала векторы $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$, соединить отрезком концы векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ (рис. 3.6). Вектор $\mathbf{c}$ с началом в конце вектора $\mathbf{b}$ и концом, совпадающим с концом вектора $\mathbf{a}$, будет искомым вектором $(\mathbf{a} - \mathbf{b})$.

Определение 3.8. Произведением вектора $\mathbf{a}$ на действительное число λ называется вектор $\mathbf{b} = \lambda \mathbf{a}$ такой, что:

1) $|\mathbf{b}| = |\lambda| \cdot |\mathbf{a}|$,

2) $\mathbf{b} \uparrow \uparrow \mathbf{a}$, если $\lambda > 0$; $\mathbf{b} \uparrow \downarrow \mathbf{a}$, если $\lambda < 0$.

Из данного определения следует, что вектор $\mathbf{a}$ и получаемый из него умножением на число $\lambda \in \mathbb{R}$ вектор $\lambda \mathbf{a}$ коллинеарны, причем они *сонаправлены*, если $\lambda > 0$ (рис. 3.7, а) и *противоположно направлены*, если $\lambda < 0$ (рис. 3.7, б).

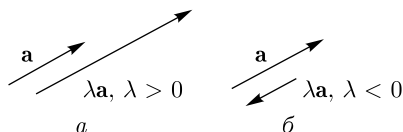


Рис. 3.7

Замечание. Произведение произвольного вектора $\mathbf{a}$ на нуль ($\lambda = 0$) является нулевым вектором, т. е. $0 \cdot \mathbf{a} = \mathbf{0}$.

Операция умножения вектора на действительное число удовлетворяет следующим свойствам:

1. $1 \cdot \mathbf{a} = \mathbf{a}$;

2. $(\alpha\beta)\mathbf{a} = \alpha(\beta\mathbf{a})$;

3. $\alpha(\mathbf{a} + \mathbf{b}) = \alpha\mathbf{a} + \alpha\mathbf{b}$;

4. $(\alpha + \beta)\mathbf{a} = \alpha\mathbf{a} + \beta\mathbf{a}$.

Второе свойство называется свойством ассоциативности, а третье и четвертое — свойствами дистрибутивности относительно суммы векторов и суммы чисел соответственно.

Доказательство свойства 3 (для примера: в случае, когда $\alpha > 0$, а векторы $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ неколлинеарны). Операции сложения векторов $(\mathbf{a} + \mathbf{b})$ и $\alpha\mathbf{a} + \alpha\mathbf{b}$ будем выполнять по правилу треугольника (рис. 3.8).

Треугольники OAB и $OA'B'$ подобны (по двум сторонам и углу между ними) с коэффициентом подобия α , $\alpha > 0$. Из подобия треугольников следует

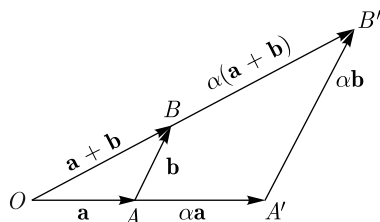


Рис. 3.8

$$\overrightarrow{OB'} = \alpha \overrightarrow{OB} = \alpha(\overrightarrow{OA} + \overrightarrow{AB}) = \alpha(\mathbf{a} + \mathbf{b}).$$

С другой стороны: $\overline{OB'} = \overline{OA'} + \overline{A'B'}$, но

$$\overline{OA'} = \alpha \overline{OA} = \alpha \mathbf{a}, \quad \overline{A'B'} = \alpha \overline{AB} = \alpha \mathbf{b}$$

и потому $\overline{OB'} = \alpha \mathbf{a} + \alpha \mathbf{b}$. Таким образом,

$$\overline{OB'} = \alpha(\mathbf{a} + \mathbf{b}) = \alpha \mathbf{a} + \alpha \mathbf{b}. \quad \blacksquare$$

Справедливость свойства 3 в случае $\alpha = 0$ очевидна, а в случае $\alpha < 0$ доказывается аналогично приведенному доказательству для $\alpha > 0$.

В векторной алгебре важную роль играют *единичные векторы*, т. е. векторы, имеющие длину, равную единице.

Определение 3.9. Вектор $\mathbf{a}^0$, сонаправленный с данным вектором $\mathbf{a}$ ($\mathbf{a} \neq \mathbf{0}$) и имеющий длину 1, называется *единичным вектором*, или *ортом* вектора $\mathbf{a}$.

Таким образом,

$$\mathbf{a}^0 - \text{орт вектора } \mathbf{a} \Leftrightarrow \mathbf{a}^0 \uparrow \mathbf{a} \wedge |\mathbf{a}^0| = 1.$$

Справедливо следующее

Утверждение.

$$\boxed{\mathbf{a}^0 = \frac{1}{|\mathbf{a}|} \mathbf{a}}. \quad (3.3)$$

Доказательство. Пусть наряду с вектором $\mathbf{a}$ задан единичный отрезок CD , определяющий единицу длины (рис. 3.9).

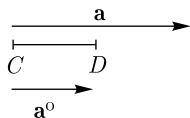


Рис. 3.9

В соответствии с определением орта $\mathbf{a}^0 \uparrow \mathbf{a}$. Это означает, что существует число $\lambda > 0$ такое, что $\mathbf{a}^0 = \lambda \mathbf{a}$. Поскольку $|\mathbf{a}^0| = 1$, то

$$1 = |\lambda| \cdot |\mathbf{a}| = \lambda \cdot |\mathbf{a}|, \text{ откуда } \lambda = \frac{1}{|\mathbf{a}|} \text{ и оконча-}$$

$$\text{тельно } \mathbf{a}^0 = \frac{1}{|\mathbf{a}|} \mathbf{a}. \quad \blacksquare$$

Таким образом, операции сложения векторов и умножения вектора на число обладают следующими свойствами.

1. $\mathbf{a} + \mathbf{b} = \mathbf{b} + \mathbf{a}$.
2. $(\mathbf{a} + \mathbf{b}) + \mathbf{c} = \mathbf{a} + (\mathbf{b} + \mathbf{c})$.
3. $\mathbf{a} + \mathbf{0} = \mathbf{a}$.
4. $\mathbf{a} + (-\mathbf{a}) = \mathbf{0}$.
5. $1 \cdot \mathbf{a} = \mathbf{a}$.
6. $(\alpha\beta)\mathbf{a} = \alpha(\beta\mathbf{a})$.
7. $\alpha(\mathbf{a} + \mathbf{b}) = \alpha\mathbf{a} + \alpha\mathbf{b}$.
8. $(\alpha + \beta)\mathbf{a} = \alpha\mathbf{a} + \beta\mathbf{a}$.

Определение 3.10. Множество всех геометрических векторов с введенными операциями сложения векторов и умножения вектора на число, для которых выполняются правила 1–8, называется *линейным векторным пространством* и обозначается $\mathbb{V}$.

Основные линейные векторные пространства:

$\mathbb{V}^1$ — множество всех векторов на прямой;

$\mathbb{V}^2$ — множество всех векторов на плоскости;

$\mathbb{V}^3$ — множество всех векторов трехмерного пространства.

Геометрия линейных векторных пространств рассматривается в следующих параграфах (§ 13, 14).

Отметим, что не любое подмножество пространства $\mathbb{V}^2$ образует линейное векторное пространство. Например, множество всех векторов G , лежащих на пересекающихся прямых L_1 и L_2 , не будет линейным векторным пространством. Действительно, хотя $\alpha \mathbf{a} \in G \ \forall \mathbf{a} \in G$ и $\forall \alpha \in \mathbb{R}$, но $\mathbf{a} + \mathbf{b} \notin G$, если $\mathbf{a}, \mathbf{b} \in G$ и $\mathbf{a} \neq \mathbf{0}$, $\mathbf{b} \neq \mathbf{0}$.

Аналогичная ситуация имеет место для множества векторов, лежащих в двух пересекающихся плоскостях P_1 и P_2 .

Вопросы для самоконтроля к § 11–12

1. Какие величины называются скалярными и какие векторными?

2. Какие векторы называются коллинеарными и какие компланарными?

3. Сформулируйте определение равенства двух векторов.

4. Сформулируйте определения суммы двух векторов и произведения вектора на число.

5. Запишите свойства линейных операций над векторами.

6. Сформулируйте определение орта $\mathbf{a}^\circ$ ненулевого вектора $\mathbf{a}$. Как найти орт по заданному вектору $\mathbf{a}$?

7. Приведите примеры множеств геометрических векторов со стандартными линейными операциями, образующих линейное векторное пространство, и множеств, не являющихся линейными векторными пространствами.

§ 13. Линейная зависимость и независимость векторов

Определения и основные свойства линейно зависимых и независимых геометрических векторов совпадают с соответствующими определениями и свойствами для арифметических векторов (§ 12, 13). Более того, ниже будет показано, что, при фиксировании некоторой максимальной линейно независимой системы

геометрических векторов данного векторного пространства $\mathbb{V}$, все остальные векторы пространства $\mathbb{V}$ можно однозначно представить в виде линейной комбинации векторов этой системы. Это, в свою очередь, приводит к установлению взаимно однозначного соответствия между геометрическими и арифметическими векторами и к возможности выполнения линейных операций над геометрическими векторами в форме линейных операций над арифметическими векторами (координатами геометрических векторов в данном базисе).

Пусть $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m$ — произвольная система геометрических векторов линейного пространства $\mathbb{V}$; $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ — произвольные действительные числа.

Определение 3.11. Вектор

$$\mathbf{b} = \alpha_1 \mathbf{a}_1 + \alpha_2 \mathbf{a}_2 + \dots + \alpha_m \mathbf{a}_m$$

называется *линейной комбинацией векторов* $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m$.

Определение 3.12. Система векторов $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m$ называется *линейно зависимой*, если существуют числа $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$, не равные нулю одновременно и такие, что

$$\alpha_1 \mathbf{a}_1 + \alpha_2 \mathbf{a}_2 + \dots + \alpha_m \mathbf{a}_m = \mathbf{0}.$$

Если же это равенство возможно только при $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_m = 0$, то названная система векторов называется *линейно независимой*.

Данное определение повторяет дословно определение 2.4 линейной зависимости (независимости) арифметических векторов. Почти дословно формулируются и аналогично доказываются аналогии теорем 2.1–2.3.

Приведем формулировки этих теорем.

Теорема 3.1. Если в системе геометрических векторов $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m$ хотя бы один вектор нулевой, то вся система линейно зависима.

Теорема 3.2. Если в системе векторов $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m$ содержится подсистема k ($k < m$) линейно зависимых векторов, то и вся система векторов линейно зависима.

Теорема 3.3. Система векторов $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_m$ линейно зависима тогда и только тогда, когда хотя бы один из системы векторов является линейной комбинацией остальных векторов этой системы.

Теорема 3.3 позволяет получить условия линейной зависимости векторов в пространствах $\mathbb{V}^1, \mathbb{V}^2, \mathbb{V}^3$.

Следствие 1. Любые два вектора пространства $\mathbb{V}^1$ линейно зависимы, или, иначе, любые два коллинеарных вектора линейно зависимы.

Доказательство. Если хотя бы один из двух векторов нулевой, то они линейно зависимы согласно теореме 3.1.

Если же $\mathbf{a} \neq \mathbf{0}$ и $\mathbf{b} \neq \mathbf{0}$, то векторы $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ коллинеарны. Обозначим $\lambda = \frac{|\mathbf{b}|}{|\mathbf{a}|}$. Тогда $\mathbf{b} = \lambda\mathbf{a}$, если $\mathbf{a} \uparrow\uparrow \mathbf{b}$; в противном случае ($\mathbf{a} \uparrow\downarrow \mathbf{b}$) имеем $\mathbf{b} = -\lambda\mathbf{a}$, а это, согласно теореме 3.3, означает линейную зависимость векторов $\mathbf{a}, \mathbf{b} \in \mathbb{V}^1$. ■

Верно и обратное **утверждение**: если два вектора линейно зависимы, то они коллинеарны.

Доказательство этого утверждения следует непосредственно из определений линейной зависимости векторов и произведения векторов на число.

Следствие 1 вместе с обратным утверждением можно и целесообразно переформулировать в виде следующей теоремы.

Теорема 3.4. Два ненулевых вектора $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ коллинеарны тогда и только тогда, когда существует действительное число λ такое, что $\mathbf{b} = \lambda\mathbf{a}$, т. е.

$$\boxed{\mathbf{b} \parallel \mathbf{a} \Leftrightarrow \exists \lambda \in \mathbb{R} : \mathbf{b} = \lambda\mathbf{a}}. \quad (3.4)$$

Это утверждение находит применение в многочисленных приложениях векторной алгебры.

Следствие 2 (из теоремы 3.3). Любые три вектора на плоскости (в пространстве $\mathbb{V}^2$) линейно зависимы. Иначе, любые три компланарных вектора линейно зависимы.

Доказательство. Если хотя бы один из трех векторов $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ нулевой, то в соответствии с теоремой 3.1 они линейно зависимы.

Если же все три вектора ненулевые, но два из них коллинеарны и, как следствие, линейно зависимы, то согласно следствию 1 и теореме 3.2 система векторов $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ вновь линейно зависима.

Рассмотрим теперь случай, когда все векторы ненулевые и среди них нет коллинеарных. Приведем векторы $\mathbf{a} = \overrightarrow{OA}$, $\mathbf{b} = \overrightarrow{OB}$ и $\mathbf{c} = \overrightarrow{OC}$ к общему началу — точке O плоскости. Проведем через точку C прямые, параллельные векторам $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$, а через точку O — прямые OC_a и OC_b . Получим параллелограмм OC_bCC_a (рис. 3.10). Тогда

$$\mathbf{c} = \overrightarrow{OC} = \overrightarrow{OC_a} + \overrightarrow{OC_b}.$$

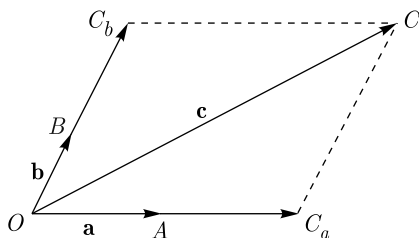


Рис. 3.10

Вектор $\overrightarrow{OC_a} \uparrow \mathbf{a}$, поэтому согласно формуле (3.4) $\exists x \in \mathbb{R} : \overrightarrow{OC_a} = x\mathbf{a}$. Аналогично:

$$\overrightarrow{OC_b} \uparrow \mathbf{b} \Leftrightarrow \exists y \in \mathbb{R} : \overrightarrow{OC_b} = y\mathbf{b}.$$

В итоге имеем $\mathbf{c} = x\mathbf{a} + y\mathbf{b}$. Последнее равенство означает, что вектор $\mathbf{c}$ является линейной комбинацией векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$. В соответствии с теоремой 3.3 векторы $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{c}$ линейно зависимы. ■

Нетрудно показать, что справедливо и обратное **утверждение**: *если три вектора линейно зависимы, то они компланарны*.

Следствие 2 и обратное к нему утверждение позволяют сформулировать следующую теорему.

Теорема 3.5. *Три вектора линейно зависимы тогда и только тогда, когда они компланарны.*

Следствие 3 (из теоремы 3.3). *Любые четыре вектора пространства $\mathbb{V}^3$ линейно зависимы.*

Доказательство данного следствия проводится аналогично приведенному выше доказательству следствия 2. Предлагаем читателю осуществить его самостоятельно.

§ 14. Базис векторного пространства

Определение 3.13. Максимальная линейно независимая система векторов $\langle \mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_k \rangle$, $\mathbf{e}_i \in \mathbb{V}^k$, $i = \overline{1, k}$, $k \in \{1, 2, 3\}$, называется *базисом* пространства $\mathbb{V}^k$.

Базис в пространстве $\mathbb{V}^k$ геометрических векторов играет такую же роль, как и базис в арифметическом пространстве $\mathbb{R}^n$: любой вектор $\mathbf{a} \in \mathbb{V}^k$ единственным образом может быть разложен по базису $\langle \mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_k \rangle$:

$$\mathbf{a} = \lambda_1 \mathbf{e}_1 + \lambda_2 \mathbf{e}_2 + \dots + \lambda_k \mathbf{e}_k. \quad (3.5)$$

Справедливы следующие теоремы.

Теорема 3.6. Любой ненулевой вектор $\mathbf{a} \in \mathbb{V}^1$ образует базис $\langle \mathbf{e}_1 = \mathbf{a} \rangle$ в пространстве $\mathbb{V}^1$.

Теорема 3.7. Любые два неколлинеарных вектора $\mathbf{a}, \mathbf{b} \in \mathbb{V}^2$ образуют базис $\langle \mathbf{e}_1 = \mathbf{a}, \mathbf{e}_2 = \mathbf{b} \rangle$ в пространстве $\mathbb{V}^2$.

Теорема 3.8. Любые три некомпланарных вектора $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c} \in \mathbb{V}^3$ образуют базис $\langle \mathbf{e}_1 = \mathbf{a}, \mathbf{e}_2 = \mathbf{b}, \mathbf{e}_3 = \mathbf{c} \rangle$ в пространстве $\mathbb{V}^3$.

Доказательство (для примера) теоремы 3.7. Во-первых, отметим, что упорядоченная пара $\mathbf{e}_1 = \mathbf{a}, \mathbf{e}_2 = \mathbf{b}$ неколлинеарных векторов на плоскости линейно независима: в противном случае ($\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ линейно зависимы) согласно теореме 3.4 они были бы коллинеарны.

Докажем теперь, что любой вектор $\mathbf{c} \in \mathbb{V}^2$ может быть разложен по векторам $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ и что это разложение единственно. Тройка векторов $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{c}$ пространства $\mathbb{V}^2$ согласно следствию 2 из теоремы 3.3 линейно зависима, т. е. существуют числа $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ такие, что хотя бы одно из них отлично от нуля и

$$\alpha_1 \mathbf{c} + \alpha_2 \mathbf{e}_1 + \alpha_3 \mathbf{e}_2 = \mathbf{0}. \quad (3.6)$$

В (3.6) $\alpha_1 \neq 0$. Действительно, в противном случае мы получили бы равенство

$$\alpha_2 \mathbf{e}_1 + \alpha_3 \mathbf{e}_2 = \mathbf{0} \quad (\alpha_2^2 + \alpha_3^2 \neq 0),$$

из которого следовало бы, что векторы $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ линейно зависимы. Но это противоречит условию теоремы: векторы $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ неколлинеарны.

Разделим обе части равенства (3.6) на $\alpha_1 \neq 0$ и преобразуем его к виду

$$\mathbf{c} = \left(-\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \right) \mathbf{e}_1 + \left(-\frac{\alpha_3}{\alpha_1} \right) \mathbf{e}_2.$$

Введем обозначения $-\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \lambda_1, -\frac{\alpha_3}{\alpha_1} = \lambda_2$. В итоге получим линейную комбинацию

$$\mathbf{c} = \lambda_1 \mathbf{e}_1 + \lambda_2 \mathbf{e}_2, \quad (3.7)$$

которая называется *разложением вектора $\mathbf{c}$ по базису $\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2 \rangle$* , а коэффициенты разложения λ_1, λ_2 — *координатами вектора $\mathbf{a}$ в этом базисе*.

Докажем теперь, что разложение вектора $\mathbf{c}$ по базису $\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2 \rangle$ определяется однозначно. Допустим, что существует еще одно, отличное от (3.7), разложение вектора $\mathbf{c}$ по базису $\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2 \rangle$:

$$\mathbf{c} = \beta_1 \mathbf{e}_1 + \beta_2 \mathbf{e}_2,$$

причем $\beta_1 \neq \alpha_1$ или (и) $\beta_2 \neq \alpha_2$.

Вычитая из равенства (3.7) последнее равенство, получаем

$$\mathbf{0} = \mathbf{c} - \mathbf{c} = (\alpha_1 - \beta_1)\mathbf{e}_1 + (\alpha_2 - \beta_2)\mathbf{e}_2,$$

откуда, ввиду линейной независимости векторов $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$, следует, что $\alpha_1 - \beta_1 = 0$, $\alpha_2 - \beta_2 = 0$, т. е. $\beta_1 = \alpha_1$ и $\beta_2 = \alpha_2$. ■

§ 15. Координаты вектора в базисе

Определение 3.14. Координаты $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ разложения (3.5) вектора $\mathbf{a} \in \mathbb{V}^k$ по базису $\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_k \rangle$ пространства $\mathbb{V}^k$ называются *координатами вектора $\mathbf{a}$ в этом базисе*.

В частности, при:

$k = 1$ ($\mathbf{a} \in \mathbb{V}^1$): $\mathbf{a} = \lambda \mathbf{e}$, λ — координата вектора $\mathbf{a}$ в базисе $\langle \mathbf{e} \rangle$ пространства $\mathbb{V}^1$;

$k = 2$ ($\mathbf{a} \in \mathbb{V}^2$): $\mathbf{a} = \lambda_1 \mathbf{e}_1 + \lambda_2 \mathbf{e}_2$, $(\lambda_1; \lambda_2)$ — координаты вектора $\mathbf{a}$ в базисе $\langle \mathbf{e}_1; \mathbf{e}_2 \rangle$ пространства $\mathbb{V}^2$;

$k = 3$ ($\mathbf{a} \in \mathbb{V}^3$): $\mathbf{a} = \lambda_1 \mathbf{e}_1 + \lambda_2 \mathbf{e}_2 + \lambda_3 \mathbf{e}_3$, $(\lambda_1; \lambda_2; \lambda_3)$ — координаты вектора $\mathbf{a}$ в базисе $\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3 \rangle$ пространства $\mathbb{V}^3$.

Из единственности разложения вектора по заданному базису следует, что два вектора $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ в пространстве $\mathbb{V}^k$, заданные своими координатами $\mathbf{a} = (\alpha_1; \alpha_2; \dots; \alpha_k)$, $\mathbf{b} = (\beta_1; \beta_2; \dots; \beta_k)$, равны тогда и только тогда, когда $\alpha_1 = \beta_1, \alpha_2 = \beta_2, \dots, \alpha_k = \beta_k$, т. е.

$$\mathbf{a} = \mathbf{b} \Leftrightarrow \forall i \ (i = \overline{1, k}) \quad \alpha_i = \beta_i.$$

Из определения и свойств линейных операций над векторами выводятся следующие правила действий с векторами, заданными своими координатами в фиксированном базисе. Ограничимся для простоты пространством $\mathbb{V}^3$. Пусть

$$\mathbf{a} = \alpha_1 \mathbf{e}_1 + \alpha_2 \mathbf{e}_2 + \alpha_3 \mathbf{e}_3,$$

$$\mathbf{b} = \beta_1 \mathbf{e}_1 + \beta_2 \mathbf{e}_2 + \beta_3 \mathbf{e}_3$$

— разложения векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ по базису $\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3 \rangle$, т. е. $\mathbf{a} = (\alpha_1; \alpha_2; \alpha_3)$; $\mathbf{b} = (\beta_1; \beta_2; \beta_3)$.

Утверждение 1. При сложении двух векторов их координаты (в одном и том же базисе) складываются, т. е.

$$\mathbf{a} + \mathbf{b} = (\alpha_1 + \beta_1; \alpha_2 + \beta_2; \alpha_3 + \beta_3). \quad (3.8)$$

Доказательство.

$$\begin{aligned} \mathbf{a} + \mathbf{b} &= (\alpha_1 \mathbf{e}_1 + \alpha_2 \mathbf{e}_2 + \alpha_3 \mathbf{e}_3) + (\beta_1 \mathbf{e}_1 + \beta_2 \mathbf{e}_2 + \beta_3 \mathbf{e}_3) = \\ &= (\alpha_1 \mathbf{e}_1 + \beta_1 \mathbf{e}_1) + (\alpha_2 \mathbf{e}_2 + \beta_2 \mathbf{e}_2) + (\alpha_3 \mathbf{e}_3 + \beta_3 \mathbf{e}_3) = \\ &= (\alpha_1 + \beta_1) \mathbf{e}_1 + (\alpha_2 + \beta_2) \mathbf{e}_2 + (\alpha_3 + \beta_3) \mathbf{e}_3, \end{aligned}$$

или $\mathbf{a} + \mathbf{b} = (\alpha_1 + \beta_1; \alpha_2 + \beta_2; \alpha_3 + \beta_3)$. ■

Утверждение 2. При умножении вектора $\mathbf{a}$ на число λ все координаты данного вектора умножаются на это число.

Доказательство.

$$\lambda \mathbf{a} = \lambda(\alpha_1 \mathbf{e}_1 + \alpha_2 \mathbf{e}_2 + \alpha_3 \mathbf{e}_3) = (\lambda\alpha_1) \mathbf{e}_1 + (\lambda\alpha_2) \mathbf{e}_2 + (\lambda\alpha_3) \mathbf{e}_3,$$

что равносильно равенству

$$\mathbf{a} = (\lambda\alpha_1; \lambda\alpha_2; \lambda\alpha_3). \quad (3.9)$$

Пример 3.1. Для заданных векторов

$$\mathbf{a} = 2\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2 + 4\mathbf{e}_3, \quad \mathbf{b} = -\mathbf{e}_1 + 3\mathbf{e}_2 - 2\mathbf{e}_3$$

найти векторы: а) $2\mathbf{a} - \mathbf{b}$; б) $3\mathbf{a} + 2\mathbf{b}$.

Решение. В заданном базисе $\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3 \rangle$ векторы $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ имеют координаты: $\mathbf{a} = (2; -1; 4)$; $\mathbf{b} = (-1; 3; -2)$. В соответствии с утверждениями 1 и 2 имеем:

$$\begin{aligned} \text{а) } 2\mathbf{a} - \mathbf{b} &= 2 \cdot (2; -1; 4) - (-1; 3; -2) = \\ &= (2 \cdot 2; 2(-1); 2 \cdot 4) + ((-1)(-1); (-1)3; (-1)(-2)) = \\ &= (4; -2; 8) + (1; -3; 2) = (4 + 1; -2 - 3; 8 + 2) = (5; -5; 10); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{б) } 3\mathbf{a} + 2\mathbf{b} &= 3(2; -1; 4) + 2(-1; 3; -2) = \\ &= (6; -3; 12) + (-2; 6; -4) = (6 - 2; -3 + 6; 12 - 4) = (4; 3; 8). \end{aligned}$$

Ответ: а) $2\mathbf{a} - \mathbf{b} = (5; -5; 10)$; б) $3\mathbf{a} + 2\mathbf{b} = (4; 3; 8)$.

Пример 3.2. В параллелограмме $ABCD$ точка $N \in AB$ и при этом $|\overline{AN}| : |\overline{NB}| = 1 : 2$, точка $M \in BC$ и $|\overline{BM}| : |\overline{MC}| = 2 : 3$ (рис. 3.11). Найти координаты векторов $\overline{AM}$, $\overline{CN}$ и $\overline{NM}$ в базисе из векторов $\overline{AB}$ и $\overline{AD}$.

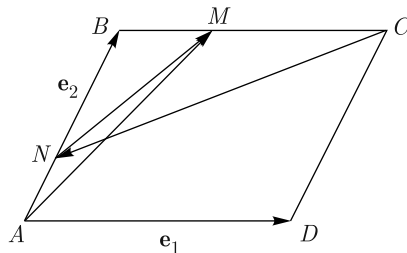


Рис. 3.11

Решение. Обозначим $\overline{AD} = \mathbf{e}_1$, $\overline{AB} = \mathbf{e}_2$. Имеем:

$$\begin{aligned}\overline{AM} &= \overline{AB} + \overline{BM} = \left| \begin{array}{l} \overline{AB} = \mathbf{e}_2, \\ \overline{BM} = \frac{2}{5}\overline{BC} = \frac{2}{5}\mathbf{e}_1 \end{array} \right| = \frac{2}{5}\mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2; \\ \overline{CN} &= \overline{CB} + \overline{BN} = \left| \begin{array}{l} \overline{CB} = -\mathbf{e}_1, \\ \overline{BN} = \frac{2}{3}\overline{BA} = -\frac{2}{3}\overline{AB} = -\frac{2}{3}\mathbf{e}_2 \end{array} \right| = -\mathbf{e}_1 - \frac{2}{3}\mathbf{e}_2; \\ \overline{NM} &= \overline{NB} + \overline{BM} = \left| \begin{array}{l} \overline{NB} = \frac{2}{3}\overline{AB} = \frac{2}{3}\mathbf{e}_2 \\ \overline{BM} = \frac{2}{5}\overline{BC} = \frac{2}{5}\mathbf{e}_1 \end{array} \right| = \frac{2}{5}\mathbf{e}_1 + \frac{2}{3}\mathbf{e}_2.\end{aligned}$$

Ответ: $\overline{AM} = \left(\frac{2}{5}; 1\right)$; $\overline{CN} = \left(-1; -\frac{2}{3}\right)$; $\overline{NM} = \left(\frac{2}{5}; \frac{2}{3}\right)$.

Необходимое и достаточное условие коллинеарности векторов (3.4) ($\mathbf{a} \parallel \mathbf{b} \Leftrightarrow \exists \lambda \in \mathbb{R} : \mathbf{b} = \lambda \mathbf{a}$) в координатной форме дает следующая теорема.

Теорема 3.9. Для того чтобы ненулевые векторы $\mathbf{a} = (\alpha_1; \alpha_2; \alpha_3)$, $\mathbf{b} = (\beta_1; \beta_2; \beta_3)$, заданные своими координатами в базисе $\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3 \rangle$, были коллинеарны, необходимо и достаточно, чтобы их соответствующие координаты были пропорциональны, т. е.

$$\boxed{\mathbf{a} \parallel \mathbf{b} \Leftrightarrow \frac{\alpha_1}{\beta_1} = \frac{\alpha_2}{\beta_2} = \frac{\alpha_3}{\beta_3}}. \quad (3.10)$$

(Здесь подразумевается, что если $\beta_i = 0$ для некоторого i , то и $\alpha_i = 0$ для данного i .)

Доказательство. Необходимость. Пусть векторы $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ коллинеарны, т. е. по теореме 3.4 $\exists \lambda \in \mathbb{R} : \mathbf{a} = \lambda \mathbf{b}$.

Докажем, что из равенства $\mathbf{a} = \lambda \mathbf{b}$ следуют равенства (3.10). Имеем

$$\mathbf{a} = \lambda \mathbf{b} \Leftrightarrow (\alpha_1; \alpha_2; \alpha_3) = \lambda(\beta_1; \beta_2; \beta_3).$$

Отсюда: $\alpha_1 = \lambda\beta_1$, $\alpha_2 = \lambda\beta_2$, $\alpha_3 = \lambda\beta_3$, или

$$\frac{\alpha_1}{\beta_1} = \frac{\alpha_2}{\beta_2} = \frac{\alpha_3}{\beta_3} = \lambda. \quad (3.11)$$

Необходимость условия (3.10) доказана.

Достаточность этого и равносильного ему условия (3.11) очевидна. Действительно, с учетом (3.11) имеем

$$\mathbf{a} = (\alpha_1; \alpha_2; \alpha_3) = (\lambda\beta_1; \lambda\beta_2; \lambda\beta_3) = \lambda(\beta_1; \beta_2; \beta_3) = \lambda \mathbf{b}.$$

Согласно теореме 3.4 из равенства $\mathbf{a} = \lambda \mathbf{b}$ следует коллинеарность векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$. ■

Пример 3.3. Найти значения параметров α и β , при которых векторы $\mathbf{a} = 2\mathbf{e}_1 + \alpha\mathbf{e}_2 + 6\mathbf{e}_3$ и $\mathbf{b} = \beta\mathbf{e}_1 + 2\beta\mathbf{e}_2 + 3\mathbf{e}_3$ коллинеарны.

Решение. Так как $\mathbf{a} = (2; \alpha; 6)$, $\mathbf{b} = (\beta; 2\beta; 3)$, то $\mathbf{a} \parallel \mathbf{b}$ тогда и только тогда, когда выполняются равенства $\frac{2}{\beta} = \frac{\alpha}{2\beta} = \frac{6}{3}$.

Отсюда $\beta = 1$, $\alpha = 4$.

Ответ: $\alpha = 4$; $\beta = 1$.

Вопросы для самоконтроля к § 13–15

1. Дайте определения линейно зависимых и линейно независимых систем векторов.

2. Векторы $\mathbf{a}, \mathbf{b} \in \mathbb{V}^2$ линейно независимы. Будут ли линейно зависимыми системы векторов: а) $\langle \mathbf{a}, 3\mathbf{b} \rangle$; б) $\langle \mathbf{a}, \mathbf{b} + (-\mathbf{b}) \rangle$; в) $\langle \mathbf{a} - \mathbf{b}, \mathbf{a} + 2\mathbf{b} \rangle$?

3. Векторы $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c} \in \mathbb{V}^3$ линейно независимы. Будут ли линейно зависимыми системы векторов: а) $\langle \mathbf{a}, 2\mathbf{a}, \mathbf{b} + \mathbf{c} \rangle$; б) $\langle \mathbf{a}, 3\mathbf{b}, \mathbf{a} - 2\mathbf{b} \rangle$; в) $\langle \mathbf{a} + \mathbf{b}, \mathbf{b} + \mathbf{c}, \mathbf{c} + \mathbf{a} \rangle$?

4. Можно ли утверждать, что любая система трех векторов пространства $\mathbb{V}^2$ линейно зависима?

5. Можно ли утверждать, что любые три вектора пространства $\mathbb{V}^3$ линейно зависимы? Если нет, то перечислите условия, при которых три вектора в пространстве $\mathbb{V}^3$ линейно зависимы.

6. Сколько базисов существует в пространстве $\mathbb{V}^2$? в пространствах $\mathbb{V}^1$ и $\mathbb{V}^3$?

7. Каким условиям должны удовлетворять три вектора пространства $\mathbb{V}^2$, чтобы из них можно было выбрать базис этого пространства?

8. Каким условиям должны удовлетворять четыре вектора пространства $\mathbb{V}^3$, чтобы из них можно было выбрать три вектора, образующие базис в этом пространстве?

9. Запишите необходимые и достаточные условия коллинеарности двух векторов пространства $\mathbb{V}^3$ в векторной и в координатной формах.

Ответы и указания

2. а) линейно независимы; б) линейно зависимы (см. теорему 3.1); в) линейно независимы (докажите методом от противного). 3. а) линейно зависимы (см. теорему 3.2); б) линейно зависимы (см. теорему 3.3); в) линейно независимы (докажите

методом от противного). **4.** Да (см. следствие 2 из теоремы 3.3). **5.** Нет. **6.** Бесконечно много в любом пространстве $\mathbb{V}^k$. **7.** Два из трех векторов должны быть неколлинеарными. **9.** См. теоремы 3.4 и 3.9.

§ 16. Понятие об изоморфизме линейных пространств

Теоремы 3.6–3.8 говорят о том, что в условиях фиксированного базиса пространства $\mathbb{V}^n$ каждому вектору $\mathbf{a}$ этого пространства ставится в соответствие единственная упорядоченная n -ка чисел — координаты $(\lambda_1; \lambda_2; \dots; \lambda_n)$ вектора $\mathbf{a}$ в заданном базисе. Наоборот, всякий упорядоченный набор n чисел $(\lambda_1; \lambda_2; \dots; \lambda_n)$ однозначно определяет в заданном базисе вектор $\mathbf{a}$ пространства $\mathbb{V}^n$. Это означает, что существует взаимно однозначное соответствие между элементами линейных векторных пространств $\mathbb{V}^n$ и арифметических пространств $\mathbb{R}^n$:

$$\mathbb{V}^1 \leftrightarrow \mathbb{R}^1; \quad \mathbb{V}^2 \leftrightarrow \mathbb{R}^2; \quad \mathbb{V}^3 \leftrightarrow \mathbb{R}^3.$$

Более того, сумме $\mathbf{a} + \mathbf{b}$ векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ в пространстве $\mathbb{V}^n$ с фиксированным базисом $\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_n \rangle$ отвечает сумма

$$(\alpha_1 + \beta_1; \alpha_2 + \beta_2; \dots; \alpha_n + \beta_n)$$

арифметических векторов $(\alpha_1; \alpha_2; \dots; \alpha_n)$ и $(\beta_1; \beta_2; \dots; \beta_n)$. Имеет место и обратное соответствие между суммами арифметических и геометрических векторов.

Произведению $\alpha \mathbf{a}$ действительного числа α на геометрический вектор $\mathbf{a} \in \mathbb{V}^n$ отвечает арифметический вектор $(\alpha \lambda_1; \alpha \lambda_2; \dots; \alpha \lambda_n) = \alpha(\lambda_1; \lambda_2; \dots; \lambda_n)$.

Определение 3.15. Два конечномерных линейных пространства $\mathbb{X}$ и $\mathbb{Y}$ называются *изоморфными*, если между их элементами (векторами) можно установить взаимно однозначное соответствие: каждому вектору $\mathbf{x} \in \mathbb{X}$ можно поставить в соответствие единственный вектор $\mathbf{y} \in \mathbb{Y}$ — образ вектора $\mathbf{x}$; при этом различным векторам $\mathbf{x}_1$ и $\mathbf{x}_2$ из $\mathbb{X}$ отвечают различные образы $\mathbf{y}_1$ и $\mathbf{y}_2$ из $\mathbb{Y}$ и, кроме того:

1) сумме $\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2$ векторов из $\mathbb{X}$ отвечает сумма их образов $\mathbf{y}_1 + \mathbf{y}_2$ из $\mathbb{Y}$;

2) произведению $\alpha \mathbf{x}$ отвечает произведение действительного числа α на образ $\mathbf{y}$.

Иначе: 1) если $\mathbf{x}_1 \leftrightarrow \mathbf{y}_1$, $\mathbf{x}_2 \leftrightarrow \mathbf{y}_2$, то $\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2 \leftrightarrow \mathbf{y}_1 + \mathbf{y}_2$;
2) если $\mathbf{x} \leftrightarrow \mathbf{y}$ и $\alpha \in \mathbb{R}$, то $\alpha \mathbf{x} \leftrightarrow \alpha \mathbf{y}$.

Таким образом, каждое пространство $\mathbb{V}^1$, $\mathbb{V}^2$, $\mathbb{V}^3$ геометрических векторов изоморфно соответствующему пространству арифметических векторов $\mathbb{R}^1$, $\mathbb{R}^2$, $\mathbb{R}^3$. Менее очевидным, возможно, является изоморфизм пространства арифметических векторов и пространства матриц соответствующего размера.

Пусть $\mathbb{R}^4$ — четырехмерное арифметическое пространство, $\mathbb{M}_{2 \times 2}$ — пространство матриц размера 2×2 . Матрице $A = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{pmatrix}$, $a_i \in \mathbb{R}$, $i = \overline{1, 4}$, поставим в соответствие арифметический вектор $\mathbf{a} = (a_1; a_2; a_3; a_4)$ пространства $\mathbb{R}^4$. Элементы матрицы A записываются в вектор $\mathbf{a}$ построчно и, наоборот, элементы вектора $\mathbf{a}$ записываются в матрицу A последовательно по строкам, начиная с первой строки. Тогда сумме матриц $A + B$, где $B = \begin{pmatrix} b_1 & b_2 \\ b_3 & b_4 \end{pmatrix}$, $b_i \in \mathbb{R}$, $i = \overline{1, 4}$, будет отвечать вектор

$$\mathbf{a} + \mathbf{b} = (a_1 + b_1; a_2 + b_2; a_3 + b_3; a_4 + b_4).$$

Обратно, вектору $\mathbf{a} + \mathbf{b}$ будет соответствовать матрица

$$A + B = \begin{pmatrix} a_1 + b_1 & a_2 + b_2 \\ a_3 + b_3 & a_4 + b_4 \end{pmatrix}.$$

Матрице $\lambda A = \begin{pmatrix} \lambda a_1 & \lambda a_2 \\ \lambda a_3 & \lambda a_4 \end{pmatrix}$ при установленном соответствии будет отвечать вектор $\lambda \mathbf{a} = (\lambda a_1; \lambda a_2; \lambda a_3; \lambda a_4)$ пространства $\mathbb{R}^4$.

Если $\langle \mathbf{e}_1^0, \mathbf{e}_2^0, \mathbf{e}_3^0, \mathbf{e}_4^0 \rangle$ — канонический базис пространства $\mathbb{R}^4$, т. е. $\mathbf{e}_1^0 = (1; 0; 0; 0)$, $\mathbf{e}_2^0 = (0; 1; 0; 0)$, $\mathbf{e}_3^0 = (0; 0; 1; 0)$, $\mathbf{e}_4^0 = (0; 0; 0; 1)$, то в пространстве $\mathbb{M}_{2 \times 2}$ можно ввести базис из матриц $\tilde{E}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$, $\tilde{E}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$, $\tilde{E}_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$, $\tilde{E}_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, который также можно назвать каноническим. Разложение произвольной матрицы A в этом базисе будет иметь следующий вид: $A = a_1 \tilde{E}_1 + a_2 \tilde{E}_2 + a_3 \tilde{E}_3 + a_4 \tilde{E}_4$, что идентично, с точностью до обозначений, разложению вектора $\mathbf{a} = (a_1; a_2; a_3; a_4)$ по каноническому базису пространства $\mathbb{R}^4$:

$$\mathbf{a} = a_1 \mathbf{e}_1^0 + a_2 \mathbf{e}_2^0 + a_3 \mathbf{e}_3^0 + a_4 \mathbf{e}_4^0.$$

Таким образом, доказано, что пространство матриц $\mathbb{M}_{2 \times 2}$ изоморфно арифметическому пространству $\mathbb{R}^4$.

§ 17. Проекция вектора на ось

Прямая ℓ , на которой задано *положительное направление*, называется *осью*. Положительное направление на оси отмечается стрелкой. Направление оси, противоположное положительному, называется *отрицательным направлением*.

Пусть на плоскости заданы ось ℓ и некоторая прямая ℓ_1 , не совпадающая с ℓ и не параллельная ей.

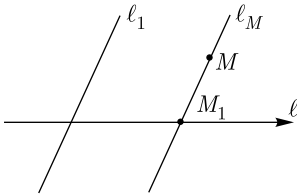


Рис. 3.12

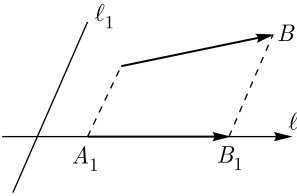


Рис. 3.13

Определение 3.16. Проекцией произвольной точки M на ось ℓ параллельно прямой ℓ_1 (вдоль прямой ℓ_1) называется точка M_1 пересечения прямой ℓ_M , проходящей через точку M параллельно прямой ℓ_1 , с осью ℓ (рис. 3.12).

Прямая ℓ_1 называется *проецирующей прямой*.

Аналогично вводится проекция точки на плоскость в пространстве вдоль проецирующей прямой.

Пусть на плоскости заданы вектор $\overline{AB}$, ось ℓ и проецирующая прямая ℓ_1 . Спроецируем на ось ℓ вдоль прямой ℓ_1 начало (точка A) и конец (точка B) вектора $\overline{AB}$. Получим вектор $\overline{A_1B_1}$, который называется *геометрической проекцией* вектора $\overline{AB}$ на ось ℓ вдоль прямой ℓ_1 (рис. 3.13).

Если прямая ℓ_1 перпендикулярна оси ℓ , то говорят об *ортогональной проекции* точки M на ось ℓ и об *ортогональной проекции* $\overline{A_1B_1}$ вектора $\overline{AB}$ на ось ℓ .

В векторной алгебре широко используется понятие *алгебраической проекции* вектора $\overline{AB}$ на ось ℓ при ортогональном проецировании точек.

Определение 3.17. Алгебраической проекцией вектора $\overline{AB}$ на ось ℓ при ортогональном проецировании называется скалярная величина (число), равная $|\overline{A_1B_1}|$, если вектор $\overline{A_1B_1}$ сонаправлен с осью ℓ , и $-|\overline{A_1B_1}|$ в противном случае (рис. 3.14).

Обозначается алгебраическая проекция вектора на ось ℓ символом $\text{пр}_\ell \overline{AB}$.

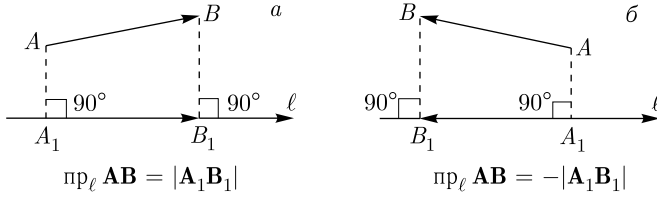


Рис. 3.14

Значение алгебраической проекции $\text{пр}_\ell \overline{AB}$ вектора $\overline{AB}$ на ось ℓ можно найти по формуле

$$\boxed{\text{пр}_\ell \overline{AB} = |\overline{AB}| \cdot \cos \varphi}, \quad (3.12)$$

где φ — угол между вектором $\overline{AB}$ и осью ℓ .

Под углом φ между вектором $\overline{AB}$ и осью ℓ будем понимать меньший из двух углов между вектором и положительным направлением оси ℓ . При таком соглашении $0 \leq \varphi \leq \pi$ (рис. 3.15).

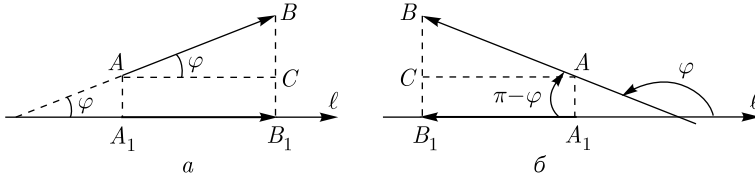


Рис. 3.15

Доказательство формулы (3.12). Если $0 \leq \varphi < \frac{\pi}{2}$ (рис. 3.15, а), то из определения алгебраической проекции вектора и прямоугольного треугольника ACB имеем

$$\text{пр}_\ell \overline{AB} = |\overline{A_1B_1}| = AC = |\overline{AB}| \cos \varphi.$$

Если $\frac{\pi}{2} < \varphi \leq \pi$ (рис. 3.15, б), то

$$\text{пр}_\ell \overline{AB} = -|\overline{A_1B_1}| = -AC = -|\overline{AB}| \cos (\pi - \varphi) = |\overline{AB}| \cos \varphi.$$

Если же вектор $\overline{AB}$ ортогонален оси ℓ , то $\varphi = \frac{\pi}{2}$ и

$$\text{пр}_\ell \overline{AB} = |\overline{AB}| \cos \frac{\pi}{2} = 0.$$

Таким образом,

$$\text{пр}_\ell \overline{AB} = |\overline{AB}| \cos \varphi = \begin{cases} |\overline{A_1B_1}|, & \text{если } 0 \leq \varphi < \frac{\pi}{2}, \\ -|\overline{A_1B_1}|, & \text{если } \frac{\pi}{2} < \varphi \leq \pi, \\ 0, & \text{если } \varphi = \frac{\pi}{2}. \end{cases} \quad (3.13)$$

Установим свойства алгебраических проекций вектора на ось при ортогональном проецировании.

Утверждение. Для произвольных векторов $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и произвольного числа λ справедливы свойства:

1. $\text{пр}_\ell(\mathbf{a} + \mathbf{b}) = \text{пр}_\ell \mathbf{a} + \text{пр}_\ell \mathbf{b}$;
 2. $\text{пр}_\ell(\lambda \mathbf{a}) = \lambda \cdot \text{пр}_\ell \mathbf{a}$.
- (3.14)

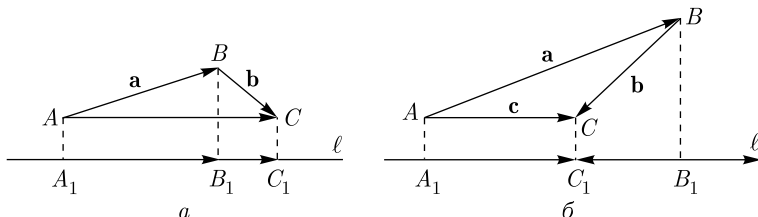


Рис. 3.16

Доказательство. Справедливость свойства 1 легко видеть из рис. 3.16, а и б:

$$\begin{aligned} \text{а) } \text{пр}_\ell(\mathbf{a} + \mathbf{b}) &= \text{пр}_\ell \overline{AC} = |\overline{A_1C_1}|, \\ \text{пр}_\ell \mathbf{a} + \text{пр}_\ell \mathbf{b} &= |\overline{A_1B_1}| + |\overline{B_1C_1}| = |\overline{A_1C_1}|; \\ \text{б) } \text{пр}_\ell(\mathbf{a} + \mathbf{b}) &= \text{пр}_\ell \overline{BC} = |\overline{A_1C_1}|, \\ \text{пр}_\ell \mathbf{a} + \text{пр}_\ell \mathbf{b} &= |\overline{A_1B_1}| - |\overline{B_1C_1}| = |\overline{A_1C_1}|. \end{aligned}$$

Из сопоставления правых частей в обоих случаях а) и б) получаем первое равенство

$$\boxed{\text{пр}_\ell(\mathbf{a} + \mathbf{b}) = \text{пр}_\ell \mathbf{a} + \text{пр}_\ell \mathbf{b}}.$$

Докажем свойство 2. Рассмотрим два случая: $\lambda > 0$ и $\lambda < 0$ (при $\lambda = 0$ имеем $\text{пр}_\ell(0 \cdot \mathbf{a}) = 0 \cdot \text{пр}_\ell \mathbf{a} = 0$).

$$\begin{aligned} \lambda > 0 &\Rightarrow \text{пр}_\ell(\lambda \mathbf{a}) = |\lambda \mathbf{a}| \cos \varphi = \lambda |\mathbf{a}| \cos \varphi = \lambda \text{пр}_\ell \mathbf{a}; \\ \lambda < 0 &\Rightarrow \text{пр}_\ell(\lambda \mathbf{a}) = |\lambda \mathbf{a}| \cos(\pi - \varphi) = |\lambda| |\mathbf{a}| \cos(\pi - \varphi), \end{aligned}$$

но $\cos(\pi - \varphi) = -\cos \varphi$, $|\lambda| = -\lambda$ при $\lambda < 0$ и потому имеем окончательно (при $\lambda < 0$):

$$\text{пр}_\ell(\lambda \mathbf{a}) = -\lambda |\mathbf{a}| (-\cos \varphi) = \lambda |\mathbf{a}| \cos \varphi = \lambda \text{пр}_\ell \mathbf{a}.$$

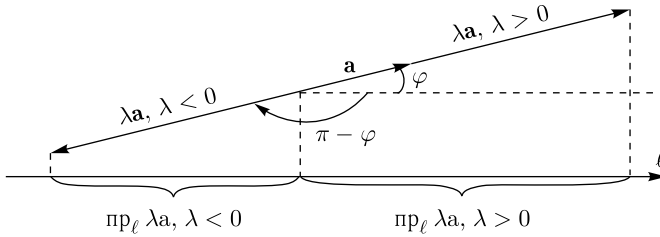


Рис. 3.17

Иллюстрация к доказательству свойства 2 алгебраической проекции вектора на ось приведена на рис. 3.17.

§ 18. Ортогональные и ортонормированные базисы. Системы координат

18.1. Ортогональные и ортонормированные базисы

Из бесконечного множества базисов любого линейного векторного пространства размерности $n \geq 2$ особое место занимают ортогональные и ортонормированные базисы. Выделение названных базисов из общего множества базисов обусловлено важными свойствами векторов в этих базисах.

Определение 3.18. Базисы $\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2 \rangle$ и $\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3 \rangle$ называются *ортогональными*, если базисные векторы в них взаимно перпендикулярны, т. е. если $\mathbf{e}_1 \perp \mathbf{e}_2$ (в пространстве $\mathbb{V}^2$) или $\mathbf{e}_1 \perp \mathbf{e}_2$, $\mathbf{e}_1 \perp \mathbf{e}_3$, $\mathbf{e}_2 \perp \mathbf{e}_3$ (в пространстве $\mathbb{V}^3$).

Определение 3.19. Ортогональный базис называется *ортонормированным*, если все его векторы имеют единичную длину.

Векторы ортонормированного базиса принято обозначать буквами $\mathbf{i}, \mathbf{j}$ (в пространстве $\mathbb{V}^2$) или $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ (в пространстве $\mathbb{V}^3$).

Таким образом,

- $\langle \mathbf{i}, \mathbf{j} \rangle$ — *ортонормированный базис* в пространстве $\mathbb{V}^2$, если:

$$1) \mathbf{i} \perp \mathbf{j}; \quad 2) |\mathbf{i}| = |\mathbf{j}| = 1.$$

- $\langle \mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k} \rangle$ — *ортонормированный базис* в пространстве $\mathbb{V}^3$, если:

$$1) \mathbf{i} \perp \mathbf{j}, \mathbf{i} \perp \mathbf{k}, \mathbf{j} \perp \mathbf{k}; \quad 2) |\mathbf{i}| = |\mathbf{j}| = |\mathbf{k}| = 1.$$

В ортонормированном базисе легко находятся: модуль вектора, заданного своими координатами; угол между векторами, в частности, между некоторым вектором $\mathbf{a}$ и базисными векторами $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$. Ниже будут введены понятия *скалярного*, *векторного* и *смешанного* произведений векторов. Названные три операции также наиболее просто вычисляются через координаты входящих в них векторов, если последние заданы в ортонормированном базисе. Заметим, что преимущества ортонормированных базисов не исчерпываются приведенными аргументами.

18.2. Аффинные системы координат

Для задания системы координат на прямой, на плоскости или в пространстве следует:

1) взять некоторую точку O (на прямой, на плоскости или в пространстве соответственно) в качестве начала системы координат;

2) приложить к ней векторы из упорядоченного набора базисных векторов: $\langle \mathbf{e}_1 \rangle$ на прямой, $\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2 \rangle$ на плоскости, $\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3 \rangle$ в пространстве;

3) построить координатные оси:

— ось *абсцисс* в направлении вектора $\mathbf{e}_1$ (на прямой, на плоскости или в пространстве);

— ось *ординат* в направлении вектора $\mathbf{e}_2$ (на плоскости или в пространстве)

— ось *аппликат* в направлении вектора $\mathbf{e}_3$ (в пространстве).

Системы координат обозначаются следующим образом: на прямой — Ox , на плоскости — Oxy , в пространстве — $Oxyz$. Модуль каждого базисного вектора определяет единицу длины на соответствующей координатной оси.

Построенная таким образом система координат называется общей декартовой *аффинной системой координат*. На рис. 3.18

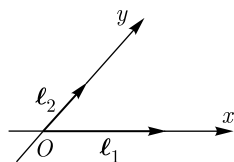


Рис. 3.18

приведен пример аффинной системы координат на плоскости. Она порождена *косугольным базисом* $\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2 \rangle$ ($(\widehat{\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2 \rangle}) \neq \frac{\pi}{2}$).

Модули $|\mathbf{e}_1|, |\mathbf{e}_2|$ базисных векторов задают единицы масштаба на осях Ox и Oy соответственно.

Координатами произвольной точки M в заданной системе координат Oxy называются координаты ее *радиуса-вектора* $\overline{OM}$ в базисе $\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2 \rangle$. Так, если $\overline{OM} = x\mathbf{e}_1 + y\mathbf{e}_2$, то упорядоченная пара чисел $(x; y)$ — координаты точки M (рис. 3.19). При этом

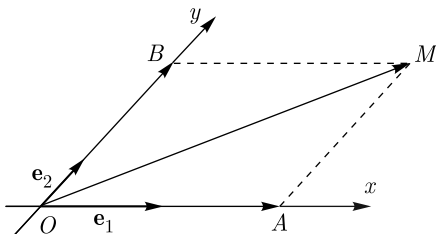


Рис. 3.19

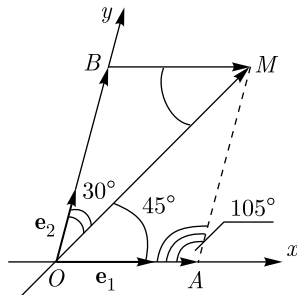


Рис. 3.20

первое число в упорядоченной паре $(x; y)$ называется *абсциссой точки M*, а второе — *ординатой точки M*.

Пример 3.4. Найти координаты точки M в аффинной системе координат Oxy , если известно, что

$$|e_1| = 3, \quad |e_2| = 2, \quad (\widehat{e_1, e_2}) = 75^\circ,$$

$$(\widehat{OM, e_1}) = 45^\circ \quad \text{и} \quad \overline{OM} = 6(\sqrt{3} + 1).$$

Решение. Применим теорему синусов к треугольнику OAM . Заметим, что $\angle OAM = 105^\circ$ (рис. 3.20) и вычислим синус этого

угла: $\sin 105^\circ = \sin 60^\circ \cos 45^\circ + \cos 60^\circ \sin 45^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{1}{2} \times \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{\sqrt{6} + \sqrt{2}}{4}$. Далее получим

$$\frac{|\overline{OM}|}{\sin 105^\circ} = \frac{|\overline{OA}|}{\sin 30^\circ} \Leftrightarrow \frac{6(\sqrt{3} + 1)}{\frac{\sqrt{6} + \sqrt{2}}{4}} = \frac{|\overline{OA}|}{\frac{1}{2}} \Rightarrow |\overline{OA}| = 6\sqrt{2}.$$

Поскольку $|e_1| = 3$, то $\overline{OA} = \frac{6\sqrt{2}}{3}e_1 = 2\sqrt{2}e_1$. Аналогично находим из треугольника OBM :

$$\frac{\overline{OB}}{\sin 45^\circ} = \frac{\overline{BM}}{\sin 30^\circ} \Rightarrow \overline{OB} = \overline{OA} \frac{\sin 45^\circ}{\sin 30^\circ}, \quad \text{откуда} \quad \overline{OB} = 12.$$

Так как $|e_2| = 2$, то $\overline{OB} = \frac{12}{2}e_2 = 6e_2$. Таким образом,

$$\overline{OM} = \overline{OA} + \overline{OB} = 2\sqrt{2}e_1 + 6e_2$$

и искомые координаты точки M : абсцисса $x = 2\sqrt{2}$; ордината $y = 6$.

Ответ: $M(2\sqrt{2}; 6)$.

Различают правые и левые декартовы системы координат на плоскости и в пространстве.

Определение 3.20. Базис $\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2 \rangle$ на плоскости называется *правым*, если поворот вектора $\mathbf{e}_1$ к вектору $\mathbf{e}_2$ на наименьший угол до совпадения их направлений совершается против хода часовой стрелки. Если же искомое совмещение направлений достигается поворотом вектора $\mathbf{e}_1$ к $\mathbf{e}_2$ на наименьший угол по ходу часовой стрелки, то базис называется *левым*.

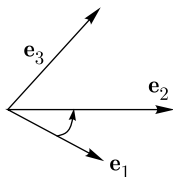


Рис. 3.21

Определение 3.21. Базис $\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3 \rangle$ в пространстве называется *правым*, если с конца вектора $\mathbf{e}_3$ поворот вектора $\mathbf{e}_1$ к вектору $\mathbf{e}_2$ по кратчайшему пути виден совершающимся против хода часовой стрелки (рис. 3.21).

Определение 3.22. Декартова система координат на плоскости или в пространстве называется *правой* (*левой*), если она порождена *правоориентированным* (*левоориентированным*) базисом, или просто *правым* (*левым*) базисом.

Всюду далее мы будем использовать правые декартовы системы координат.

18.3. Декартовы прямоугольные системы координат

Декартова прямоугольная система координат является частным случаем общей декартовой (аффинной) системы координат.

Определение 3.23. Декартовой прямоугольной системой координат называется система координат, порожденная ортонормированным базисом ($\langle \mathbf{i} \rangle$ на прямой, $\langle \mathbf{i}, \mathbf{j} \rangle$ на плоскости, $\langle \mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k} \rangle$ в пространстве).

Подчеркнем еще раз основные отличия, выделяющие декартовы прямоугольные системы координат из множества аффинных систем координат. Во-первых, *все базисные векторы имеют единичную длину* и, во-вторых, на плоскости базисные векторы *ортгональны*, а в пространстве *попарно ортгональны*.

На рис. 3.22 приведены декартовы прямоугольные системы координат на плоскости (а) и в пространстве (б).

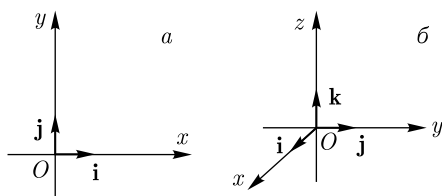


Рис. 3.22

Плоскости Oxy , Oxz , Oyz называются *координатными плоскостями*.

Зафиксируем в заданной декартовой прямоугольной системе координат $Oxyz$ некоторую точку M и проведем вектор $\overline{OM}$ (рис. 3.23). Найдем ортогональные проекции точки M на плоскость Oxy (точка M') и на ось Oz (точка C). Затем найдем ортогональные проекции точки M' на ось Ox (точка A) и на ось Oy (точка B). Проведем векторы $\overline{OA}$, $\overline{OB}$, $\overline{OC}$.

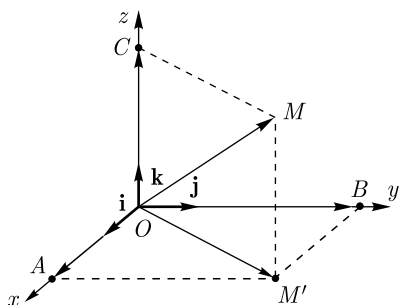


Рис. 3.23

Из прямоугольников $OM'MC$ и $OAM'B$ имеем в соответствии с правилом параллелограмма:

$$\text{из } OM'MC: \overline{OM} = \overline{OM'} + \overline{OC};$$

$$\text{из } OAM'B: \overline{OM'} = \overline{OA} + \overline{OB}.$$

В результате

$$\overline{OM} = \overline{OA} + \overline{OB} + \overline{OC}. \quad (3.15)$$

Так как $\overline{OA} \parallel \mathbf{i}$, то существует число $x \in \mathbb{R}$ такое, что $\overline{OA} = x\mathbf{i}$. Аналогично из условий коллинеарности $\overline{OB} \parallel \mathbf{j}$ и $\overline{OC} \parallel \mathbf{k}$ получаем, что существуют числа y и z такие, что $\overline{OB} = y\mathbf{j}$, $\overline{OC} = z\mathbf{k}$. Подставляя в (3.15) вместо векторов $\overline{OA}$, $\overline{OB}$ и $\overline{OC}$ их представления, получаем разложение вектора $\overline{OM}$ по базису $\langle \mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k} \rangle$:

$$\boxed{\overline{OM} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}}. \quad (3.16)$$

Полученное разложение является единственным, а упорядоченная тройка чисел $(x; y; z)$ называется *декартовыми прямоугольными координатами* вектора $\overline{OM}$ и точки M .

Легко заметить, что прямоугольные координаты точки M являются алгебраическими проекциями *радиуса-вектора* $\overline{OM}$ на координатные оси: $x = \text{пр}_{Ox} \overline{OM}$, $y = \text{пр}_{Oy} \overline{OM}$, $z = \text{пр}_{Oz} \overline{OM}$.

Таким образом, каждой точке M в пространстве отвечает единственная упорядоченная тройка чисел $(x; y; z)$, называемых координатами этой точки. Наоборот, всякая упорядоченная тройка чисел $(x; y; z)$ определяет некоторую точку M в пространстве.

Модуль (длина) радиуса-вектора $\overline{OM} = (x; y; z)$ точки M может быть найден по формуле

$$|\overline{OM}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \quad (3.17)$$

Действительно, из системы прямоугольных треугольников на рис. 3.23 получаем $|\overline{OM}| = \sqrt{|\overline{OA}|^2 + |\overline{OB}|^2 + |\overline{OC}|^2}$. Но $|\overline{OA}| = |x\mathbf{i}| = |x| \cdot |\mathbf{i}| = |x|$, $|\overline{OB}| = |y\mathbf{j}| = |y|$, $|\overline{OC}| = |z\mathbf{k}| = |z|$ и потому $|\overline{OM}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$.

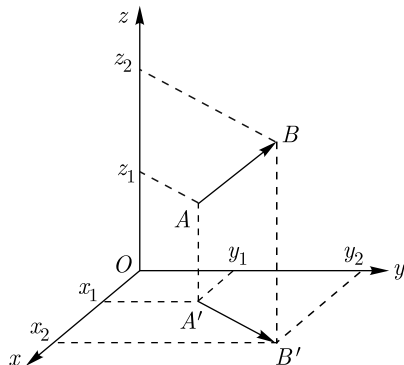


Рис. 3.24

Если известны координаты начальной $A(x_1; y_1; z_1)$ и конечной $B(x_2; y_2; z_2)$ точек вектора $\overline{AB}$ (рис. 3.24), то по аналогии с радиусом-вектором $\overline{OM}$ получаем:

$$\overline{AB} = (x_2 - x_1; y_2 - y_1; z_2 - z_1), \quad (3.18)$$

$$|\overline{AB}| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}. \quad (3.19)$$

Формула (3.19) определяет длину вектора $\overline{AB}$ и одновременно расстояние $\rho(A; B)$ между двумя точками $A(x_1; y_1; z_1)$ и $B(x_2; y_2; z_2)$ в пространстве $\mathbb{R}^3$.

На плоскости в декартовой прямоугольной системе координат формулы (3.18) и (3.19) принимают следующий вид:

$$\overline{AB} = (x_2 - x_1; y_2 - y_1);$$

$$\rho(A; B) = |\overline{AB}| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}.$$

18.4. Направляющие косинусы

Пусть в пространстве $\mathbb{V}^3$ задана декартова прямоугольная система координат $Oxyz$, и пусть $\mathbf{a}$ — некоторый вектор этого пространства. Пусть, далее,

$$\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k}$$

— разложение вектора $\mathbf{a}$ по ортонормированному базису $\langle \mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k} \rangle$, т. е. $\mathbf{a} = (a_x; a_y; a_z)$. Найдем орт $\mathbf{a}^0$ вектора $\mathbf{a}$. Для этого в соответствии с формулой (3.3) необходимо умножить вектор $\mathbf{a}$ на число $\frac{1}{|\mathbf{a}|}$, где $|\mathbf{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$:

$$\mathbf{a}^0 = \frac{1}{|\mathbf{a}|} \mathbf{a} = \left(\frac{a_x}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}}; \frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}}; \frac{a_z}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}} \right). \quad (3.20)$$

Но согласно (3.12) $a_x = \text{пр}_{Ox} \mathbf{a} = |\mathbf{a}| \cos \alpha$,

где $\alpha = (\widehat{\mathbf{a}_x, Ox})$ — угол, образованный вектором $\mathbf{a}$ с положительным направлением оси Ox (с базисным вектором $\mathbf{i}$) (рис. 3.25). Поэтому

$$\frac{a_x}{|\mathbf{a}|} = \frac{a_x}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}} = \cos \alpha.$$

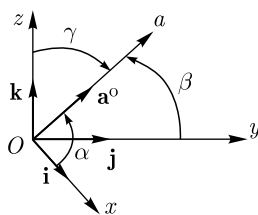


Рис. 3.25

Аналогично:

$$\frac{a_y}{|\mathbf{a}|} = \frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}} = \cos \beta,$$

$$\frac{a_z}{|\mathbf{a}|} = \frac{a_z}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}} = \cos \gamma,$$

где $\beta = (\widehat{\mathbf{a}, Oy})$, $\gamma = (\widehat{\mathbf{a}, Oz})$.

Заменяя в (3.20) компоненты вектора $\mathbf{a}^0$ косинусами углов α , β , γ , получаем

$$\mathbf{a}^0 = (\cos \alpha; \cos \beta; \cos \gamma), \quad (3.21)$$

при этом $\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$.

Определение 3.24. Числа $\cos \alpha$, $\cos \beta$, $\cos \gamma$ — координаты орта $\mathbf{a}^0$ вектора $\mathbf{a}$ — называются *направляющими косинусами* вектора $\mathbf{a}$.

Пример 3.5. Найти направляющие косинусы и углы, которые образует вектор $\mathbf{a} = \mathbf{i} + 2\mathbf{j} - 2\sqrt{5}\mathbf{k}$ с координатными осями.

Решение. 1. $|\mathbf{a}| = \sqrt{1^2 + 2^2 + (-2\sqrt{5})^2} = 5$.

$$2. \mathbf{a}^0 = \frac{1}{5}(1; 2; -2\sqrt{5}) = \left(\frac{1}{5}; \frac{2}{5}; \frac{-2\sqrt{5}}{5}\right).$$

$$3. \cos \alpha = \frac{1}{5}; \cos \beta = \frac{2}{5}; \cos \gamma = \frac{-2\sqrt{5}}{5}.$$

$$4. \alpha = \arccos \frac{1}{5}; \beta = \arccos \frac{2}{5}; \gamma = \pi - \arccos \frac{2\sqrt{5}}{5}.$$

Ответ: $\cos \alpha = \frac{1}{5}; \cos \beta = \frac{2}{5}; \cos \gamma = \frac{-2\sqrt{5}}{5}; \alpha = \arccos \frac{1}{5};$
 $\beta = \arccos \frac{2}{5}; \gamma = \pi - \arccos \frac{2\sqrt{5}}{5}.$

§ 19. Полярная система координат на плоскости

Декартова система координат на плоскости не является единственной системой координат, позволяющей однозначно определять положение точки M на плоскости. Возможны другие способы формирования упорядоченных пар чисел — координат точки M на плоскости.

Выбор той или иной системы координат определяется ее удобством для решения определенных классов задач. На плоскости часто в качестве альтернативной к декартовой прямоугольной системе координат используется *полярная система координат*.

Полярная система координат задается тройкой объектов:

- точка O — *полюс* полярной системы координат;
- луч OP , который называют *полярной осью*;
- единица масштаба — отрезок OA на полярной оси (рис. 3.26).

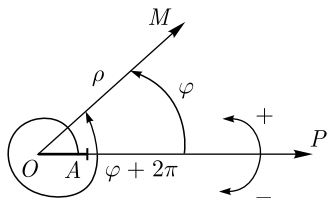


Рис. 3.26

Положение точки M в полярной системе координат задается упорядоченной парой чисел $(\rho; \varphi)$, в составе которой первое число ρ называется *полярным радиусом*, а второе φ — *полярным углом*. По определению полярный радиус равен длине радиуса-вектора $\overline{OM}$ ($\rho = |\overline{OM}|$), а полярный угол φ — это угол, образованный лучом $\overline{OM}$ с полярной осью OP ($\varphi = (\overline{OM}, \overline{OP})$).

Из определения следует, что величина ρ может изменяться в пределах от 0 до $+\infty$, т. е. $0 \leq \rho < +\infty$, при этом значение $\rho = 0$ соответствует полюсу O ; угол φ в полюсе может принимать произвольное значение.

В определении полярного угла присутствует неопределенность в том смысле, что углы φ , $\varphi + 2\pi$, $\varphi - 2\pi$ и вообще $\varphi + 2\pi k$, $k \in \mathbb{Z}$, определяют один и тот же луч OM (рис. 3.26).

Для исключения этой неопределенности принимают соглашение, в соответствии с которым угол φ может изменяться либо в пределах от 0 до 2π ($0 \leq \varphi < 2\pi$), либо в пределах от $(-\pi)$ до π ($-\pi < \varphi \leq \pi$). Мы выберем в качестве рабочего второй вариант. Принято угол φ брать со знаком «+», если он отсчитывается от полярной оси против хода часовой стрелки, и со знаком «-» в противном случае, т. е. по ходу часовой стрелки (рис. 3.26). Измеряется полярный угол обычно в радианах.

Отметим, что уравнение $\rho = a$, $a > 0$, определяет в полярной системе координат окружность с центром в полюсе O и радиусом $R = a$, а уравнение $\varphi = \varphi_0$, $-\pi < \varphi_0 \leq \pi$, является уравнением луча OM , проведенного под углом φ_0 к полярной оси.

Для установления взаимосвязи полярных $(\rho; \varphi)$ и прямоугольных $(x; y)$ координат точки M совмещают начало декартовой прямоугольной системы координат Oxy с полюсом O , ось Ox направляют вдоль полярной оси OP , а ось Oy — перпендикулярно оси Ox (рис. 3.27).

Из прямоугольного треугольника OAM получаем

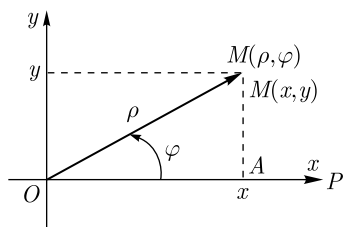


Рис. 3.27

$$\begin{cases} x = \rho \cos \varphi, \\ y = \rho \sin \varphi. \end{cases} \quad (3.22)$$

Формулы (3.22) позволяют находить прямоугольные координаты $(x; y)$ точки M по ее полярным координатам $(\rho; \varphi)$.

Обратный переход от прямоугольных координат $(x; y)$ точки M к полярным $(\rho; \varphi)$ осуществляется по формулам:

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2},$$

$$\varphi = \begin{cases} \operatorname{arctg} \frac{y}{x}, & \text{если } x > 0; \\ \pi + \operatorname{arctg} \frac{y}{x}, & \text{если } x < 0, y > 0; \\ -\pi + \operatorname{arctg} \frac{y}{x}, & \text{если } x < 0, y \leq 0; \\ \frac{\pi}{2}, & \text{если } x = 0, y > 0; \\ -\frac{\pi}{2}, & \text{если } x = 0, y < 0. \end{cases} \quad (3.23)$$

Пример 3.6. Построить кривую Γ , уравнение которой в полярной системе координат имеет следующий вид:

$$\rho = a(1 + \cos \varphi), \quad a > 0.$$

Решение. Поскольку функция косинус является четной, то кривая $\Gamma : \rho = a(1 + \cos \varphi)$ симметрична относительно полярной оси OP . Поэтому достаточно построить часть кривой Γ , отвечающую значениям полярного угла φ от 0 до π .

Составим таблицу опорных значений функции $\rho(\varphi)$:

φ	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$
$\rho(\varphi)$	$a(1+1) = 2a$	$a\left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \approx 1,87a$	$a\left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \approx 1,71a$

$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{2}{3}\pi$	$\frac{3}{4}\pi$	π
$a\left(1 + \frac{1}{2}\right) = \frac{3}{2}a$	$a(1+0) = a$	$a\left(1 - \frac{1}{2}\right) = \frac{a}{2}$	$a\left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \approx 0,29a$	$a(1-1) = 0$

Для построения кривой Γ :

— проводим луч OM , образующий угол $\frac{\pi}{6}$ с полярной осью OP , и откладываем на нем отрезок длины $\approx 1,87a$ (рис. 3.28);

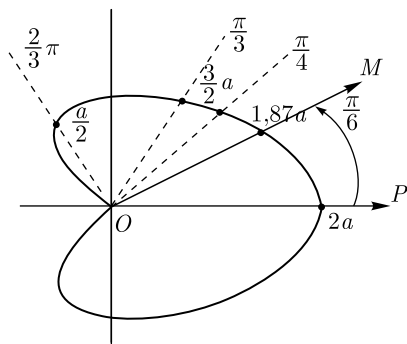


Рис. 3.28

— аналогично откладываем на лучах, образующих с полярной осью углы $\frac{\pi}{4}$, $\frac{\pi}{3}$, $\frac{\pi}{2}$, $\frac{2}{3}\pi$, $\frac{3}{4}\pi$, отрезки соответствующей длины;

— соединяем полученные точки плавной линией;
 — построенную часть кривой Γ отображаем симметрично полярной оси из верхней полуплоскости в нижнюю (рис. 3.28).

Заметим, что построенная кривая $\Gamma: \rho = a(1 + \cos \varphi)$ называется *кардиоидой*.

В прямоугольных координатах уравнение кардиоиды имеет следующий вид:

$$(x^2 + y^2)(x^2 + y^2 - 2ax) - a^2 y^2 = 0, \quad a > 0.$$

Это алгебраическая кривая 4-го порядка (см. § 24). ■

Пример 3.7. Найти полярные координаты точек $M(-2\sqrt{3}; 2)$, $N(-3; -3)$, $K(1; -\sqrt{3})$.

Решение. Точка M расположена во 2-й четверти, поэтому в соответствии с формулами (3.23) имеем:

$$\begin{aligned} \rho &= \sqrt{(-2\sqrt{3})^2 + 2^2} = 4; \\ \varphi &= \pi + \operatorname{arctg} \frac{2}{-2\sqrt{3}} = \pi - \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{3}} = \pi - \frac{\pi}{6} = \frac{5}{6}\pi. \end{aligned}$$

Таким образом, $\left(4; \frac{5}{6}\pi\right)$ — полярные координаты точки M .

Аналогично находим полярные координаты точки N ($x < 0$, $y < 0$):

$$\begin{aligned} \rho &= \sqrt{(-3)^2 + (-3)^2} = 3\sqrt{2}; \\ \varphi &= -\pi + \operatorname{arctg} \frac{-3}{-3} = -\pi + \operatorname{arctg} 1 = -\pi + \frac{\pi}{4} = -\frac{3}{4}\pi, \end{aligned}$$

и полярные координаты точки K :

$$\begin{aligned} \rho &= \sqrt{1 + (-\sqrt{3})^2} = 2, \\ \varphi &= \operatorname{arctg} \frac{-\sqrt{3}}{1} = -\frac{\pi}{3}. \end{aligned}$$

Ответ: $M\left(4; \frac{5}{6}\pi\right)$, $N\left(3\sqrt{2}; -\frac{3}{4}\pi\right)$, $K\left(2; -\frac{\pi}{3}\right)$.

§ 20. Цилиндрическая и сферическая системы координат

Цилиндрическая и сферическая системы координат преимущественно используются как криволинейные системы координат, альтернативные декартовой прямоугольной системе координат в пространстве. Они являются обобщением полярной системы координат на плоскости.

Цилиндрическая система координат. Выберем плоскость $\mathcal{P}$ в трехмерном пространстве и зафиксируем на ней точку O и ось OP — соответственно *полюс* полярной системы координат этой плоскости и *полярную ось*. Перпендикулярно плоскости $\mathcal{P}$ через полюс O проведем ось Oz (рис. 3.29).

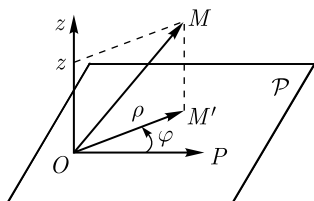


Рис. 3.29

Совокупность полюса O , полярной оси OP в выбранной плоскости $\mathcal{P}$ и оси Oz , перпендикулярной плоскости $\mathcal{P}$, называется *цилиндрической*

системой координат.

Цилиндрические координаты точки M в этой системе координат задаются упорядоченной тройкой чисел $(\rho; \varphi; z)$. В составе этой тройки ρ — модуль вектора $\overline{OM'}$ ($\rho = |\overline{OM'}|$), здесь M' — ортогональная проекция точки M на плоскость $\mathcal{P}$; φ — полярный угол ($\varphi = (\overline{OM'}, \overline{OP})$); z — ортогональная алгебраическая проекция вектора $\overline{OM}$ на ось Oz ($z = \text{пр}_{Oz} \overline{OM}$).

Для согласования цилиндрической системы координат с прямоугольной декартовой системой координат ось Ox направляют вдоль полярной оси OP , ось Oy проводится в плоскости $\mathcal{P}$ перпендикулярно оси Ox , ось аппликат совмещается с осью Oz цилиндрической системы координат (рис. 3.30). Положительное направление на оси ординат Oy выбирается так, чтобы система координат $Oxyz$ была правой.

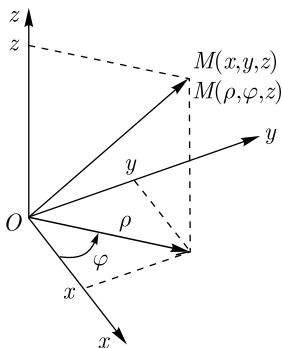


Рис. 3.30

Для перехода от цилиндрических координат $(\rho; \varphi; z)$ точки M к прямоугольным $(x; y; z)$ используются формулы

$$\begin{cases} x = \rho \cos \varphi, \\ y = \rho \sin \varphi, \\ z = z. \end{cases} \quad (3.24)$$

Здесь $0 \leq \rho < +\infty$, $-\pi < \varphi \leq \pi$, $-\infty < z < +\infty$.

Отметим, что в цилиндрической системе координат уравнение $\rho = a$, $a > 0$, определяет круговую цилиндрическую поверхность, а уравнение $\varphi = \varphi_0$, $-\pi < \varphi_0 \leq \pi$, — полуплоскость, содержащую ось Oz и перпендикулярную плоскости $\mathcal{P}$ (плоскости Oxy).

Сферическая система координат. Пусть, как и в случае цилиндрической системы координат, в выбранной плоскости $\mathcal{P}$ в пространстве зафиксированы точка O — полюс, ось OP — полярная ось, а ось Oz проведена через точку O перпендикулярно к плоскости $\mathcal{P}$ (рис. 3.31).

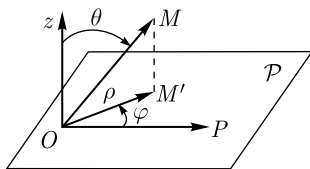


Рис. 3.31

Сферическими координатами точки M называется упорядоченная тройка чисел $(\rho; \varphi; \theta)$. Здесь параметр φ определяется так же, как и в цилиндрической системе координат: $\varphi = (\widehat{\overline{OM'}, \overline{OP}})$, где M' — ортогональная проекция точки M на плоскость $\mathcal{P}$. Однако координата ρ определяется иначе: $\rho = |\overline{OM}|$ — длина вектора $\overline{OM}$. Третья координата θ — это угол, образованный вектором $\overline{OM}$ с положительным направлением оси Oz .

Пределы изменения координат ρ, φ, θ :

$$\begin{cases} 0 \leq \rho < +\infty, \\ -\pi < \varphi \leq \pi, \\ 0 \leq \theta \leq \pi. \end{cases}$$

Согласование сферической системы координат с декартовой прямоугольной системой координат $Oxyz$ производится аналогично тому, как это было сделано в случае цилиндрической системы координат (рис. 3.32).

Из прямоугольных треугольников на рис. 3.32 получаем формулы, позволяющие перейти от сферических координат (ρ, φ, θ) точки M к ее прямоугольным координатам (x, y, z) :

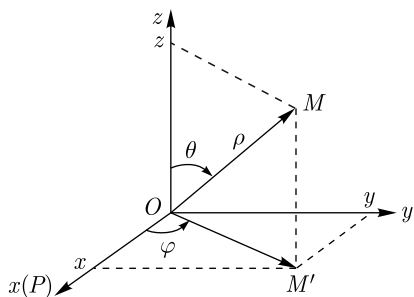


Рис. 3.32

$$\begin{cases} x = \rho \sin \theta \cos \varphi, \\ y = \rho \sin \theta \sin \varphi, \\ z = \rho \cos \theta. \end{cases} \quad (3.25)$$

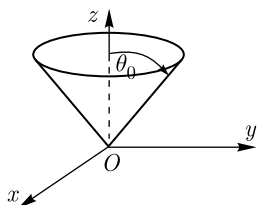


Рис. 3.33

Уравнение $\rho = a$, $a > 0$, в сферической системе координат определяет сферу радиуса a с центром в полюсе O . Уравнение $\theta = \theta_0$, $\theta_0 \in (0; \pi)$, является уравнением конической поверхности (рис. 3.33), а уравнение $\varphi = \varphi_0$, $\varphi_0 \in (-\pi, \pi]$, определяет полуплоскость, содержащую ось Oz и перпендикулярную плоскости Ox_1y_1 .

Пример 3.8. Найти цилиндрические и сферические координаты точки M с заданными прямоугольными координатами $(-2; -2\sqrt{3}; 3)$.

Решение. Цилиндрические координаты являются обобщением полярных координат. Поэтому переход от прямоугольных координат точки в пространстве к цилиндрическим в части координат ρ и φ осуществляется по формулам (3.23):

$$\rho = \sqrt{(-2\sqrt{3})^2 + (-2)^2} = 4;$$

$$\varphi = -\pi + \operatorname{arctg} \frac{(-2\sqrt{3})}{(-2)} = -\pi + \operatorname{arctg} \sqrt{3} = -\pi + \frac{\pi}{3} = -\frac{2}{3}\pi.$$

Координата z остается неизменной: $z = 3$.

Таким образом, упорядоченная тройка чисел $\left(4; -\frac{2}{3}\pi; 3\right)$ — цилиндрические координаты точки M .

Из определения сферических координат точки M и формул (3.25) получаем формулы для нахождения первой ρ и третьей θ координат. Угол φ находится по формулам (3.23). В данном примере:

$$\rho = \sqrt{(-2)^2 + (-2\sqrt{3})^2 + 3^2} = 5;$$

$$\theta = \arccos \frac{3}{5}; \quad \varphi = -\frac{2}{3}\pi,$$

и, как следствие, упорядоченная тройка чисел $\left(5; -\frac{2}{3}\pi; \arccos \frac{3}{5}\right)$ — сферические координаты точки M (рис. 3.34).

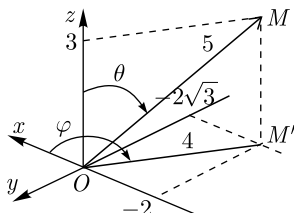


Рис. 3.34

Ответ: $\left(4; -\frac{2}{3}\pi; 3\right)$ — цилиндрические, $\left(5; -\frac{2}{3}\pi; \arccos \frac{3}{5}\right)$ — сферические координаты точки M .

Вопросы для самоконтроля к § 19–20

1. Дайте определение полярной системы координат.
2. Напишите формулы перехода от полярных координат точки $M(\rho; \varphi)$ к ее прямоугольным координатам $(x; y)$ и обратного перехода $(x; y) \mapsto (\rho; \varphi)$.
3. Запишите уравнения окружностей: а) $x^2 - 2x + y^2 = 0$; б) $x^2 + y^2 + 4y = 0$, в полярных координатах.
4. Постройте кривую Γ , уравнение которой в полярных координатах имеет следующий вид: $\rho = a \cos 3\varphi$.
5. Дайте определение цилиндрической системы координат.
6. Напишите формулы перехода от цилиндрических координат точки $M(\rho; \varphi; z)$ к ее прямоугольным координатам $(x; y; z)$.
7. Дайте определение сферической системы координат.
8. Какие поверхности в сферической системе координат задаются уравнениями: а) $\rho = 5$; б) $\varphi = \frac{\pi}{4}$; в) $\rho = 5, 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$?
9. Напишите формулы перехода от сферических координат точки $M(\rho; \varphi; \theta)$ к ее прямоугольным координатам $(x; y; z)$ и обратного перехода $(x; y; z) \mapsto (\rho; \varphi; \theta)$.

Ответы

3. а) $\rho = 2 \cos \varphi$; б) $\rho = -4 \sin \varphi$. 8. а) Сфера радиусом 5 с центром в начале координат; б) полуплоскость, содержащая ось Oz , перпендикулярную плоскости Oxy и образующую с ней угол $\varphi = \frac{\pi}{4}$; в) верхняя половина сферической поверхности ($z \geq 0$).

§ 21. Скалярное произведение векторов

21.1. Определения, свойства

Определение 3.25. *Скалярным произведением* двух векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ называется число (скаляр), равное произведению модулей (длин) этих векторов на косинус угла между ними.

Скалярное произведение векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ обозначается так: $(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ или $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$. Мы будем использовать обозначение $(\mathbf{a}, \mathbf{b})$. Таким образом,

$$(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \stackrel{\text{def}}{=} |\mathbf{a}| \cdot |\mathbf{b}| \cos \varphi, \quad (3.26)$$

где $\varphi = \widehat{(\mathbf{a}, \mathbf{b})}$.

Учитывая, что $|\mathbf{b}| \cos \varphi = \text{пр}_{\mathbf{a}} \mathbf{b}$ и $|\mathbf{a}| \cos \varphi = \text{пр}_{\mathbf{b}} \mathbf{a}$, скалярное произведение ненулевых векторов можно записать еще в одной форме:

$$(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = |\mathbf{a}| \text{пр}_{\mathbf{a}} \mathbf{b} = |\mathbf{b}| \text{пр}_{\mathbf{b}} \mathbf{a}. \quad (3.27)$$

Из (3.27) следуют формулы для вычисления значений алгебраических проекций одного ненулевого вектора на другой:

$$\text{пр}_{\mathbf{a}} \mathbf{b} = \frac{(\mathbf{a}, \mathbf{b})}{|\mathbf{a}|}, \quad \text{пр}_{\mathbf{b}} \mathbf{a} = \frac{(\mathbf{a}, \mathbf{b})}{|\mathbf{b}|}. \quad (3.28)$$

Из (3.26) получаем формулу для вычисления косинуса угла между ненулевыми векторами $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$:

$$\cos \varphi = \frac{(\mathbf{a}, \mathbf{b})}{|\mathbf{a}| \cdot |\mathbf{b}|}. \quad (3.29)$$

Скалярное произведение вектора $\mathbf{a}$ на себя

$$(\mathbf{a}, \mathbf{a}) = |\mathbf{a}| \cdot |\mathbf{a}| \cos 0^\circ = |\mathbf{a}|^2$$

называется *скалярным квадратом вектора $\mathbf{a}$* и обозначается $\mathbf{a}^2$, т. е. $\mathbf{a}^2 = (\mathbf{a}, \mathbf{a})$.

Из равенства $(\mathbf{a}, \mathbf{a}) = |\mathbf{a}|^2$ следует важная формула

$$|\mathbf{a}| = \sqrt{(\mathbf{a}, \mathbf{a})}. \quad (3.30)$$

Если хотя бы один из векторов $\mathbf{a}$ или $\mathbf{b}$ нулевой, то из (3.26) следует, что скалярное произведение $(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ равно нулю.

Скалярное произведение обладает следующими свойствами.

Алгебраические свойства. Для любых векторов $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{c}$ и любого действительного числа λ справедливы следующие свойства.

1. $(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = (\mathbf{b}, \mathbf{a})$ — *свойство коммутативности*.

Справедливость свойства 1 следует непосредственно из определения скалярного произведения и свойства коммутативности для действительных чисел.

2. $(\lambda \mathbf{a}, \mathbf{b}) = \lambda(\mathbf{a}, \mathbf{b})$.

Доказательство. Используя формулу (3.27) для скалярного произведения векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ и свойства алгебраических проекций, имеем для ненулевого вектора $\mathbf{b}$:

$$(\lambda \mathbf{a}, \mathbf{b}) = |\mathbf{b}| \text{пр}_{\mathbf{b}}(\lambda \mathbf{a}) = |\mathbf{b}|(\lambda \text{пр}_{\mathbf{b}} \mathbf{a}) = \lambda(|\mathbf{b}| \text{пр}_{\mathbf{b}} \mathbf{a}) = \lambda(\mathbf{a}, \mathbf{b}).$$

Если же вектор $\mathbf{b}$ нулевой, то $(\lambda \mathbf{a}, \mathbf{0}) = 0$ и $\lambda(\mathbf{a}, \mathbf{0}) = 0$. ■

3. $(\mathbf{a} + \mathbf{b}, \mathbf{c}) = (\mathbf{a}, \mathbf{c}) + (\mathbf{b}, \mathbf{c})$ — *свойство дистрибутивности*.

Доказательство. Имеем аналогично

$$\begin{aligned} (\mathbf{a} + \mathbf{b}, \mathbf{c}) &= |\mathbf{c}| \text{пр}_{\mathbf{c}}(\mathbf{a} + \mathbf{b}) = |\mathbf{c}|(\text{пр}_{\mathbf{c}} \mathbf{a} + \text{пр}_{\mathbf{c}} \mathbf{b}) = \\ &= |\mathbf{c}| \text{пр}_{\mathbf{c}} \mathbf{a} + |\mathbf{c}| \text{пр}_{\mathbf{c}} \mathbf{b} = (\mathbf{a}, \mathbf{c}) + (\mathbf{b}, \mathbf{c}), \end{aligned}$$

если $\mathbf{c} \neq \mathbf{0}$. Если же $\mathbf{c} = \mathbf{0}$, то $(\mathbf{a} + \mathbf{b}, \mathbf{0}) = 0$ и $(\mathbf{a}, \mathbf{0}) + (\mathbf{b}, \mathbf{0}) = 0 + 0 = 0$. ■

4. $\mathbf{a}^2 \geq 0$, причем $\mathbf{a}^2 = 0$ тогда и только тогда, когда $\mathbf{a} = \mathbf{0}$.

Это свойство очевидно:

$$\mathbf{a}^2 = |\mathbf{a}|^2 \geq 0, |\mathbf{a}|^2 = 0 \Leftrightarrow |\mathbf{a}| = 0 \Leftrightarrow \mathbf{a} = \mathbf{0}.$$

Геометрические свойства.

$$1. \quad \mathbf{a} \perp \mathbf{b} \Leftrightarrow (\mathbf{a}, \mathbf{b}) = 0. \quad (3.31)$$

Доказательство. Ненулевой вектор $\mathbf{a}$ ортогонален (перпендикулярен) вектору $\mathbf{b}$ ($\mathbf{b} \neq \mathbf{0}$), если угол φ между ними равен $\frac{\pi}{2}$. В этом случае $\cos \varphi = \cos \frac{\pi}{2} = 0$ и $(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = 0$. Если хотя бы один из векторов нулевой, то, как уже отмечалось выше, его можно считать ортогональным любому другому вектору и скалярное произведение также равно нулю.

Обратно, если скалярное произведение $(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = 0$, то из формулы (3.26) следует, что либо $|\mathbf{a}| = 0$ или (и) $|\mathbf{b}| = 0$, либо $\cos \varphi = 0$. Если $|\mathbf{a}| = 0$ или $|\mathbf{b}| = 0$, то нулевой вектор можно считать ортогональным любому другому вектору, т. е. $\mathbf{a} \perp \mathbf{b}$. Если же $|\mathbf{a}| \neq 0$ и $|\mathbf{b}| \neq 0$, а $\cos \varphi = 0$, то $\varphi = \frac{\pi}{2}$ и вектор $\mathbf{a}$ ортогонален вектору $\mathbf{b}$. ■

2. Если $(\mathbf{a}, \mathbf{b}) > 0$, то $0 \leq \varphi < \frac{\pi}{2}$ (угол φ острый);

если $(\mathbf{a}, \mathbf{b}) < 0$, то $\frac{\pi}{2} \leq \varphi < \pi$ (угол φ тупой).

Это свойство очевидно. Действительно, если $(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \neq 0$, то $|\mathbf{a}| \cdot |\mathbf{b}| > 0$ и знак скалярного произведения $(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ определяется знаком косинуса угла φ (формула (3.26)):

$$(\mathbf{a}, \mathbf{b}) > 0 \Leftrightarrow \cos \varphi > 0 \Leftrightarrow 0 \leq \varphi < \frac{\pi}{2};$$

$$(\mathbf{a}, \mathbf{b}) < 0 \Leftrightarrow \cos \varphi < 0 \Leftrightarrow \frac{\pi}{2} < \varphi \leq \pi.$$

21.2. Скалярное произведение в координатной форме

Пусть векторы $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ заданы своими координатами в ортонормированном базисе $\langle \mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k} \rangle$:

$$\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k},$$

$$\mathbf{b} = b_x \mathbf{i} + b_y \mathbf{j} + b_z \mathbf{k}.$$

Теорема 3.10. Если $\mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z)$, $\mathbf{b} = (b_x, b_y, b_z)$ — координаты векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ в ортонормированном базисе, то

$$\boxed{(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z}. \quad (3.32)$$

Доказательство. Предварительно заметим, что $(\mathbf{i}, \mathbf{i}) = |\mathbf{i}|^2 = 1$. Аналогично $(\mathbf{j}, \mathbf{j}) = 1$ и $(\mathbf{k}, \mathbf{k}) = 1$. Для других комбинаций векторов $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ с учетом их попарной перпендикулярности имеем

$$(\mathbf{i}, \mathbf{j}) = (\mathbf{i}, \mathbf{k}) = (\mathbf{j}, \mathbf{k}) = 0.$$

Используя эти замечания и алгебраические свойства 1–3 скалярного произведения, получаем

$$\begin{aligned} (\mathbf{a}, \mathbf{b}) &= (a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k}, b_x \mathbf{i} + b_y \mathbf{j} + b_z \mathbf{k}) = \\ &= a_x b_x (\mathbf{i}, \mathbf{i}) + a_x b_y (\mathbf{i}, \mathbf{j}) + a_x b_z (\mathbf{i}, \mathbf{k}) + a_y b_x (\mathbf{j}, \mathbf{i}) + a_y b_y (\mathbf{j}, \mathbf{j}) + \\ &\quad + a_y b_z (\mathbf{j}, \mathbf{k}) + a_z b_x (\mathbf{k}, \mathbf{i}) + a_z b_y (\mathbf{k}, \mathbf{j}) + a_z b_z (\mathbf{k}, \mathbf{k}) = \\ &= a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z. \blacksquare \end{aligned}$$

Замечание. Если векторы $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ заданы своими координатами в косоугольном базисе $\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3 \rangle$, то скалярное произведение $(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ будет равно

$$\begin{aligned} (\mathbf{a}, \mathbf{b}) &= a_x b_x |\mathbf{e}_1|^2 + a_x b_y (\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) + a_x b_z (\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_3) + a_y b_x (\mathbf{e}_2, \mathbf{e}_1) + \\ &\quad + a_y b_y |\mathbf{e}_2|^2 + a_y b_z (\mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3) + a_z b_x (\mathbf{e}_3, \mathbf{e}_1) + a_z b_y (\mathbf{e}_3, \mathbf{e}_2) + a_z b_z |\mathbf{e}_3|^2, \end{aligned}$$

откуда с учетом коммутативности скалярного произведения получаем окончательно

$$(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = a_x b_x |\mathbf{e}_2|^2 + a_y b_y |\mathbf{e}_2|^2 + a_z b_z |\mathbf{e}_3|^2 + (a_x b_y + a_y b_x)(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) + \\ + (a_x b_z + a_z b_x)(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_3) + (a_y b_z + a_z b_y)(\mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3).$$

Таким образом, только в ортогональном и, в частности, в ортонормированном базисе получаются лаконичные формулы для вычисления скалярного произведения векторов в координатной форме.

Задание векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ своими координатами в ортонормированном базисе позволяет переписать в координатной форме и основные формулы (3.28)–(3.30). Так, в частности, имеем:

$$|\mathbf{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}; \quad (3.33)$$

$$|\mathbf{b}| = \sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2};$$

$$\text{пр}_{\mathbf{a}} \mathbf{b} = \frac{a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}}, \quad \mathbf{a} \neq \mathbf{0}; \quad (3.34)$$

$$\text{пр}_{\mathbf{b}} \mathbf{a} = \frac{a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z}{\sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2}}, \quad \mathbf{b} \neq \mathbf{0}.$$

$$\cos \varphi = \frac{a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2}}, \quad \mathbf{a} \neq \mathbf{0}, \quad \mathbf{b} \neq \mathbf{0}. \quad (3.35)$$

Условие ортогональности векторов (3.31) в координатной форме принимает следующий вид:

$$\boxed{\mathbf{a} \perp \mathbf{b} \Leftrightarrow a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z = 0}. \quad (3.36)$$

Рассмотрим ряд типовых примеров на применение скалярного произведения.

Пример 3.9. Найти модуль вектора $\mathbf{a} = 4\mathbf{m} - 3\mathbf{n}$, если $|\mathbf{m}| = 2$, $|\mathbf{n}| = 3$, $(\widehat{\mathbf{m}, \mathbf{n}}) = 120^\circ$.

Решение. В соответствии с формулой (3.30) имеем

$$|\mathbf{a}| = \sqrt{(4\mathbf{m} - 3\mathbf{n}, 4\mathbf{m} - 3\mathbf{n})} = \sqrt{16\mathbf{m}^2 - 24(\mathbf{m}, \mathbf{n}) + 9\mathbf{n}^2} = \\ = \sqrt{16 \cdot 4 - 24 \cdot 2 \cdot 3 \left(-\frac{1}{2}\right) + 9 \cdot 9} = \sqrt{217}.$$

Ответ: $|\mathbf{a}| = \sqrt{217}$.

Пример 3.10. Найти угол φ между векторами $\mathbf{a} = (\sqrt{3}; -1; 2\sqrt{3})$ и $\mathbf{b} = (2; 2; -1)$, заданными своими координатами в ортонормированном базисе $\langle \mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k} \rangle$, и алгебраическую проекцию вектора $\mathbf{b}$ на вектор $\mathbf{a}$.

Решение. Вычислим $|\mathbf{a}|$, $|\mathbf{b}|$ и скалярное произведение $(\mathbf{a}, \mathbf{b})$:

$$|\mathbf{a}| = \sqrt{(\sqrt{3})^2 + (-1)^2 + (2\sqrt{3})^2} = 4;$$

$$|\mathbf{b}| = \sqrt{2^2 + 2^2 + (-1)^2} = 3;$$

$$(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \sqrt{3} \cdot 2 + (-1)2 + 2\sqrt{3}(-1) = -2.$$

Используя формулы (3.35) и (3.34), находим:

$$\cos \varphi = \frac{-2}{4 \cdot 3} = -\frac{1}{6}, \quad \text{пр}_{\mathbf{a}} \mathbf{b} = \frac{-2}{4} = -\frac{1}{2},$$

откуда $\varphi = \arccos \left(-\frac{1}{6} \right) = \pi - \arccos \frac{1}{6}$.

Ответ: $\varphi = \pi - \arccos \frac{1}{6}$; $\text{пр}_{\mathbf{a}} \mathbf{b} = -0,5$.

Пример 3.11. Вычислить работу силы $\mathbf{F} = 2\mathbf{i} + 3\mathbf{j} - \mathbf{k}$ при перемещении материальной точки из начала $A(-2; 1; -1)$ вектора $\overline{AB}$ в его конец $B(1; 3; 2)$.

Решение. Работа силы $\mathbf{F}$ по перемещению материальной точки M из точки A в точку B находится по формуле

$$A = (\mathbf{F}, \overline{AB}).$$

Поскольку $\mathbf{F} = (2; 3; -1)$, $\overline{AB} = (3; 2; 3)$ в условиях данного примера, то работа

$$A = ((2; 3; -1), (3; 2; 3)) = 2 \cdot 3 + 3 \cdot 2 + (-1)3 = 9.$$

Ответ: $A = 9$.

Пример 3.12. Вектор $\mathbf{x}$, перпендикулярный векторам $\mathbf{a} = (2; -1; -3)$ и $\mathbf{b} = (-1; 1; 4)$, имеет длину $|\mathbf{x}| = 9\sqrt{3}$. Найти координаты вектора $\mathbf{x}$.

Решение. Пусть $\mathbf{x} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$. Тогда, используя условие ортогональности векторов в координатной форме (3.36) и формулу (3.33), получаем систему нелинейных уравнений

$$\begin{cases} 2x - y - 3z = 0, \\ -x + y + 4z = 0, \\ x^2 + y^2 + z^2 = 243. \end{cases}$$

Сложив первые два уравнения системы, получим $z = -x$. Из первого (или из второго) уравнения найдем $y = 5x$. Третье уравнение принимает вид

$$x^2 + (5x)^2 + (-x)^2 = 243,$$

откуда $x = \pm 3$, $y = \pm 15$, $z = \mp 3$.

Ответ: $\mathbf{x} = (3; 15; -3)$ или $\mathbf{x} = (-3; -15; 3)$.

§ 22. Векторное и смешанное произведения векторов

22.1. Векторное произведение: определения, свойства

Определение 3.26. Векторным произведением двух неколлинеарных векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ называется вектор $\mathbf{c}$, удовлетворяющий следующим трем условиям:

- 1) $|\mathbf{c}| = |\mathbf{a}| \cdot |\mathbf{b}| \sin \varphi$, где $\varphi = \widehat{(\mathbf{a}, \mathbf{b})}$;
- 2) $\mathbf{c} \perp \mathbf{a}$, $\mathbf{c} \perp \mathbf{b}$, т. е. вектор $\mathbf{c}$ перпендикулярен плоскости векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$;
- 3) тройка векторов $\langle \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c} \rangle$ — правая.

Если вектор $\mathbf{a}$ коллинеарен вектору $\mathbf{b}$, в частности, если хотя бы один из векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ нулевой, то векторное произведение $\mathbf{a}$ на $\mathbf{b}$ равно $\mathbf{0}$ по определению.

Обозначается векторное произведение следующим образом: $[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$ или $\mathbf{a} \times \mathbf{b}$. Мы будем пользоваться обозначением $[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$.

Из условия 1) определения 3.26 и формулы для площади параллелограмма следует, что модуль вектора $[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$ численно равен площади параллелограмма, построенного на векторах $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ (для неколлинеарных векторов).

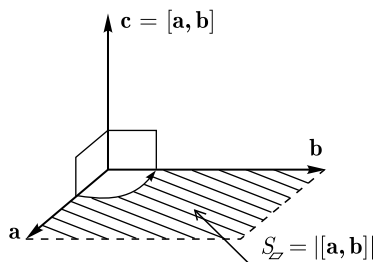


Рис. 3.35

Иллюстрация к условиям 1)–3) определения векторного произведения приведена на рис. 3.35.

Векторное произведение имеет следующие алгебраические свойства, справедливые для любых векторов $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{c}$ и произвольного числа λ ($\lambda \in \mathbb{R}$):

1. $[\mathbf{a}, \mathbf{b}] = -[\mathbf{b}, \mathbf{a}]$ (свойство антикоммутативности);
2. $[\lambda \mathbf{a}, \mathbf{b}] = \lambda [\mathbf{a}, \mathbf{b}]$;
3. $[\mathbf{a} + \mathbf{b}, \mathbf{c}] = [\mathbf{a}, \mathbf{c}] + [\mathbf{b}, \mathbf{c}]$ (свойство дистрибутивности).

Для коллинеарных векторов $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ векторные произведения в обеих частях равенств 1 и 2 будут равны нулевому вектору. Поэтому свойства 1–2 достаточно доказать только для неколлинеарных векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$.

Доказательство свойства 1. В соответствии с определением равенства векторов ($\mathbf{a} = \mathbf{b} \Leftrightarrow |\mathbf{a}| = |\mathbf{b}|$ & $\mathbf{a} \uparrow \uparrow \mathbf{b}$) достаточно доказать, что:

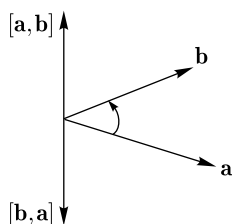


Рис. 3.36

$$\text{а) } | -[\mathbf{b}, \mathbf{a}] | = | [\mathbf{a}, \mathbf{b}] |;$$

$$\text{б) } [\mathbf{b}, \mathbf{a}] \uparrow \downarrow [\mathbf{a}, \mathbf{b}].$$

Имеем:

$$\text{а) } | -[\mathbf{b}, \mathbf{a}] | = | [\mathbf{b}, \mathbf{a}] | = |\mathbf{b}| \cdot |\mathbf{a}| \sin \varphi = |\mathbf{a}| \cdot |\mathbf{b}| \sin \varphi = | [\mathbf{a}, \mathbf{b}] |;$$

б) согласно условию 2) определения векторного произведения векторы $[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$ и $[\mathbf{b}, \mathbf{a}]$ одновременно перпендикулярны плоскости, в которой лежат векторы $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$, и потому коллинеарны. Осталось показать, что они имеют противоположные направления. Если допустить, что вектор $[\mathbf{b}, \mathbf{a}]$ сонаправлен с $[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$, то тройка $\langle \mathbf{b}, \mathbf{a}, [\mathbf{b}, \mathbf{a}] \rangle$ будет левой, а по определению векторного произведения она должна быть правой. Поэтому остается второй вариант — вектор $[\mathbf{b}, \mathbf{a}]$ направлен в противоположную сторону от вектора $[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$. В этом случае тройка векторов $\langle \mathbf{b}, \mathbf{a}, [\mathbf{b}, \mathbf{a}] \rangle$ будет правой (рис. 3.36). ■

Доказательство свойства 2. В целом доказательство проводится аналогично доказательству свойства 1.

Если $\lambda = 0$, то равенство 2 очевидно. Пусть $\lambda \neq 0$.

Если $\varphi = (\widehat{\mathbf{a}, \mathbf{b}})$, то угол между векторами $\lambda \mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ равен φ при $\lambda > 0$ и $\pi - \varphi$ при $\lambda < 0$. Однако $\sin(\pi - \varphi) = \sin \varphi$ и потому для любого $\lambda \neq 0$ получаем:

$$|[\lambda \mathbf{a}, \mathbf{b}]| = |\lambda \mathbf{a}| \cdot |\mathbf{b}| \sin \varphi = |\lambda| \cdot |\mathbf{a}| \cdot |\mathbf{b}| \sin \varphi$$

и

$$|\lambda [\mathbf{a}, \mathbf{b}]| = |\lambda| \cdot |\mathbf{a}| \cdot |\mathbf{b}| \sin \varphi.$$

Отсюда следует, что $|\lambda [\mathbf{a}, \mathbf{b}]| = |\lambda [\mathbf{a}, \mathbf{b}]|$.

Векторы $[\lambda \mathbf{a}, \mathbf{b}]$ и $\lambda [\mathbf{a}, \mathbf{b}]$, очевидно, коллинеарны и, как доказано, имеют равную длину. Докажем, что они сонаправлены.

Если $\lambda > 0$, то $\lambda \mathbf{a} \uparrow\uparrow \mathbf{a}$ и, как следствие,

$$[\lambda \mathbf{a}, \mathbf{b}] \uparrow\uparrow [\mathbf{a}, \mathbf{b}], \quad [\lambda \mathbf{a}, \mathbf{b}] \uparrow\uparrow \lambda [\mathbf{a}, \mathbf{b}].$$

Если же $\lambda < 0$, то $\lambda \mathbf{a} \uparrow\downarrow \mathbf{a}$ и потому $[\lambda \mathbf{a}, \mathbf{b}] \uparrow\downarrow [\mathbf{a}, \mathbf{b}]$. Но вектор $\lambda [\mathbf{a}, \mathbf{b}]$ при $\lambda < 0$ и вектор $[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$ имеют противоположные направления. В итоге получается, что и в этом случае (при $\lambda < 0$) векторы $[\lambda \mathbf{a}, \mathbf{b}]$ и $\lambda [\mathbf{a}, \mathbf{b}]$ сонаправлены. ■

Перед доказательством свойства дистрибутивности векторного произведения рассмотрим еще одну операцию с векторами — *смешанное произведение векторов*.

22.2. Смешанное произведение: определения, свойства

Определение 3.27. *Смешанным произведением* трех векторов $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{c}$ называется число, равное скалярному произведению вектора $[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$ на вектор $\mathbf{c}$.

Обозначается смешанное произведение символом $\mathbf{abc}$ или $(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c})$. Мы будем в основном использовать первое из этих обозначений. Таким образом,

$$\boxed{\mathbf{abc} \stackrel{\text{def}}{=} ([\mathbf{a}, \mathbf{b}], \mathbf{c})}, \quad (3.37)$$

т. е. смешанное произведение равно скалярному произведению векторного произведения первых двух векторов на третий.

Теорема 3.11. *Модуль смешанного произведения трех некопланарных векторов равен объему параллелепипеда, построенного на этих векторах как на ребрах.*

Доказательство. Пусть основанием параллелепипеда является грань, образованная векторами $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ (рис. 3.37).

Объем v параллелепипеда равен произведению площади основания $S_{\square} = |[\mathbf{a}, \mathbf{b}]|$ на высоту h . Поскольку высота h параллелепипеда равна модулю проекции вектора $\mathbf{c}$ на вектор $[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$, т. е. $h = |\text{пр}_{[\mathbf{a}, \mathbf{b}]} \mathbf{c}|$, то

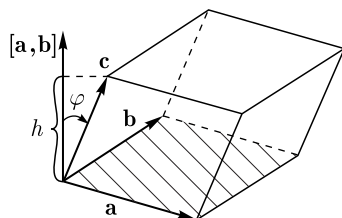


Рис. 3.37

$$\begin{aligned} v &= S_{\square} h = |[\mathbf{a}, \mathbf{b}]| \cdot |\text{пр}_{[\mathbf{a}, \mathbf{b}]} \mathbf{c}| = \\ &= |\text{согласно (3.27)}| = |([\mathbf{a}, \mathbf{b}], \mathbf{c})|. \quad \blacksquare \end{aligned}$$

Следствие 1. *Если φ — угол между векторами $[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$ и $\mathbf{c}$ (рис. 3.37) и $0 < \varphi < 90^\circ$, то векторы $[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$ и $\mathbf{c}$ находятся по одну сторону от плоскости векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$, а тройка векторов $\langle \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c} \rangle$, взятых в указанном*

порядке, является правой. Кроме того, $\text{pr}_{[a,b]}c > 0$, и поэтому смешанное произведение $\mathbf{abc} > 0$.

Если же $90^\circ < \varphi < 180^\circ$, то $\cos \varphi < 0$, $\text{pr}_{[a,b]}c < 0$, и поэтому $\mathbf{abc} < 0$. Тройка векторов $\langle \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c} \rangle$ в этом случае будет левой.

Таким образом, если:

$\mathbf{abc} > 0$, то упорядоченная тройка векторов $\langle \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c} \rangle$ является правой,

$\mathbf{abc} < 0$, то тройка $\langle \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c} \rangle$ — левая.

Следствие 2.

$$([\mathbf{a}, \mathbf{b}], \mathbf{c}) = (\mathbf{a}, [\mathbf{b}, \mathbf{c}]) = ([\mathbf{b}, \mathbf{c}], \mathbf{a}). \quad (3.38)$$

Доказательство. При вычислении объема параллелепипеда в качестве его основания можно взять любую из шести граней. Поэтому

$$v = |([\mathbf{a}, \mathbf{b}], \mathbf{c})| = |(\mathbf{a}, [\mathbf{b}, \mathbf{c}])|.$$

При этом тройки векторов $\langle \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c} \rangle$ и $\langle \mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{a} \rangle$ имеют одинаковую ориентацию.

Все это с учетом свойства коммутативности скалярного произведения позволяет заключить, что равенства (3.38) верны. ■

Распространяя свойство 2 на другие комбинации векторов $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{c}$, получаем цепочку равенств —

Следствие 3.

$$\boxed{\mathbf{abc} = \mathbf{bca} = \mathbf{cab}}. \quad (3.39)$$

Если в этих равенствах поменять местами первые два вектора, то, с учетом свойства антикоммутативности векторного произведения $([\mathbf{a}, \mathbf{b}] = -[\mathbf{b}, \mathbf{a}], [\mathbf{b}, \mathbf{c}] = -[\mathbf{c}, \mathbf{b}], [\mathbf{c}, \mathbf{a}] = -[\mathbf{a}, \mathbf{c}])$, получаем еще одну цепочку равенств

$$\mathbf{abc} = -\mathbf{bac} = -\mathbf{acb} = -\mathbf{cba}. \quad (3.40)$$

Второе и третье равенства в (3.39) получаются из предыдущих циклической перестановкой первого вектора в конец произведения. Получающиеся при этом упорядоченные тройки векторов имеют одинаковую ориентацию.

Равенства $-\mathbf{bac} = -\mathbf{acb} = -\mathbf{cba}$ в (3.40) также получаются циклической перестановкой первого вектора в конец произведения. Эти тройки векторов имеют уже другую, противоположную ориентацию векторов.

Следствие 4. Векторы $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{c}$ компланарны тогда и только тогда, когда их смешанное произведение равно нулю.

Доказательство. Если хотя бы один из трех векторов нулевой, то утверждение очевидно. Если же все векторы имеют ненулевую длину, то $\mathbf{abc} = 0 \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{a}, \mathbf{b} \end{bmatrix} \perp \mathbf{c}$, Однако $\begin{bmatrix} \mathbf{a}, \mathbf{b} \end{bmatrix} = 0 \Leftrightarrow \mathbf{a} \parallel \mathbf{b}$.

вектор $[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$ перпендикулярен векторам $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$. Отсюда следует, что векторы $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{c}$ лежат в одной плоскости, т. е. компланарны. ■

Таким образом, равенство нулю смешанного произведения ($\mathbf{abc} = 0$) является *необходимым и достаточным* условием их *компланарности*.

Докажем теперь свойство дистрибутивности векторного произведения. Предварительно установим справедливость следующего утверждения.

Теорема 3.12. *Если $(\mathbf{a}, \mathbf{y}) = (\mathbf{b}, \mathbf{y})$ для любого вектора $\mathbf{y}$ из соответствующего векторного пространства $\mathbb{V}^k$, то $\mathbf{a} = \mathbf{b}$.*

Доказательство. Имеет место эквивалентность $(\mathbf{a}, \mathbf{y}) = (\mathbf{b}, \mathbf{y}) \Leftrightarrow (\mathbf{a} - \mathbf{b}, \mathbf{y}) = 0$, в частности, при $\mathbf{y} = \mathbf{a} - \mathbf{b}$. Но в этом случае $(\mathbf{a} - \mathbf{b}, \mathbf{y}) = (\mathbf{a} - \mathbf{b})^2 = 0$, а это равенство возможно только при $\mathbf{a} - \mathbf{b} = \mathbf{0}$, или $\mathbf{a} = \mathbf{b}$. ■

Доказательство свойства 3 векторного произведения. Требуется доказать, что

$$\forall \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c} \in \mathbb{V}^3 : [\mathbf{a} + \mathbf{b}, \mathbf{c}] = [\mathbf{a}, \mathbf{c}] + [\mathbf{b}, \mathbf{c}].$$

Согласно теореме 3.12 данное равенство будет доказано, если будет установлена справедливость равенства

$$([\mathbf{a} + \mathbf{b}, \mathbf{c}], \mathbf{y}) = ([\mathbf{a}, \mathbf{c}] + [\mathbf{b}, \mathbf{c}], \mathbf{y}) \quad (3.41)$$

для произвольного вектора $\mathbf{y} \in \mathbb{V}^3$.

Имеем

$$\begin{aligned} ([\mathbf{a} + \mathbf{b}, \mathbf{c}], \mathbf{y}) &= (\mathbf{a} + \mathbf{b}, [\mathbf{c}, \mathbf{y}]) = (\mathbf{a}, [\mathbf{c}, \mathbf{y}]) + (\mathbf{b}, [\mathbf{c}, \mathbf{y}]) = \\ &= ([\mathbf{a}, \mathbf{c}], \mathbf{y}) + ([\mathbf{b}, \mathbf{c}], \mathbf{y}) = ([\mathbf{a}, \mathbf{c}] + [\mathbf{b}, \mathbf{c}], \mathbf{y}). \end{aligned}$$

На первом шаге мы воспользовались свойством (3.38) смешанного произведения, затем свойством дистрибутивности скалярного произведения и вновь свойством (3.38). Таким образом, равенство (3.41) доказано, что, в свою очередь, влечет за собой справедливость свойства 3 векторного произведения. ■

§ 23. Векторное и смешанное произведения в координатной форме

23.1. Векторное произведение

Пусть векторы $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ заданы своими координатами в ортонормированном базисе $\langle \mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k} \rangle$:

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k}, \\ \mathbf{b} &= b_x \mathbf{i} + b_y \mathbf{j} + b_z \mathbf{k}. \end{aligned}$$

Теорема 3.13. Если (a_x, a_y, a_z) , (b_x, b_y, b_z) — координаты векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ соответственно в ортонормированном базисе, то векторное произведение $[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$ определяется символической формулой

$$[\mathbf{a}, \mathbf{b}] = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix}. \quad (3.42)$$

Доказательство. Вывод формулы (3.42) производится с использованием свойств 1–3 векторного произведения. При умножении правых частей векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ появляется векторное произведение базисных векторов. Результаты этих произведений приведены в таблице.

$\mathbf{e}_1$	$\mathbf{e}_2$	$\mathbf{i}$	$\mathbf{j}$	$\mathbf{k}$
$\mathbf{i}$	0	$\mathbf{k}$	$-\mathbf{j}$	
$\mathbf{j}$	$-\mathbf{k}$	0	$\mathbf{i}$	
$\mathbf{k}$	$\mathbf{j}$	$-\mathbf{i}$	0	

Векторные произведения базисных векторов на себя равны нулевому вектору по определению. Покажем, как находятся векторные произведения разноименных базисных векторов.

Пусть $[\mathbf{i}, \mathbf{j}] = \mathbf{c}$. Покажем, что вектор $\mathbf{c}$ совпадает с базисным вектором $\mathbf{k}$. По определению 3.26:

$$1) |\mathbf{c}| = |\mathbf{i}| \cdot |\mathbf{j}| \sin \frac{\pi}{2} = 1;$$

$$2) \mathbf{c} \perp \mathbf{i} \text{ и } \mathbf{c} \perp \mathbf{j};$$

3) упорядоченная тройка векторов $\langle \mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{c} \rangle$ должна быть правой.

Этим условиям удовлетворяет единственный вектор $\mathbf{c} = \mathbf{k}$ (рис. 3.38).

Аналогично устанавливаются равенства $[\mathbf{i}, \mathbf{k}] = -\mathbf{j}$, $[\mathbf{j}, \mathbf{k}] = \mathbf{i}$. Оставшиеся три равенства $[\mathbf{j}, \mathbf{i}] = -\mathbf{k}$, $[\mathbf{k}, \mathbf{i}] = \mathbf{j}$ и $[\mathbf{k}, \mathbf{j}] = -\mathbf{i}$ следуют из свойства антикоммутативности векторного произведения.

Переходим к выводу формулы (3.42):

$$\begin{aligned} [\mathbf{a}, \mathbf{b}] &= [a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k}, b_x \mathbf{i} + b_y \mathbf{j} + b_z \mathbf{k}] = \\ &= a_x b_x [\mathbf{i}, \mathbf{i}] + a_x b_y [\mathbf{i}, \mathbf{j}] + a_x b_z [\mathbf{i}, \mathbf{k}] + a_y b_x [\mathbf{j}, \mathbf{i}] + a_y b_y [\mathbf{j}, \mathbf{j}] + \\ &\quad + a_y b_z [\mathbf{j}, \mathbf{k}] + a_z b_x [\mathbf{k}, \mathbf{i}] + a_z b_y [\mathbf{k}, \mathbf{j}] + a_z b_z [\mathbf{k}, \mathbf{k}] = \\ &= a_x b_y \mathbf{k} - a_x b_z \mathbf{j} - a_y b_x \mathbf{k} + a_y b_z \mathbf{i} + a_z b_x \mathbf{j} - a_z b_y \mathbf{i} = \\ &= (a_y b_z - a_z b_y) \mathbf{i} - (a_x b_z - a_z b_x) \mathbf{j} + (a_x b_y - a_y b_x) \mathbf{k} = \\ &= \begin{vmatrix} a_y & a_z \\ b_y & b_z \end{vmatrix} \mathbf{i} - \begin{vmatrix} a_x & a_z \\ b_x & b_z \end{vmatrix} \mathbf{j} + \begin{vmatrix} a_x & a_y \\ b_x & b_y \end{vmatrix} \mathbf{k}. \end{aligned} \quad (3.43)$$

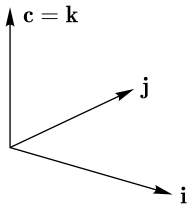


Рис. 3.38

Полученное выражение можно рассматривать как разложение символического определителя третьего порядка (3.42) по первой строке. ■

Замечание. В первой строке определителя в формуле (3.42) выписаны векторы $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$, а во второй и в третьей — координаты векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ соответственно, т. е. числа. По этой причине формулу (3.42) и определитель в ней называют символическими. Использование этой формулы, а не (3.43) при записи векторного произведения векторов, заданных своими координатами в ортонормированном базисе, обусловлено простотой данной формулы для запоминания. Вместе с тем нужно понимать, что это лишь символическая форма записи векторного произведения в координатной форме.

23.2. Смешанное произведение

Теперь получим смешанное произведение векторов в координатной форме.

Теорема 3.14. *Если векторы $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ заданы своими координатами:*

$$\mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z), \quad \mathbf{b} = (b_x, b_y, b_z), \quad \mathbf{c} = (c_x, c_y, c_z)$$

в ортонормированном базисе $\langle \mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k} \rangle$, то

$$\mathbf{abc} = \begin{vmatrix} a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \\ c_x & c_y & c_z \end{vmatrix}. \quad (3.44)$$

Доказательство. Используя разложение (3.43) вектора $[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$ по базису $\langle \mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k} \rangle$ и формулу (3.32) скалярного произведения векторов, заданных своими координатами в ортонормированном базисе, получаем

$$\begin{aligned} ([\mathbf{a}, \mathbf{b}], \mathbf{c}) &= \left(\begin{vmatrix} a_y & a_z \\ b_y & b_z \end{vmatrix} \mathbf{i} - \begin{vmatrix} a_x & a_z \\ b_x & b_z \end{vmatrix} \mathbf{j} + \begin{vmatrix} a_x & a_y \\ b_x & b_y \end{vmatrix} \mathbf{k}, c_x \mathbf{i} + c_y \mathbf{j} + c_z \mathbf{k} \right) = \\ &= c_x \begin{vmatrix} a_y & a_z \\ b_y & b_z \end{vmatrix} - c_y \begin{vmatrix} a_x & a_z \\ b_x & b_z \end{vmatrix} + c_z \begin{vmatrix} a_x & a_y \\ b_x & b_y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \\ c_x & c_y & c_z \end{vmatrix}. \quad \blacksquare \end{aligned}$$

Таким образом, для нахождения смешанного произведения $\mathbf{abc}$ векторов, заданных своими координатами в ортонормированном базисе, необходимо составить определитель, в первой строке которого записаны координаты первого вектора $\mathbf{a}$, во второй — вектора $\mathbf{b}$ и в третьей — вектора $\mathbf{c}$.

23.3. Геометрические приложения векторного и смешанного произведений

1. Площади параллелограмма и треугольника, построенных на неколлинеарных векторах $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$, находятся соответственно по формулам:

$$S_{\square} = |[\mathbf{a}, \mathbf{b}]|; \quad (3.45)$$

$$S_{\Delta} = \frac{1}{2} |[\mathbf{a}, \mathbf{b}]|. \quad (3.46)$$

2. Объемы параллелепипеда и пирамиды (тетраэдра), построенных на некомпланарных векторах $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{c}$, находятся соответственно по формулам:

$$V_{\text{парал}} = |\mathbf{abc}|; \quad (3.47)$$

$$V_{\text{пир}} = \frac{1}{6} |\mathbf{abc}|. \quad (3.48)$$

3. Если смешанное произведение $\mathbf{abc}$ положительно ($\mathbf{abc} > 0$), то тройка векторов $\langle \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c} \rangle$ — правая; если же $\mathbf{abc} < 0$, то $\langle \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c} \rangle$ — левая тройка.

4. Векторы $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{c}$ образуют базис в пространстве V^3 , если $\mathbf{abc} \neq 0$.

5. Если $\mathbf{F}$ — сила, приложенная к точке M , то момент этой силы $m_A(\mathbf{F})$ относительно точки A равен векторному произведению векторов $\overline{AM}$ и $\mathbf{F}$, т. е.

$$m_A(\mathbf{F}) = [\overline{AM}, \mathbf{F}]. \quad (3.49)$$

Пример 3.13. Пусть $\mathbf{a} = 3\mathbf{i} + 2\mathbf{j} - \mathbf{k}$, $\mathbf{b} = \mathbf{i} + 2\mathbf{k}$. Найти вектор $[2\mathbf{a} + \mathbf{b}, \mathbf{b} - \mathbf{a}]$ и площадь параллелограмма, построенного на векторах $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$.

Решение. Вектор $[2\mathbf{a} + \mathbf{b}, \mathbf{b} - \mathbf{a}]$ можно найти двумя способами.

Способ 1. Используя свойства 1–3 векторного произведения, получаем

$$[2\mathbf{a} + \mathbf{b}, \mathbf{b} - \mathbf{a}] = 2[\mathbf{a}, \mathbf{b}] - 2[\mathbf{a}, \mathbf{a}] + [\mathbf{b}, \mathbf{b}] - [\mathbf{b}, \mathbf{a}] = 3[\mathbf{a}, \mathbf{b}].$$

По формуле (3.42)

$$[\mathbf{a}, \mathbf{b}] = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 3 & 2 & -1 \\ 1 & 0 & 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2 & -1 \\ 0 & 2 \end{vmatrix} \mathbf{i} - \begin{vmatrix} 3 & -1 \\ 1 & 2 \end{vmatrix} \mathbf{j} + \begin{vmatrix} 3 & 2 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} \mathbf{k} = 4\mathbf{i} - 7\mathbf{j} - 2\mathbf{k}.$$

Окончательно

$$[2\mathbf{a} + \mathbf{b}, \mathbf{b} - \mathbf{a}] = 3(4\mathbf{i} - 7\mathbf{j} - 2\mathbf{k}) = 12\mathbf{i} - 21\mathbf{j} - 6\mathbf{k}.$$

Способ 2. Поскольку

$$2\mathbf{a} + \mathbf{b} = 2(3; 2; -1) + (1; 0; 2) = (7; 4; 0),$$

$$\mathbf{b} - \mathbf{a} = (1; 0; 2) - (3; 2; -1) = (-2; -2; 3),$$

то в соответствии с формулой (3.42) имеем

$$[2\mathbf{a} + \mathbf{b}, \mathbf{b} - \mathbf{a}] = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 7 & 4 & 0 \\ -2 & -2 & 3 \end{vmatrix} = 12\mathbf{i} - 21\mathbf{j} - 6\mathbf{k}.$$

Площадь параллелограмма равна $||[\mathbf{a}, \mathbf{b}]||$, т. е. $S = |4\mathbf{i} - 7\mathbf{j} - 2\mathbf{k}| = \sqrt{4^2 + (-7)^2 + (-2)^2} = \sqrt{69}$.

Ответ: $[2\mathbf{a} + \mathbf{b}, \mathbf{b} - \mathbf{a}] = 12\mathbf{i} - 21\mathbf{j} - 6\mathbf{k}$, $S = \sqrt{69}$.

Пример 3.14. Вычислить площадь треугольника с вершинами в точках $A(-1; -2; 0)$, $B(3; 1; 1)$, $C(-3; -3; 3)$.

Решение. В соответствии с формулой (3.46) площадь треугольника ABC равна $\frac{1}{2} ||[\overline{AB}, \overline{AC}]||$. Находим координаты векторов $\overline{AB}$ и $\overline{AC}$: $\overline{AB} = (4; 3; 1)$, $\overline{AC} = (-2; -1; 3)$, и вектор $[\overline{AB}, \overline{AC}] = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 4 & 3 & 1 \\ -2 & -1 & 3 \end{vmatrix} = 10\mathbf{i} - 14\mathbf{j} + 2\mathbf{k}$. Теперь находим пло-

щадь треугольника $S_{\triangle ABC} = \frac{1}{2} |10\mathbf{i} - 14\mathbf{j} + 2\mathbf{k}| = 5\sqrt{3}$.

Ответ: $S_{\triangle ABC} = 5\sqrt{3}$.

Пример 3.15. Найти вектор $\mathbf{c}$, если известно, что он ортогонален векторам $\mathbf{a} = (-2; -1; 3)$, $\mathbf{b} = (-4; -2; 10)$, тройка векторов $\langle \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c} \rangle$ является правой и $|\mathbf{c}| = 20$.

Решение. Векторы $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ не коллинеарны и потому множество векторов $\mathbf{c}$, перпендикулярных плоскости этих векторов, можно найти по формуле $\mathbf{c} = \lambda[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$, $\lambda \in \mathbb{R}$:

$$\mathbf{c} = \lambda \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ -2 & -1 & 3 \\ -4 & -2 & 10 \end{vmatrix} = \lambda(-4\mathbf{i} + 8\mathbf{j}).$$

Значит, $\mathbf{c} = (-4\lambda; 8\lambda; 0)$. Поскольку тройка векторов $\langle \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c} \rangle$, взятых в указанном порядке, является правой, то смешанное произведение $\mathbf{abc}$ этих векторов должно быть положительно. Используя формулу (3.44), получаем

$$\begin{vmatrix} 2 & -1 & 3 \\ 4 & -2 & 10 \\ -4\lambda & 8\lambda & 0 \end{vmatrix} > 0 \Leftrightarrow \begin{vmatrix} 0 & -1 & 3 \\ 0 & -2 & 10 \\ 12\lambda & 8\lambda & 0 \end{vmatrix} > 0 \Leftrightarrow -48\lambda > 0 \Rightarrow \lambda < 0.$$

$\uparrow$ (2)

Поскольку $\lambda < 0$, то $|\mathbf{c}| = \sqrt{80} |\lambda| = -4\sqrt{5} \lambda$. С другой стороны, $|\mathbf{c}| = 20$. Поэтому

$$-4\sqrt{5} \lambda = 20 \Rightarrow \lambda = -\sqrt{5}.$$

Ответ: $\mathbf{c} = (4\sqrt{5}; -8\sqrt{5}; 0)$.

Пример 3.16. Пирамида $ABCD$ задана координатами своих вершин $A(-3; 2; 1)$, $B(4; 1; 2)$, $C(1; 4; 3)$, $D(2; -3; 6)$. Найти: а) площадь грани ABC ; б) объем пирамиды.

Решение. Будем считать, что пирамида построена на векторах $\overline{AB}$, $\overline{AC}$ и $\overline{AD}$. Найдем их координаты и покажем, что векторы некомпланарны:

$$\overline{AB} = (7; -1; 1); \quad \overline{AC} = (4; 2; 2); \quad \overline{AD} = (5; -5; 5).$$

Тогда

$$(\overline{AB}, \overline{AC}, \overline{AD}) = \begin{vmatrix} 7 & -1 & 1 \\ 4 & 2 & 2 \\ 5 & -5 & 5 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 6 & -1 & 0 \\ 6 & 2 & 4 \\ 0 & -5 & 0 \end{vmatrix} = -(-5) \cdot \begin{vmatrix} 6 & 0 \\ 6 & 4 \end{vmatrix} = 120.$$

Поскольку $(\overline{AB}, \overline{AC}, \overline{AD}) \neq 0$, то пирамида с заданными координатами вершин существует (невырождена). Ее объем $V = \frac{1}{6} |(\overline{AB}, \overline{AC}, \overline{AD})|$, т. е. $V = \frac{1}{6} \cdot 120 = 20$.

Площадь грани ABC найдем по формуле (3.46): $S = \frac{1}{2} |[\overline{AB}, \overline{AC}]|$. Поскольку $[\overline{AB}, \overline{AC}] = -4\mathbf{i} - 10\mathbf{j} + 18\mathbf{k}$, то

$$S = \frac{1}{2} |-4\mathbf{i} - 10\mathbf{j} + 18\mathbf{k}| = |2\mathbf{i} + 5\mathbf{j} - 9\mathbf{k}| = \sqrt{110}.$$

Ответ: а) $S = \sqrt{110}$; б) $V = 20$.

Вопросы для самоконтроля к § 21–23

1. Напишите определение скалярного произведения векторов.
2. Напишите формулы для нахождения алгебраических проекций $\text{пр}_{\mathbf{a}} \mathbf{b}$ и $\text{пр}_{\mathbf{b}} \mathbf{a}$.
3. Напишите формулу для нахождения косинуса угла между двумя векторами. Если $(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = -2$, $|\mathbf{a}| = 1$, $|\mathbf{b}| = 2$, то чему равен угол φ между векторами $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$?

4. Что называется скалярным квадратом вектора $\mathbf{a}$?

5. Напишите формулу для нахождения модуля вектора $\mathbf{a} = \alpha \mathbf{m} + \beta \mathbf{n}$ при заданных значениях действительных чисел α и β , модулей векторов $\mathbf{m}$ и $\mathbf{n}$, а также угла φ между ними.

6. Напишите необходимое и достаточное условие ортогональности двух векторов.

7. Напишите формулы для вычисления скалярного произведения векторов $\mathbf{a} = 2\mathbf{i} - \mathbf{j} - 2\mathbf{k}$, $\mathbf{b} = \mathbf{i} + 3\mathbf{j} - 4\mathbf{k}$, заданных своими координатами в ортонормированном базисе, и векторов $\mathbf{a} = 2\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2 - 2\mathbf{e}_3$, $\mathbf{b} = \mathbf{e}_1 + 3\mathbf{e}_2 - 4\mathbf{e}_3$, заданных своими координатами в косоугольном базисе $\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3 \rangle$: $|\mathbf{e}_1| = |\mathbf{e}_2| = |\mathbf{e}_3| = 1$, $(\widehat{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2}) = \frac{\pi}{3}$, $(\widehat{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_3}) = \frac{2\pi}{3}$, $(\widehat{\mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3}) = \frac{2\pi}{3}$. Объясните различия в результатах.

8. Дайте определение векторного произведения двух векторов; запишите алгебраические и геометрические свойства векторного произведения.

9. Дайте определение смешанного произведения трех векторов; запишите алгебраические и геометрические свойства смешанного произведения.

10. Сформулируйте необходимые и достаточные условия компланарности трех векторов, используя свойства смешанного произведения.

11. Неколлинеарные векторы $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c} \in V^3$ лежат в одной плоскости. Какие из следующих утверждений верны: а) $[\mathbf{a}, \mathbf{b}] \perp \mathbf{c}$; б) $[\mathbf{a}, \mathbf{b}] \perp [\mathbf{a}, \mathbf{c}]$; в) $[\mathbf{a}, \mathbf{b}] \parallel [\mathbf{a}, \mathbf{c}]$?

12. Используя геометрический смысл и свойства смешанного произведения, докажите следующие свойства определителя третьего порядка:

а) при перестановке двух строк определителя меняется лишь его знак;

б) определитель с пропорциональными и, в частности, с равными строками равен нулю;

$$\text{в) } \begin{vmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2^{(1)} + \mathbf{a}_2^{(2)} \\ \mathbf{a}_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2^{(1)} \\ \mathbf{a}_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2^{(2)} \\ \mathbf{a}_3 \end{vmatrix}, \text{ где } \mathbf{a}_1 = (a_{11} \ a_{12} \ a_{13}) \text{ — вектор}$$

элементов первой строки определителя, $\mathbf{a}_2^{(k)}$, $k = 1, 2$, — векторы элементов второй строки, $\mathbf{a}_3 = (a_{31} \ a_{32} \ a_{33})$ — вектор элементов третьей строки;

г) если к некоторой строке определителя прибавить другую строку, умноженную на произвольное число, то определитель не изменится.

Ответы и указания

3. п. 7. См. п. 11.2. **11.** а) верно; б) неверно; в) верно.

Упражнения

1. Выразите через векторы $\mathbf{c} = \overline{AB}$, $\mathbf{a} = \overline{BC}$ в треугольнике ABC векторы $\overline{AO}$, $\overline{BO}$ и $\overline{CO}$, где O — точка пересечения медиан AM , BN и CK данного треугольника.

2. Выразите через медианы $\overline{AM} = \mathbf{m}$ и $\overline{BN} = \mathbf{n}$ треугольника ABC векторы $\overline{AB}$, $\overline{BC}$ и $\overline{AC}$.

3. Выразите через векторы $\mathbf{a} = \overline{AC}$ и $\mathbf{b} = \overline{BD}$ в прямоугольнике $ABCD$ векторы $\overline{AB}$, $\overline{BC}$, $\overline{CD}$ и $\overline{DA}$.

4. Определите координаты конца B вектора $\mathbf{a} = (-3; 4; 0)$, если его начало расположено в точке $A(1; -2; 3)$. Определите также модуль вектора $\mathbf{a}$ и его направляющие косинусы. Запишите орт $\mathbf{a}^0$ вектора $\mathbf{a}$.

5. Треугольник ABC задан координатами своих вершин: $A(1; -1; 2)$, $B(3; 3; -2)$, $C(5; -4; 14)$. Найдите координаты вектора $\overline{AM}$, совпадающего с медианой AM , а также координаты вектора $\mathbf{q}$, направленного по биссектрисе $\overline{AQ}$ внутреннего угла треугольника, если известно, что $|\mathbf{q}| = \sqrt{1014}$.

6. Докажите, что векторы $\mathbf{a} = (-1; 3)$ и $\mathbf{b} = (2; 1)$ образуют базис на плоскости (в пространстве $\mathbb{V}^2$) и разложите вектор $\mathbf{c} = (5; 13)$ по этому базису.

7. Докажите, что векторы $\mathbf{e}_1 = 2\mathbf{i} + \mathbf{j} - \mathbf{k}$, $\mathbf{e}_2 = \mathbf{i} + \mathbf{k}$, $\mathbf{e}_3 = 2\mathbf{j} + 3\mathbf{k}$ образуют базис в пространстве $\mathbb{V}^3$, и найдите координаты вектора $\mathbf{a} = -3\mathbf{i} + 4\mathbf{j} + 12\mathbf{k}$ в этом базисе.

8. Треугольник ABC задан координатами своих вершин $A(-4; -1; 5)$, $B(1; 4; -5)$, $C(4; -4; 3)$. Укажите, какая вершина треугольника наименее удалена от начала координат, и найдите длины медиан AM и BN данного треугольника.

9. В пространстве в прямоугольной декартовой системе координат даны точки $A(3; -2; 5)$ и $B(-4; 2; 1)$. Найдите орт $\mathbf{a}^0$ вектора $\mathbf{a} = \overline{AB}$ и проекции вектора $\mathbf{a}$ на координатные оси.

10. Векторы $\mathbf{a} = 2\mathbf{m} - 3\mathbf{n}$ и $\mathbf{b} = 13\mathbf{m} + 2\mathbf{n}$ перпендикулярны, при этом $|\mathbf{m}| = 2$, $|\mathbf{n}| = 8$. Найдите угол между векторами $\mathbf{m}$ и $\mathbf{n}$.

11. Векторы $\mathbf{a} = 2\mathbf{m} - 3\mathbf{n}$ и $\mathbf{b} = \mathbf{m} + 2\mathbf{n}$ перпендикулярны, при этом $|\mathbf{m}| = 3$, $|\mathbf{n}| = 2$. Найдите угол между векторами $\mathbf{m}$ и $\mathbf{n}$.

12. Найдите модуль вектора $\mathbf{a} = 4\mathbf{m} - 3\mathbf{n}$, если известно, что $|\mathbf{m}| = 2$, $|\mathbf{n}| = 5$, $(\widehat{\mathbf{m}, \mathbf{n}}) = 60^\circ$.

13. Даны векторы $\mathbf{a} = -\mathbf{i} + 2\mathbf{j} - 2\mathbf{k}$, $\mathbf{b} = -3\mathbf{i} + \mathbf{j} - 3\mathbf{k}$. Вычислите: а) $(\mathbf{a}, \mathbf{b})$, б) $\mathbf{b}^2$, в) $\sqrt{(\mathbf{a}, \mathbf{a})}$, г) $(\mathbf{a} - 2\mathbf{b}, 3\mathbf{a} + \mathbf{b})$.

14. Треугольник ABC задан координатами своих вершин: $A(-1; 2; 0)$, $B(-3; 0; 1)$, $C(2; 2; -4)$. Найдите величину угла A и проекцию вектора $\overline{AB}$ на вектор $\overline{AC}$.

15. Найдите координаты вектора $\mathbf{x}$, перпендикулярного векторам $\mathbf{a} = (1; -2; -1)$ и $\mathbf{b} = (3; -2; -2)$; модуль вектора $\mathbf{x}$ равен $\sqrt{21}$, а $\text{пр}_{Oy} \mathbf{x} < 0$.

16. Дано: $|\mathbf{a}| = 8$, $|\mathbf{b}| = 3$, $(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = -12$. Вычислите: а) $||[\mathbf{a}, \mathbf{b}]||$; б) $||\mathbf{a} - 2\mathbf{b}, 3\mathbf{a} + \mathbf{b}||$.

17. Дано: $\mathbf{a} = 2\mathbf{i} - 3\mathbf{j} + \mathbf{k}$, $\mathbf{b} = \mathbf{i} + 2\mathbf{j} - \mathbf{k}$. Вычислите: а) $[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$; б) $[3\mathbf{a} - 2\mathbf{b}, \mathbf{a} + \mathbf{b}]$.

18. Какому условию должны удовлетворять векторы $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$, чтобы векторы $2\mathbf{a} - 3\mathbf{b}$ и $\mathbf{a} + 2\mathbf{b}$ были коллинеарны?

19. Дано: $|\mathbf{a}| = 4$, $|\mathbf{b}| = 3$, $(\widehat{\mathbf{a}, \mathbf{b}}) = \frac{\pi}{6}$. Вычислите площадь параллелограмма, построенного на векторах $2\mathbf{a} + 3\mathbf{b}$ и $\mathbf{a} - 4\mathbf{b}$.

20. Вычислите площадь треугольника ABC с вершинами $A(1; 2; 0)$, $B(3; 0; -3)$, $C(5; 2; 6)$. Найдите высоту BD .

21. Сила $\mathbf{F} = \mathbf{i} - 2\mathbf{j} + 4\mathbf{k}$ приложена к точке $M(2; -3; 5)$. Найдите момент этой силы относительно точки $A(1; -1; 3)$.

22. Найдите координаты вектора $\mathbf{x}$, перпендикулярного векторам $\mathbf{a} = (1; -2; -1)$ и $\mathbf{b} = (3; -2; -2)$, если $|\mathbf{x}| = \sqrt{21}$ и упорядоченная тройка векторов $\langle \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c} \rangle$ является левой.

23. Треугольная пирамида $ABCD$ задана в прямоугольной декартовой системе координат координатами вершин:

$$A(-2; -3; 1), \quad B(3; 1; 2), \quad C(0; 1; -1), \quad D(1; -1; 6).$$

Найдите ее объем и высоту DH , опущенную из вершины D на грань ABC .

24. Установите, можно ли следующие упорядоченные тройки векторов $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{c}$ взять в качестве базиса трехмерного пространства:

а) $\mathbf{a} = (3; -1; 2)$, $\mathbf{b} = (0; 1; 2)$, $\mathbf{c} = (-1; 0; 1)$;

б) $\mathbf{a} = (1; -1; 2)$, $\mathbf{b} = (2; -3; 1)$, $\mathbf{c} = (0; 1; 3)$.

25. Докажите, что для любых $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и $\mathbf{c}$ векторы $\mathbf{a} - \mathbf{b}$, $\mathbf{b} - \mathbf{c}$ и $\mathbf{c} - \mathbf{a}$ компланарны.

26. Установите ориентацию тройки векторов

$$\mathbf{a} = (2; 0; 1); \quad \mathbf{b} = (-3; 1; -1); \quad \mathbf{c} = (1; 4; -1).$$

Ответы

$$1. \overline{AO} = \frac{2}{3}\mathbf{c} + \frac{1}{3}\mathbf{a}, \overline{BO} = -\frac{1}{3}\mathbf{c} + \frac{1}{3}\mathbf{a}; \overline{CO} = -\frac{1}{3}\mathbf{c} - \frac{2}{3}\mathbf{a}.$$

$$2. \overline{AB} = \frac{2}{3}\mathbf{m} - \frac{2}{3}\mathbf{n}, \overline{BC} = \frac{2}{3}\mathbf{m} + \frac{4}{3}\mathbf{n}; \overline{AC} = \frac{4}{3}\mathbf{m} + \frac{2}{3}\mathbf{n}.$$

$$3. \overline{AB} = \frac{1}{2}(\mathbf{a} - \mathbf{b}), \overline{BC} = \frac{1}{2}(\mathbf{a} + \mathbf{b}), \overline{CD} = \frac{1}{2}(\mathbf{b} - \mathbf{a}), \overline{DA} = -\frac{1}{2}(\mathbf{b} + \mathbf{a}).$$

$$4. B(-2; 2; 3); |\mathbf{a}| = 5; \cos \alpha = -\frac{3}{5}, \cos \beta = \frac{4}{5}; \cos \gamma = 0; \mathbf{a}^\circ = \left(-\frac{3}{5}; \frac{4}{5}; 0\right).$$

$$5. \overline{AM} = \left(3; \frac{1}{2}; 4\right); \mathbf{q} = (25; 17; 10) \text{ (указание: } \mathbf{q} = \lambda(\mathbf{a}^\circ + \mathbf{b}^\circ), \text{ где } \mathbf{a}^\circ = \frac{\overline{AB}}{|\overline{AB}|}, \mathbf{b}^\circ = \frac{\overline{AC}}{|\overline{AC}|}, \lambda \in \mathbb{R}; \text{ значение } \lambda \text{ подберите).}$$

$$6. \mathbf{c} = 3\mathbf{a} + 4\mathbf{b}. 7. \mathbf{a} = -2\mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2 + 3\mathbf{e}_3.$$

$$8. \text{Вершина } C \text{ } (\rho(O, C) = \sqrt{41}). \overline{AM} = \frac{\sqrt{317}}{2}; \overline{BN} = \frac{\sqrt{497}}{2}.$$

$$9. \mathbf{a}^\circ = \left(-\frac{7}{9}; \frac{4}{9} - \frac{4}{9}\right); \text{пр}_{Ox}\mathbf{a} = -7, \text{пр}_{Oy}\mathbf{a} = 4, \text{пр}_{Oz}\mathbf{a} = -4.$$

$$10. (\widehat{\mathbf{m}, \mathbf{n}}) = 120^\circ. 11. (\widehat{\mathbf{m}, \mathbf{n}}) = 0^\circ \text{ } (\mathbf{a} = 2\mathbf{m} - 3\mathbf{n} = \mathbf{0}).$$

$$12. |\mathbf{a}| = 13. 13. \text{ а) } 11; \text{ б) } 19; \text{ в) } 3; \text{ г) } -66.$$

$$14. \angle A = \pi - \arccos \frac{2}{3}; \text{пр}_{\overline{AC}}\overline{AB} = -2. 15. \mathbf{x} = (2; -2; 4).$$

$$16. \text{ а) } 12\sqrt{3}; \text{ б) } 84\sqrt{3}. 17. \text{ а) } \mathbf{i} + 3\mathbf{j} + 7\mathbf{k}; \text{ б) } 5\mathbf{i} + 15\mathbf{j} + 35\mathbf{k}.$$

$$18. \mathbf{a} \parallel \mathbf{b}. 19. 66. 20. S_\Delta = 14; BD = \frac{14}{\sqrt{13}}. 21. -4\mathbf{i} - 2\mathbf{j}.$$

$$22. \mathbf{x} = (-2; 1; -4). 23. v = 8; h = 4\frac{\sqrt{3}}{3}. 24. \text{ а) Можно, так как } \mathbf{abc} \neq \mathbf{0}; \text{ б) нельзя, так как } \mathbf{abc} = \mathbf{0}. 26. \text{ Левая } (\mathbf{abc} = -7).$$

Глава 4

ПРЯМАЯ НА ПЛОСКОСТИ

§ 24. Уравнение линии на плоскости.

Уравнения поверхности и линии в пространстве

24.1. Уравнение линии на плоскости

Пусть на плоскости зафиксированы декартова прямоугольная система координат Oxy и некоторая линия (кривая) Γ (рис. 4.1).

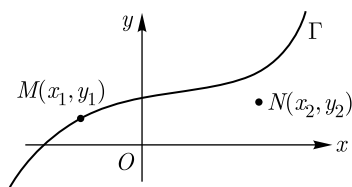


Рис. 4.1

Определение 4.1. Уравнение

$$f(x, y) = 0 \quad (4.1)$$

называется *уравнением линии* Γ , если этому уравнению удовлетворяют координаты тех и только тех точек плоскости, которые лежат на этой линии, т. е. если $f(x_1; y_1) = 0$, то точка $M(x_1; y_1) \in \Gamma$ и для любой точки $N(x_2; y_2)$, не принадлежащей кривой Γ , $f(x_2, y_2) \neq 0$.

Не всякое уравнение $f(x, y) = 0$ определяет линию на плоскости. Например, уравнение $ax^2 + by^2 + R^2 = 0$ при $a > 0$, $b > 0$ и $R \neq 0$ не имеет никакого геометрического образа, а уравнение $|x| + |y| = 0$ определяет единственную точку $O(0; 0)$.

Замечание. Термины «линия» и «кривая» являются синонимами и будут употребляться ниже равноправно.

Изучение свойств линий на плоскости и в пространстве, а также поверхностей можно проводить, исследуя аналитическими методами уравнения соответствующих линий и поверхностей.

Раздел математики, в котором изучаются свойства линий и поверхностей аналитическими методами, называется *аналитической геометрией*. Возникновение этого раздела связано с именами великих математиков Рене Декарта ¹⁾, Пьера Ферма ²⁾, Готфрида Лейбница ³⁾, Исаака Ньютона ⁴⁾ и Леонарда Эйлера ⁵⁾.

В основе аналитических методов исследования геометрических объектов лежит метод координат, предложенный впервые Декартом и развитый Ферма и другими более поздними математиками.

Сущность метода координат на плоскости заключается в задании в фиксированной декартовой прямоугольной системе координат Oxy уравнения (4.1) линии Γ и в дальнейшем исследовании свойств этого уравнения методами алгебры и математического анализа. Взаимно однозначное соответствие между точками M линии Γ и упорядоченными парами чисел $(x; y)$ — координатами этих точек, удовлетворяющих уравнению (4.1), — позволяет делать выводы о геометрических свойствах кривой на основании анализа ее уравнения.

Линии на плоскости весьма многообразны. Наиболее полно в вузовском курсе математики изучаются *алгебраические линии*. Но и из их числа для систематического изучения выделяются алгебраические линии только первого и второго порядков.

Определение 4.2. *Алгебраической* называется линия, уравнение которой в заданной декартовой прямоугольной системе координат имеет следующий вид:

$$A_1 x^{k_1} y^{m_1} + A_2 x^{k_2} y^{m_2} + \dots + A_s x^{k_s} y^{m_s} = 0, \quad (4.2)$$

¹⁾ Декарт Рене (Descartes René, 1596–1650) — французский математик и философ. Один из основателей аналитической геометрии.

²⁾ Ферма Пьер (Fermat Pierre, 1601–1665) — французский математик. Один из создателей теории чисел и основатель аналитической геометрии.

³⁾ Лейбниц Готфрид Вильгельм (Leibniz Gottfried Wilhelm, 1646–1716) — немецкий математик, философ, физик и изобретатель. Основатель (наряду с И. Ньютоном) дифференциального и интегрального исчисления.

⁴⁾ Ньютон Исаак (Newton Isaac, 1643–1727) — английский физик и математик. Автор многочисленных открытий в физике и математике.

⁵⁾ Эйлер Леонард (Euler Leonhard, 1707–1783), родился в Швейцарии, жил и работал в России (1727–1741, 1766–1783) и в Германии (1741–1765). Величайший и очень продуктивный математик, получил новые результаты в самых различных разделах математики.

где $A_i \in \mathbb{R}$, $i = \overline{1, s}$, — коэффициенты уравнения; k_i, m_i , $i = \overline{1, s}$, — целые неотрицательные числа ($k_i, m_i \in \mathbb{N}$).

Наибольшее из чисел $(k_i + m_i)$ определяет *порядок алгебраической линии* и одновременно *порядок (степень) алгебраического уравнения*.

Например, уравнение

$$3,7xy^2 - 2x^2 + 5y - 13 = 0$$

является уравнением алгебраической линии третьего порядка, так как здесь $k_1 + m_1 = 1 + 2 = 3$, $k_2 + m_2 = 2 + 0 = 2$, $k_3 + m_3 = 0 + 1 = 1$, $k_4 + m_4 = 0 + 0 = 0$ и $\max_i (k_i + m_i) = 3$.

Всякое алгебраическое уравнение первой степени

$$Ax + By + C = 0, \quad (4.3)$$

определяет, как увидим ниже, прямую на плоскости (при условии $A^2 + B^2 \neq 0$).

Каждое из уравнений

$$\begin{aligned} 3x^2 + 7y^2 - 4xy + 5x - 2y + 3 &= 0, \\ 5xy + 7x - 4 &= 0, \\ 9x^2 + y^2 - 16 &= 0 \end{aligned}$$

является уравнением некоторой алгебраической линии второго порядка. Общее уравнение алгебраической линии второго порядка имеет следующий вид:

$$Ax^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + 2Ey + F = 0, \quad (4.4)$$

причем здесь хотя бы один из коэффициентов A, B, C отличен от нуля.

Уравнения $f(x, y) = 0$, не являющиеся алгебраическими, определяют *неалгебраические*, или иначе *трансцендентные кривые*. Например, уравнения

$$xy - \arctg x = 0, \quad 3^x - \ln y + 5 = 0$$

являются уравнениями трансцендентных кривых.

24.2. Уравнения поверхности и линии в пространстве

Пусть в декартовой прямоугольной системе координат $Oxyz$ в пространстве задана некоторая поверхность S (рис. 4.2).

Определение 4.3. Уравнение

$$f(x, y, z) = 0 \quad (4.5)$$

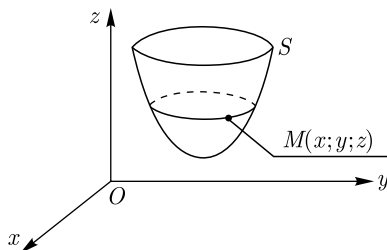


Рис. 4.2

называется *уравнением поверхности* S , если этому уравнению удовлетворяют координаты $(x; y; z)$ тех и только тех точек M пространства, которые лежат на этой поверхности.

Решим следующую теоретическую задачу.

Пример 4.1. Составить уравнение геометрического места точек $M(x; y; z)$, удаленных на одинаковом расстоянии R от данной точки $M_0(x_0; y_0; z_0)$.

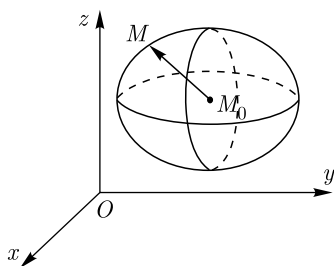


Рис. 4.3

(сферы) радиуса R с центром в точке M_0 (рис. 4.3).

Ответ: $S: (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = R^2$.

При $R = 0$ уравнение (4.6) определяет единственную точку $M(x_0; y_0; z_0)$, а уравнение

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = -R^2, \quad R \neq 0,$$

не имеет никакого геометрического образа.

По аналогии с линиями на плоскости в вузовском курсе математики, в пространстве $\mathbb{R}^3$ системно изучаются только алгебраические поверхности первого порядка (плоскости)

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (4.7)$$

и второго порядка

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + 2Dxy + 2Exz + 2Fyz + 2Gx + 2Hy + 2Kz + L = 0. \quad (4.8)$$

Линию Γ в пространстве можно рассматривать как пересечение двух поверхностей S_1 и S_2 . Так, если $f_1(x, y, z) = 0$ — уравнение поверхности S_1 , а $f_2(x, y, z) = 0$ — поверхности S_2 , то система уравнений

$$\begin{cases} f_1(x, y, z) = 0, \\ f_2(x, y, z) = 0 \end{cases}$$

определяет некоторую линию Γ в пространстве (при условии, что множество решений системы непусто).

На рис. 4.4, *а* линия Γ возникает в результате пересечения поверхности S_1 плоскостью P_2 , а на рис. 4.4, *б* прямая L является результатом пересечения двух плоскостей P_1 и P_2 .

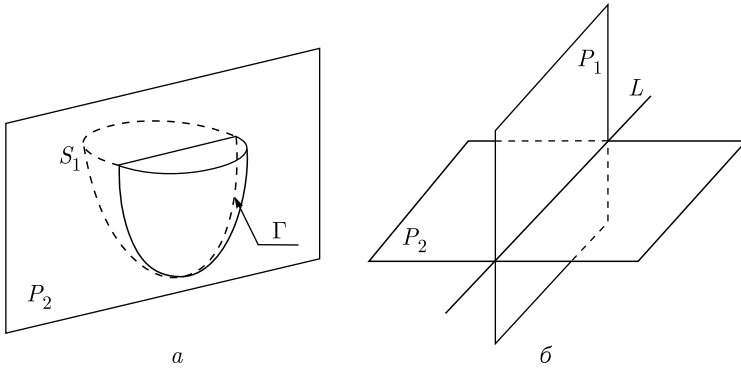


Рис. 4.4

Уравнение прямой L в этом случае имеет следующий вид:

$$L: \begin{cases} A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0, & (P_1) \\ A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0. & (P_2) \end{cases}$$

Это так называемое *общее уравнение прямой* в пространстве.

Материал этого параграфа позволяет получить некоторое общее представление о способах задания линий и поверхностей. При этом предполагается, что понятия линии (кривой) и поверхности в пространстве интуитивно ясны. Ниже они рассматриваются как множества точек, удовлетворяющие вполне определенным условиям — уравнениям этих линий и поверхностей.

Установим следующую последовательность изучения алгебраических линий и поверхностей.

1. Прямая на плоскости (алгебраические линии первого порядка на плоскости, гл. 4).
2. Плоскость и прямая в пространстве (алгебраические поверхности и линии первого порядка в пространстве, гл. 5).

3. Алгебраические линии второго порядка на плоскости, гл. 6.
4. Алгебраические поверхности второго порядка в пространстве, гл. 7.

§ 25. Параметрические и канонические уравнения прямой на плоскости

Обратим внимание читателя на то, что при выводе уравнений прямой на плоскости и в пространстве, а также уравнения плоскости активно используется векторный подход.

Уравнения алгебраических линий и поверхностей первого порядка выводятся на основании свойств коллинеарных, ортогональных и компланарных векторов с использованием операций скалярного, векторного и смешанного произведений векторов. Это позволяет рассматривать материал гл. 4 и 5, а в определенной мере и гл. 6 как приложения векторной алгебры к решению геометрических задач.

Определение 4.3. Любой ненулевой вектор $\mathbf{q} = (\ell; m)$, коллинеарный данной прямой L , называется *направляющим вектором* этой прямой.

Получение различных видов уравнений прямой на плоскости выполним в форме теоретических задач.

Задача 4.1. Написать уравнение прямой L , проходящей через заданную точку $M_0(x_0; y_0)$ и имеющей заданный направляющий вектор $\mathbf{q} = (\ell; m)$.

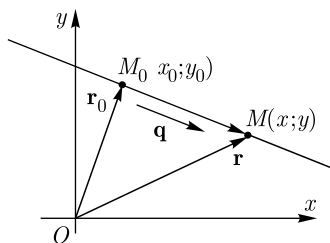


Рис. 4.5

Решение. Возьмем произвольную точку $M(x; y)$ и образуем вектор $\overline{M_0M}$ (рис. 4.5). Точка M будет принадлежать прямой L тогда и только тогда, когда вектор $\overline{M_0M}$ коллинеарен вектору $\mathbf{q}$. Но если $\overline{M_0M} \parallel \mathbf{q}$, то по теореме 3.4 существует число $t \in \mathbb{R}$ такое, что

$$\overline{M_0M} = t\mathbf{q}, \quad (4.9)$$

или в координатах $(x - x_0; y - y_0) = t(\ell; m)$, откуда

$$\begin{cases} x = x_0 + t\ell, \\ y = y_0 + tm. \end{cases} \quad (4.10)$$

Определение 4.4. Уравнения (4.9) и (4.10) называются *параметрическими уравнениями* прямой L : (4.9) — в векторной форме, (4.10) — в координатной форме.

Замечание 1. Используя векторные равенства $\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \overline{M_0M}$ (рис. 4.5) и (4.9), получаем еще одну векторную форму записи уравнения прямой L :

$$\boxed{\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + t\mathbf{q}, \quad t \in \mathbb{R}}. \quad (4.11)$$

Здесь $\mathbf{r} = \mathbf{r}(x; y)$ — радиус-вектор $\overline{OM}$ точки $M(x; y)$, $\mathbf{r}_0 = (x_0; y_0)$ — радиус-вектор $\overline{OM_0}$ точки $M_0(x_0; y_0)$.

Замечание 2. Исключив параметр t из уравнений (4.10): $t = \frac{x - x_0}{\ell}$, $t = \frac{y - y_0}{m}$, приходим к новой форме записи уравнения прямой L в координатах

$$\boxed{\frac{x - x_0}{\ell} = \frac{y - y_0}{m}}. \quad (4.12)$$

Определение 4.5. Уравнение (4.12) называется *каноническим уравнением* прямой L , проходящей через заданную точку $M_0(x_0; y_0)$ и имеющей заданный направляющий вектор $\mathbf{q} = (\ell; m)$.

Замечание. В каноническом уравнении прямой (4.12) числа ℓ и m не могут одновременно обращаться в нуль, поскольку являются координатами направляющего вектора $\mathbf{q}$ прямой L , а он по определению ненулевой. Однако одна из координат ℓ или m может быть равной нулю. В этом случае и соответствующий числитель $x - x_0$ или $y - y_0$ равен нулю. Например, из уравнения $\frac{x - 3}{0} = \frac{y - 1}{4}$ следует, что $x - 3 = 0$, и это уравнение определяет прямую, проходящую через точку $(3; 1)$ и параллельную оси Oy , так как $\mathbf{q} = (0; 4)$.

Таким образом, задача 4.1 решена. Ее решением являются *параметрические* уравнения (4.9), (4.11) в векторной форме и (4.10) — в координатной, а также *каноническое* уравнение (4.12).

Пример 4.2. Написать уравнение медианы AM в треугольнике ABC , заданном координатами своих вершин: $A(1; -2)$, $B(4; 2)$, $C(8; -6)$.

Решение. Найдём координаты точки M (рис. 4.6): $x_M = \frac{4 + 8}{2} = 6$, $y_M = \frac{2 + (-6)}{2} = -2$.

Вектор $\overline{AM} = (6 - 1; -2 - (-2)) = (5; 0)$ будет направляющим вектором прямой AM . Это позволяет переформулировать исходную задачу: необходимо написать уравнение прямой L_{AM} ,

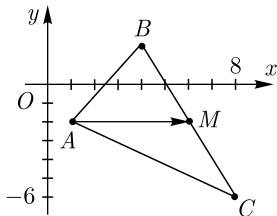


Рис. 4.6

проходящей через точку A и имеющей направляющий вектор $\mathbf{q} = (5; 0)$. Это задача 4.1, и ее решение можно записать, например, в форме канонического уравнения (4.12)

$$L_{AM}: \frac{x-1}{5} = \frac{y+2}{0} \Rightarrow L_{AM}: y = -2.$$

Ответ: $L_{AM}: y = -2$.

§ 26. Общее уравнение прямой

Теорема 4.1. Уравнение всякой прямой на плоскости в заданной декартовой прямоугольной системе координат Oxy является алгебраическим уравнением (4.3) первой степени, т. е.

$$L: Ax + By + C = 0,$$

и обратно, всякое линейное уравнение (4.3) определяет в заданной прямоугольной системе координат некоторую прямую.

Доказательство. Начнем с прямого утверждения. Пусть прямая L задана каноническим уравнением (4.12) и $\ell, m \neq 0$. Умножим его на $m\ell$ и преобразуем к следующему виду:

$$mx + (-\ell)y + \ell y_0 - mx_0 = 0.$$

Введем обозначения $A = m$, $B = -\ell$, $C = \ell y_0 - mx_0$ и в итоге получим уравнение первой степени $Ax + By + C = 0$.

Если же $\ell = 0$ или $m = 0$, то из уравнения (4.12) следует, что либо $x - x_0 = 0$ (при $\ell = 0$), либо $y - y_0 = 0$ (при $m = 0$). Уравнения $x - x_0 = 0$, $y - y_0 = 0$ являются неполными уравнениями вида $Ax + By + C = 0$.

Докажем теперь обратное утверждение теоремы. Пусть $(x_0; y_0)$ — некоторое решение уравнения $Ax + By + C = 0$, т. е. $Ax_0 + By_0 + C = 0$, причем $A^2 + B^2 \neq 0$. Как известно (теорема 2.9), решение $(x_0; y_0)$ такого уравнения существует.

Вычтем из заданного уравнения равенство $Ax_0 + By_0 + C = 0$:

$$A(x - x_0) + B(y - y_0) = 0. \quad (4.13)$$

Отсюда $A(x - x_0) = (-B)(y - y_0)$ и далее

$$\frac{x - x_0}{-B} = \frac{y - y_0}{A}.$$

Полученное уравнение является каноническим уравнением прямой L , проходящей через точку $(x_0; y_0)$ и имеющей направляющий вектор $\mathbf{q} = (-B; A)$. Таким образом, уравнение $Ax + By + C = 0$ действительно является уравнением прямой. ■

Определение 4.6. Уравнение $Ax + By + C = 0$ называется *общим уравнением прямой* на плоскости.

Обратимся к уравнению (4.13). Оно заслуживает особого внимания по двум причинам. Рассмотрим их.

Возьмем векторы $\mathbf{n} = (A; B)$ и $\overline{M_0M} = (x - x_0; y - y_0)$. Вектор $\mathbf{n}$ составлен из коэффициентов при неизвестных x и y в общем уравнении прямой. При этом первая координата вектора $\mathbf{n}$ — это коэффициент A при x , а вторая — коэффициент B при y . Начало и конец вектора $\overline{M_0M}$ — соответственно точки $M_0(x_0; y_0)$ и $M(x; y)$ — лежат на прямой L .

Левая часть уравнения (4.13) является скалярным произведением векторов $\mathbf{n}$ и $\overline{M_0M}$, т. е.

$$(\overline{M_0M}, \mathbf{n}) = 0. \quad (4.14)$$

Полученное равенство (4.14) означает, что вектор $\mathbf{n}$ перпендикулярен вектору $\overline{M_0M}$ и, как следствие, перпендикулярен к прямой L , заданной уравнением $Ax + By + C = 0$. Это первая из вышеупомянутых двух причин.

Определение 4.7. Любой ненулевой вектор $\mathbf{n}$, перпендикулярный прямой L , называется *вектором нормали* этой прямой.

Таким образом, если задано общее уравнение прямой L : $Ax + By + C = 0$, то задан и один из ее векторов нормали $\mathbf{n} = (A; B)$. Заметим, что вектор $(-B; A)$ при этом является направляющим вектором этой прямой.

Уравнение (4.13) замечательно еще и тем (вторая причина), что является решением следующей задачи.

Задача 4.2. Написать уравнение прямой L , проходящей через заданную точку $M_0(x_0; y_0)$ и перпендикулярной вектору $\mathbf{n} = (A; B)$.

Решение. Пусть $M(x; y)$ — некоторая точка плоскости, не совпадающая с заданной точкой M_0 . Рассмотрим вектор

$$\overline{M_0M} = (x - x_0; y - y_0).$$

Точка $M \in L$ тогда и только тогда, когда вектор $\overline{M_0M}$ перпендикулярен вектору $\mathbf{n}$ (рис. 4.7):

$$\overline{M_0M} \perp \mathbf{n} \Leftrightarrow \mathbf{n} \perp L.$$

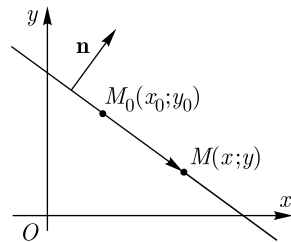


Рис. 4.7

Из условия ортогональности векторов получаем искомое уравнение прямой L в векторной

$$L: (\mathbf{n}, \overline{M_0M}) = 0$$

и координатной

$$L: A(x - x_0) + B(y - y_0) = 0 \quad (4.15)$$

формах. ■

Замечание 1. Наряду с параметрическими, каноническим и общим уравнениями прямой существуют и другие формы записи ее уравнений, а именно: уравнение прямой, проходящей через две заданные точки, уравнение прямой в отрезках, уравнение прямой с угловым коэффициентом. Они рассматриваются в следующих параграфах. Однако с векторной точки зрения основных способов задания прямой на плоскости два:

1) прямая L проходит через заданную точку $M_0(x_0; y_0)$ с заданным направляющим вектором $\mathbf{q} = (\ell; m)$ — задача 4.1;

2) прямая L проходит через заданную точку $M_0(x_0; y_0)$ с заданным вектором нормали $\mathbf{n} = (A; B)$ — задача 4.2.

Решением задачи 4.1 являются параметрические (4.10) и канонические (4.12) уравнения, а задачи 4.2 — уравнение (4.15).

Все остальные способы (формы) записи уравнения прямой на плоскости являются производными от данных двух способов.

Замечание 2. Если $\mathbf{n} = (A; B)$ — вектор нормали прямой L , то ее направляющим вектором будет вектор $\mathbf{q} = (-B; A)$ (или $(B; A)$), и наоборот: если $\mathbf{q} = (\ell; m)$ — направляющий вектор прямой L , то ее вектором нормали будет вектор $\mathbf{n} = (m; -\ell)$ (или $\mathbf{n} = (-m; \ell)$).

Пример 4.3. Написать уравнения прямых L_1 и L_2 , проходящих через точку $M_0(3; 2)$, если известно, что прямая L_1 параллельна, а L_2 перпендикулярна прямой

$$L: 3x - 4y + 12 = 0.$$

Решение. Поскольку прямая L_1 параллельна L , то в качестве вектора нормали $\mathbf{n}_{L_1}$ можно взять вектор нормали $\mathbf{n}_L = (3; -4)$ прямой L (рис. 4.8). В результате имеем задачу 4.2: необходимо написать уравнение прямой L_1 , проходящей через точку $M_0(3; 2)$ с заданным вектором нормали $\mathbf{n}_{L_1} = (3; -4)$. Ее решением является уравнение (4.13), которое в данном случае принимает следующий вид:

$$L_1: 3(x - 3) - 4(y - 2) = 0 \Leftrightarrow L: 3x - 4y - 1 = 0.$$

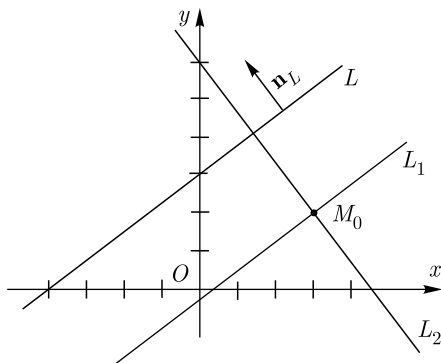


Рис. 4.8

Вторая часть примера — написание уравнения прямой L_2 — сводится к задаче 4.1. Действительно, прямая L_2 проходит через точку $M_0(3; 2)$, а в качестве ее направляющего вектора $\mathbf{q}_{L_2}$ можно взять вектор нормали $\mathbf{n}_L = (3; -4)$ прямой L ($\mathbf{n}_L \perp L$ и $L_2 \perp L \Rightarrow \mathbf{n}_L \parallel L$). В результате уравнение прямой L_2 можно записать в виде канонического уравнения (4.12):

$$L_2: \frac{x-3}{3} = \frac{y-2}{-4} \Leftrightarrow L_2: 4x + 3y - 18 = 0.$$

Ответ: $L_1: 3x - 4y - 1 = 0$; $L_2: 4x + 3y - 18 = 0$.

§ 27. Уравнение прямой, проходящей через две заданные точки. Уравнение прямой в отрезках

Задача 4.3. Написать уравнение прямой, проходящей через две различные точки $M_1(x_1; y_1)$, $M_2(x_2; y_2)$.

Решение. Построим вектор $\overline{M_1M_2}$ (рис. 4.9). Он коллинеарен прямой L и, значит, его можно взять в качестве направляющего вектора $\mathbf{q}$ этой прямой. В результате задача 4.3 свелась к задаче 4.1: необходимо написать уравнение прямой, проходящей через заданную точку $M_1(x_1; y_1)$ (или $M_2(x_2; y_2)$) и имеющей заданный направляющий вектор

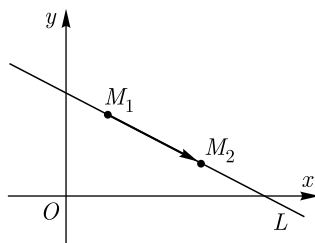


Рис. 4.9

$$\mathbf{q} = \overline{M_1M_2} = (x_2 - x_1; y_2 - y_1).$$

Ее решение можно записать в форме канонического уравнения (4.12)

$$\boxed{\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}}, \quad (4.16)$$

или параметрических уравнений

$$\begin{cases} x = x_1 + (x_2 - x_1)t, \\ y = y_1 + (y_2 - y_1)t, \quad t \in \mathbb{R}. \end{cases}$$

На практике уравнение прямой, проходящей через две заданные точки, записывается, как правило, в форме канонического уравнения (4.16).

Следующая задача отличается от задачи 4.3 в основном постановкой и формой записи результата ее решения.

Задача 4.4. Написать уравнение прямой L , отсекающей на координатных осях Ox и Oy отрезки «длины» a и b ($a \neq 0$, $b \neq 0$).

Решение. В постановке задачи

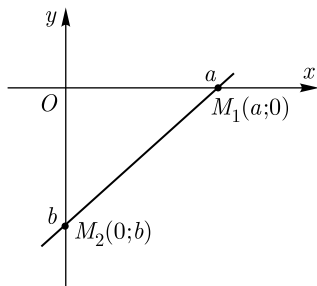


Рис. 4.10

слово «длины» взято в кавычки, потому что величины a и b могут быть как положительными, так и отрицательными. Например, на рис. 4.10 $a > 0$, а $b < 0$. Введем в рассмотрение точки $M_1(a; 0)$ и $M_2(0; b)$. В результате задача 4.4 непосредственно сведена к задаче 4.3. Ее решение в соответствии с формулой (4.16) будет иметь следующий вид:

$$\frac{x - a}{0 - a} = \frac{y - 0}{b - 0},$$

или

$$-\frac{x}{a} + 1 = \frac{y}{b}.$$

Отсюда получаем уравнение прямой в отрезках $\boxed{\frac{x}{a} + \frac{y}{b} = 1}$. ■

Замечание. Если коэффициент $a > 0$, то прямая пересекает ось Ox в ее положительной части, если же $a < 0$, то прямая пересекает ось Ox в ее отрицательной части. Аналогичное замечание имеет место и для коэффициента b относительно оси Oy .

Пример 4.4. Найти площадь треугольника, образованного отрезками координатных осей, отсекаемых на осях прямой L : $3x + 2y + 12 = 0$, и отрезком этой прямой, заключенным между осями.

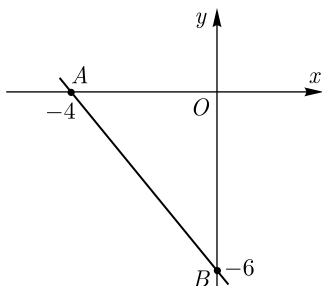


Рис. 4.11

Решение. Преобразуем уравнение прямой:

$$3x + 2y + 12 = 0 \Leftrightarrow 3x + 2y = -12 \Leftrightarrow \frac{x}{-4} + \frac{y}{-6} = 1.$$

Полученная равносильная форма записи уравнения прямой позволяет заключить, что на оси Ox отсекается отрезок $OA = |-4| = 4$, а на оси Oy — отрезок $OB = |-6| = 6$ (рис. 4.11). Площадь треугольника OAB равна $S = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 6 = 12$.

Ответ: 12.

§ 28. Уравнение прямой с угловым коэффициентом

Определение 4.8. Угловым коэффициентом k прямой L , не параллельной оси Oy , называется тангенс угла α , образованного данной прямой с положительным направлением оси Ox .

Из определений углового коэффициента k и направляющего вектора $\mathbf{q}$ прямой следует, что (рис. 4.12)

$$k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{m}{\ell}, \quad \ell \neq 0.$$

Для получения уравнения прямой с угловым коэффициентом преобразуем каноническое уравнение (4.12), умножив обе его части на m :

$$\frac{x - x_0}{\ell} = \frac{y - y_0}{m} \Leftrightarrow y - y_0 = \frac{m}{\ell}(x - x_0),$$

или

$$\boxed{y - y_0 = k(x - x_0)}. \quad (4.17)$$

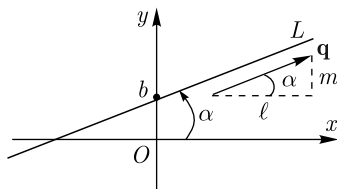


Рис. 4.12

Определение 4.9. Уравнение (4.17) называется *уравнением прямой с заданным угловым коэффициентом k , проходящей через заданную точку $M_0(x_0; y_0)$* .

В курсе элементарной математики уравнение (4.17) чаще записывается в виде

$$y = kx + b, \quad (4.18)$$

где $b = y_0 - kx_0$ — отрезок, отсекаемый прямой L на оси Oy (рис. 4.12).

Уравнение (4.18) также является уравнением *прямой с заданным угловым коэффициентом k , отсекающей на координатной оси Oy отрезок b* ($b > 0$, если прямая L пересекает положительную часть оси Oy , и $b < 0$ — в противном случае).

Если прямая L параллельна оси Ox , то $k = 0$ и уравнение прямой L : $y = b$; если же $L \parallel Oy$, то уравнение прямой L : $x = x_0$.

Пример 4.5. Написать уравнения всех сторон треугольника ABC , а также уравнение высоты, опущенной из вершины B на сторону AC , если заданы координаты вершин $B(3; 5)$ и $C(7; 0)$, угловой коэффициент k_{AB} стороны AB равен 2, а направляющий вектор стороны AC : $\mathbf{q}_{AC} = (8; 3)$.

Решение. 1. Уравнение стороны BC можно записать как уравнение прямой, проходящей через две заданные точки B и C :

$$L_{BC}: \frac{x-3}{7-3} = \frac{y-5}{0-5} \Leftrightarrow \frac{x-3}{4} = \frac{y-5}{-5} \Leftrightarrow 5x + 4y - 35 = 0.$$

2. Для стороны AB известны координаты точки B и угловой коэффициент $k_{AB} = 2$. Поэтому ее уравнение удобно записать, используя формулу (4.17):

$$L_{AB}: y - 5 = 2(x - 3) \Leftrightarrow 2x - y - 1 = 0.$$

3. Уравнение стороны AC можно записать как каноническое уравнение прямой, проходящей через заданную точку $C(7; 0)$ с заданным направляющим вектором $\mathbf{q}_{AC} = (8; 3)$:

$$L_{AC}: \frac{x-7}{8} = \frac{y-0}{3} \Leftrightarrow 3x - 8y - 21 = 0.$$

4. Вектор нормали $\mathbf{n}_{AC} = (3; -8)$ можно взять в качестве направляющего вектора $\mathbf{q}_{BH}$ (рис. 4.13) высоты BH ($BH \perp AC \Rightarrow \mathbf{q}_{BH} \parallel \mathbf{n}_{AC}$).

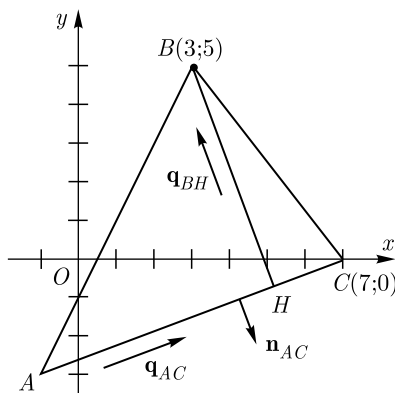


Рис. 4.13

Тогда в соответствии с формулой (4.12) получаем уравнение высоты BH :

$$L_{BH}: \frac{x-3}{3} = \frac{y-5}{-8} \Leftrightarrow 8x + 3y - 39 = 0.$$

Ответ: $L_{AB}: 2x - y - 1 = 0$; $L_{BC}: 5x + 4y - 35 = 0$;

$L_{AC}: 3x - 8y - 21 = 0$; $L_{BH}: 8x + 3y - 39 = 0$.

§ 29. Взаимное расположение двух прямых. Частные случаи расположения прямой

29.1. Взаимное расположение двух прямых

Пусть в фиксированной декартовой системе координат Oxy на плоскости прямые L_1 и L_2 заданы общими уравнениями

$$\begin{aligned} L_1: A_1x + B_1y + C_1 &= 0, \\ L_2: A_2x + B_2y + C_2 &= 0. \end{aligned} \quad (4.19)$$

Возможны три различных случая взаимного расположения прямых L_1 и L_2 :

- 1) прямые пересекаются;
- 2) прямые параллельны;
- 3) прямые совпадают.

Установим условия, при которых имеет место каждый из названных случаев.

Вопрос о взаимном расположении двух прямых на плоскости эквивалентен вопросу о количестве решений системы уравнений

$$\begin{cases} A_1x + B_1y = -C_1, \\ A_2x + B_2y = -C_2. \end{cases}$$

Ответ на вопрос о количестве решений такой системы уравнений получен в § 2. Это позволяет сразу же переформулировать соответствующие результаты для системы двух линейных алгебраических уравнений в виде теоремы, устанавливающей необходимые и достаточные условия каждого из трех случаев взаимного расположения прямых на плоскости.

Теорема 4.2. *Для того чтобы прямые L_1 и L_2 , заданные уравнениями (4.19):*

1) *пересекались, необходимо и достаточно, чтобы выполнялось одно из равносильных условий*

$$\frac{A_1}{A_2} \neq \frac{B_1}{B_2} \Leftrightarrow \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{vmatrix} \neq 0; \quad (4.20)$$

2) *были параллельны, необходимо и достаточно, чтобы выполнялись условия*

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2} \neq \frac{C_1}{C_2} \Leftrightarrow \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{vmatrix} = 0 \quad \& \quad \begin{vmatrix} A_1 & C_1 \\ A_2 & C_2 \end{vmatrix} \neq 0; \quad (4.21)$$

3) *совпадали, необходимо и достаточно, чтобы выполнялись условия*

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2} = \frac{C_1}{C_2} \Leftrightarrow \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{vmatrix} = 0 \quad \& \quad \begin{vmatrix} A_1 & C_1 \\ A_2 & C_2 \end{vmatrix} = 0. \quad (4.22)$$

Обсудим сформулированные в теореме 4.2 утверждения с геометрических позиций. Прямым L_1 и L_2 поставлены в соответствие векторы нормали — соответственно $\mathbf{n}_1 = (A_1; B_1)$ и $\mathbf{n}_2 = (A_2; B_2)$. Очевидно, что если векторы нормали не коллинеарны, то прямые L_1 и L_2 пересекаются и обратно, если L_1 и L_2 пересекаются, то векторы нормали не коллинеарны (рис. 4.14, а).

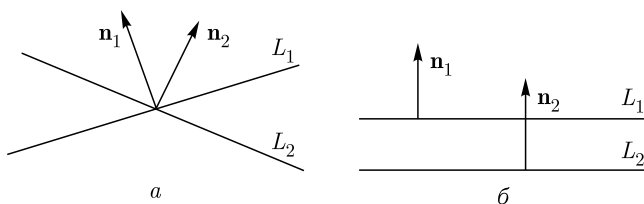


Рис. 4.14

В соответствии с теоремой 3.9 необходимым и достаточным условием коллинеарности векторов $\mathbf{n}_1$ и $\mathbf{n}_2$ является пропорциональность их координат:

$$\mathbf{n}_1 \parallel \mathbf{n}_2 \Leftrightarrow \frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2}$$

(рис. 4.14, б). Если при этом и $\frac{C_1}{C_2} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2}$, то прямые L_1 и L_2 совпадают.

Если же выполняется условие

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2} \neq \frac{C_1}{C_2},$$

то прямые L_1 и L_2 параллельны. Действительно, условие $\frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2}$ обеспечивает параллельность или совпадение прямых L_1 и L_2

$$\left(\frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2} \Leftrightarrow \mathbf{n}_1 \parallel \mathbf{n}_2 \text{ и так как } \mathbf{n}_1 \perp L_1, \mathbf{n}_2 \perp L_2, \text{ то } L_1 \parallel L_2 \right),$$

а условие $\frac{B_1}{B_2} \neq \frac{C_1}{C_2}$ — отсутствие у них общих точек.

Необходимое и достаточное условие перпендикулярности пересекающихся прямых выражается в равенстве нулю скалярного произведения векторов нормали $\mathbf{n}_1$ и $\mathbf{n}_2$:

$$L_1 \perp L_2 \Leftrightarrow (\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2) = 0,$$

или в координатной форме

$$\boxed{L_1 \perp L_2 \Leftrightarrow A_1 A_2 + B_1 B_2 = 0}. \quad (4.23)$$

Условия каждого из трех случаев взаимного расположения прямых на плоскости, заданных каноническими уравнениями:

$$\begin{aligned} L_1: \frac{x - x_1}{\ell_1} &= \frac{y - y_1}{m_1}, \\ L_2: \frac{x - x_2}{\ell_2} &= \frac{y - y_2}{m_2}, \end{aligned} \quad (4.24)$$

или уравнениями с угловыми коэффициентами:

$$\begin{aligned} L_1: y &= k_1 x + b_1, \\ L_2: y &= k_2 x + b_2, \end{aligned} \quad (4.25)$$

и не параллельных координатным осям, могут быть получены как следствия из теоремы 4.2. Для этого достаточно привести эти уравнения к общему виду и затем применить к ним теорему 4.2.

Следствие 1. Для того чтобы прямые L_1 и L_2 , заданные каноническими уравнениями (4.24) и не параллельные координатным осям ($\ell_1 \neq 0, m_1 \neq 0, \ell_2 \neq 0, m_2 \neq 0$):

1) пересекались, необходимо и достаточно, чтобы их направляющие векторы $\mathbf{q}_1$ и $\mathbf{q}_2$ были неколлинеарны:

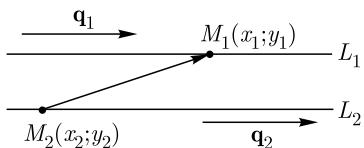


Рис. 4.15

$$\mathbf{q}_1 \nparallel \mathbf{q}_2 \Leftrightarrow \frac{\ell_1}{\ell_2} \neq \frac{m_1}{m_2};$$

2) были параллельны (рис. 4.15), необходимо и достаточно, чтобы

$$\mathbf{q}_1 \parallel \mathbf{q}_2 \nparallel M_1M_2 \Leftrightarrow \frac{\ell_1}{\ell_2} = \frac{m_1}{m_2} \quad \text{и} \quad \frac{x_2 - x_1}{\ell_1} \neq \frac{y_2 - y_1}{m_1}.$$

Следствие 2. Прямые L_1 и L_2 , заданные уравнениями с угловыми коэффициентами (4.25) и не параллельные координатным осям:

- 1) пересекаются тогда и только тогда, когда $k_1 \neq k_2$;
- 2) параллельны тогда и только тогда, когда $k_1 = k_2$ и $b_1 \neq b_2$;
- 3) совпадают тогда и только тогда, когда $k_1 = k_2$ и $b_1 = b_2$.

Следствия 1, 2 предлагаем читателю доказать самостоятельно.

29.2. Частные случаи расположения прямой

Пусть $Ax + By + C = 0$ — общее уравнение прямой в фиксированной декартовой системе координат Oxy . Исследуем расположение этой прямой относительно координатных осей и начала координат в случаях, когда один из коэффициентов A , B или C равен нулю.

1. $A = 0$. Уравнение принимает вид

$$By + C = 0 \Leftrightarrow y = -\frac{B}{C}.$$

Отсюда следует, что прямая параллельна оси Ox . Ее вектор нормали $\mathbf{n} = (0; B)$ перпендикулярен оси Ox .

2. $B = 0$. Тогда $L: Ax + C = 0 \Leftrightarrow x = -\frac{C}{A}$. Прямая L параллельна оси Oy , а ее вектор нормали $\mathbf{n} = (A; 0)$ перпендикулярен оси Oy .

3. $C = 0$. В этом случае $L: Ax + By = 0 \Leftrightarrow y = -\frac{A}{B}x$. Прямая L проходит через начало координат.

Если в третьем случае ($C = 0$) равен нулю еще и один из коэффициентов A или B , то получаем уравнения координатных осей:

- а) $A = 0$ и $C = 0$: $By = 0 \Leftrightarrow y = 0$ — уравнение оси Ox ;
- б) $B = 0$ и $C = 0$: $Ax = 0 \Leftrightarrow x = 0$ — уравнение оси Oy .

§ 30. Расстояние от точки до прямой

Определение 4.10. Расстоянием от точки $M_0(x_0; y_0)$ до прямой L называется длина перпендикуляра M_0H (рис. 4.16), опущенного из точки M_0 на прямую L .

Обозначается расстояние следующим образом: $\rho(M_0, L)$.

Пусть в фиксированной прямоугольной декартовой системе координат Oxy задана прямая L общим уравнением

$$Ax + By + C = 0$$

и дана некоторая точка $M_0(x_0; y_0)$.

Поставим следующую задачу.

Задача 4.5. Найти расстояние $\rho(M_0, L)$ от точки $M_0(x_0; y_0)$ до прямой $L: Ax + By + C = 0$.

Решение. Докажем, что искомое расстояние можно найти по формуле

$$\rho(M_0, L) = \frac{|Ax_0 + By_0 + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}. \quad (4.26)$$

Доказательство. Возьмем на заданной прямой произвольную точку $M(x, y)$. Проведем вектор $\overline{MM_0}$ (рис. 4.17). Очевидно, что модуль проекции вектора $\overline{MM_0}$ на вектор нормали $\mathbf{n} = (A; B)$ прямой L равен длине отрезка M_0P и, как следствие, искомому расстоянию. С учетом сказанного и в соответствии с формулой (3.28) получаем

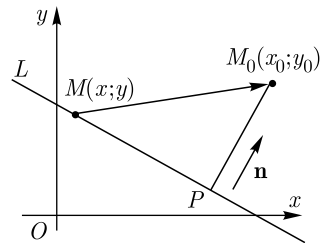


Рис. 4.17

$$\rho(M_0, L) = |\text{пр}_{\mathbf{n}} \overline{MM_0}| = \left| \frac{(\overline{MM_0}, \mathbf{n})}{|\mathbf{n}|} \right|.$$

Поскольку $\overline{MM_0} = (x_0 - x; y_0 - y)$, $\mathbf{n} = (A; B)$ и поэтому $|\mathbf{n}| = \sqrt{A^2 + B^2}$, $(\overline{MM_0}, \mathbf{n}) = A(x_0 - x) + B(y_0 - y)$, то

$$\begin{aligned} \text{пр}_{\mathbf{n}} \overline{MM_0} &= \frac{A(x_0 - x) + B(y_0 - y)}{\sqrt{A^2 + B^2}} = \\ &= \frac{(Ax_0 + By_0 + C) - (Ax + By + C)}{\sqrt{A^2 + B^2}}. \end{aligned}$$

По построению точка $M(x; y) \in L$, поэтому ее координаты удовлетворяют уравнению этой прямой, т. е. $Ax + By + C = 0$. В результате получаем

$$\rho(M_0, L) = |\text{пр}_{\mathbf{n}} \overline{MM_0}| = \frac{|Ax_0 + By_0 + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}. \quad \blacksquare$$

В соответствии с формулой (4.26) для нахождения расстояния $\rho(M_0, L)$ необходимо в левую часть $Ax + By + C$ уравнения прямой подставить вместо x и y координаты x_0 и y_0 точки M_0 и модуль полученного числового выражения $(|Ax_0 + By_0 + C|)$ разделить на число $|\mathbf{n}| = \sqrt{A^2 + B^2}$.

Так, если $M_0(1; -3)$, а $L: 5x - 12y + 24 = 0$, то

$$\rho(M_0, L) = \frac{|5 \cdot 1 - 12 \cdot (-3) + 24|}{\sqrt{5^2 + (-12)^2}} = \frac{65}{13} = 5.$$

Отметим, что если $M_0(x_0; y_0) \in L$, то из формулы (4.26) получаем очевидный результат $\rho(M_0, L) = 0$.

Пример 4.6. Найти наименьшее значение параметра a , при котором система уравнений $\begin{cases} (x-2)^2 + y^2 = a, \\ |x| + 3|y| = 6 \end{cases}$ имеет ровно два различных решения.

Решение. Покажем, что решение данной системы из курса элементарной математики сводится к нахождению расстояния от точки до прямой, а последнее легко находится с помощью формулы (4.26).

Первое уравнение системы задает параметрическое семейство окружностей с центром в точке $M(2; 0)$ и радиусом $R = \sqrt{a}$, $a \geq 0$. Второе уравнение системы задает на плоскости ромб с вершинами в точках $A(0; 2)$, $A_1(0; -2)$, $B(6; 0)$ и $B_1(-6; 0)$.

Значение параметра a , при котором система уравнений будет иметь два различных решения, соответствует ситуации, при которой окружность касается сторон AB и A_1B ромба

(рис. 4.18). В этом случае значение $\sqrt{a}$ равно радиусу окружности и расстоянию от точки M до прямой, содержащей отрезок AB , т. е. $\sqrt{a} = R = \rho(M, AB)$. Поскольку $L_{AB}: x + 3y - 6 = 0$, $M(2; 0)$, то в соответствии с формулой (4.26) имеем

$$\sqrt{a} = \frac{|2 + 3 \cdot 0 - 6|}{\sqrt{1^2 + 3^2}} = \frac{4}{\sqrt{10}} \Rightarrow a = 1,6.$$

Ответ: $a = 1,6$.

Пример 4.7. Написать уравнение биссектрисы внутреннего угла A треугольника ABC , заданного координатами вершин $A(-1; 2)$, $B(5; 10)$, $C(4; -10)$.

Решение. Способ 1 основан на том факте, что расстояния от произвольной точки $M_0(x_0; y_0)$ на биссектрисе AD до каждой из сторон AB и AC , между которыми заключена биссектриса, равны (рис. 4.19).

Уравнения сторон треугольника получим как уравнения прямых, проходящих через две заданные точки:

$$L_{AB}: \frac{x+1}{5+1} = \frac{y-2}{10-2} \Leftrightarrow 4x - 3y + 10 = 0,$$

$$L_{AC}: \frac{x+1}{4+1} = \frac{y-2}{-10-2} \Leftrightarrow 12x + 5y + 2 = 0.$$

Найдем расстояние от точки $M_0(x_0; y_0)$, принадлежащей биссектрисе, до каждой из двух прямых по формуле (4.26):

$$\rho(M_0, L_{AB}) = \frac{|4x_0 - 3y_0 + 10|}{\sqrt{4^2 + (-3)^2}} = \frac{|4x_0 - 3y_0 + 10|}{5};$$

$$\rho(M_0, L_{AC}) = \frac{|12x_0 + 5y_0 + 2|}{\sqrt{12^2 + 5^2}} = \frac{|12x_0 + 5y_0 + 2|}{13}.$$

Из условия $\rho(M_0, L_{AB}) = \rho(M_0, L_{AC})$ получаем

$$\frac{|4x_0 - 3y_0 + 10|}{5} = \frac{|12x_0 + 5y_0 + 2|}{13},$$

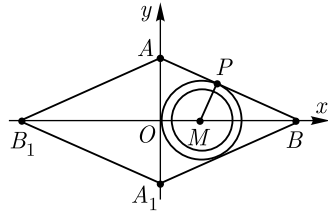


Рис. 4.18

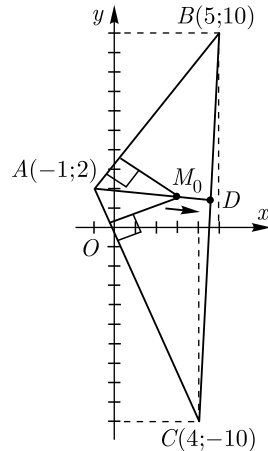


Рис. 4.19

что равносильно совокупности $\begin{cases} x_0 + 8y_0 - 15 = 0, \\ 8x_0 + y_0 + 10 = 0. \end{cases}$ Заменяя в этих равенствах x_0, y_0 на x и y соответственно, получим уравнения двух прямых:

$$L_1: x + 8y - 15 = 0, \quad L_2: 8x + y + 10 = 0.$$

Искомой является та прямая, относительно которой точки B и C расположены в разных полуплоскостях. Этому условию удовлетворяет прямая L_1 . Таким образом,

$$L_{AD}: x + 8y - 15 = 0.$$

Способ 2. Биссектриса AD проходит через точку $A(-1; 2)$. Для записи ее уравнения достаточно найти направляющий вектор прямой L_{AD} . В качестве этого вектора можно взять вектор $\mathbf{q} = \mathbf{a}^\circ + \mathbf{b}^\circ$, где $\mathbf{a}^\circ$ — орт вектора $\overline{AB}$, $\mathbf{b}^\circ$ — орт вектора $\overline{AC}$. Найденный таким образом вектор $\mathbf{q}$ будет направлен по диагонали ромба, построенного на векторах $\mathbf{a}^\circ, \mathbf{b}^\circ$, и потому будет делить угол A пополам.

Найдем орты $\mathbf{a}^\circ$ и $\mathbf{b}^\circ$. Имеем:

$$\overline{AB} = (6; 8), \quad |\overline{AB}| = 10 \Rightarrow \mathbf{a}^\circ = \left(\frac{3}{5}; \frac{4}{5}\right);$$

$$\overline{AC} = (5; -12), \quad |\overline{AC}| = 13 \Rightarrow \mathbf{b}^\circ = \left(\frac{5}{13}; -\frac{12}{13}\right).$$

$$\mathbf{a}^\circ + \mathbf{b}^\circ = \left(\frac{3}{5} + \frac{5}{13}; \frac{4}{5} - \frac{12}{13}\right) = \left(\frac{64}{65}; -\frac{8}{65}\right).$$

Положим $\mathbf{q} = \frac{65}{8}(\mathbf{a}^\circ + \mathbf{b}^\circ)$, т. е. $\mathbf{q} = (8; -1)$.

Теперь можем записать уравнение биссектрисы AD :

$$L_{AD}: \frac{x+1}{8} = \frac{y-2}{-1} \Leftrightarrow x + 8y - 15 = 0.$$

Ответ: $L_{AD}: x + 8y - 15 = 0$.

§ 31. Угол между двумя прямыми на плоскости

Определение 4.11. Углом между прямыми будем называть острый или прямой угол φ (рис. 4.20). Рассмотрим различные способы задания прямых.

1. Прямые L_1 и L_2 заданы общими уравнениями

$$L_1: A_1x + B_1y + C_1 = 0,$$

$$L_2: A_2x + B_2y + C_2 = 0.$$

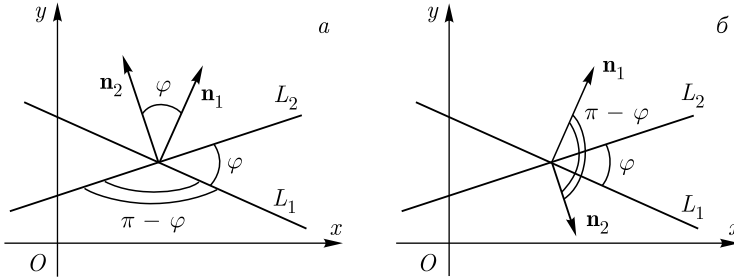


Рис. 4.20

Один из двух смежных углов φ или $(\pi - \varphi)$ (рис. 4.20, а) равен углу между векторами нормалей $\mathbf{n}_1 = (A_1; B_1)$ и $\mathbf{n}_2 = (A_2; B_2)$ этих прямых (рис. 4.20, б).

Поскольку $\cos(\pi - \varphi) = -\cos \varphi$ и $\frac{(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2)}{|\mathbf{n}_1| \cdot |\mathbf{n}_2|} = \cos(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2)$, то косинус острого (или прямого) угла φ можно вычислить по формуле

$$\cos \varphi = \frac{|(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2)|}{|\mathbf{n}_1| \cdot |\mathbf{n}_2|} = \frac{|A_1 A_2 + B_1 B_2|}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2} \sqrt{A_2^2 + B_2^2}}. \quad (4.27)$$

2. Прямые заданы каноническими уравнениями

$$L_1: \frac{x - x_1}{\ell_1} = \frac{y - y_1}{m_1}, \quad L_2: \frac{x - x_2}{\ell_2} = \frac{y - y_2}{m_2}.$$

Пусть φ — угол между прямыми. Тогда $\mathbf{q}_1 = (\ell_1; m_1)$, $\mathbf{q}_2 = (\ell_2; m_2)$ и либо $(\widehat{\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2}) = \varphi$ (рис. 4.21, а), либо $(\widehat{\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2}) = \pi - \varphi$ (рис. 4.21, б).

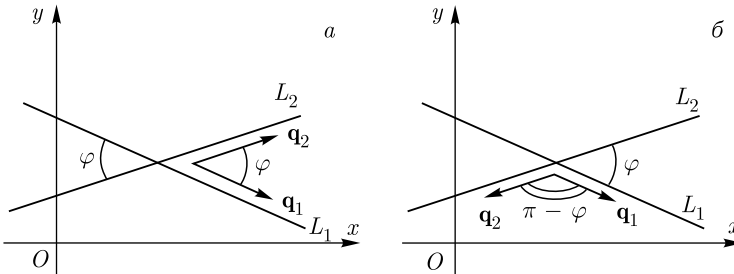


Рис. 4.21

Поэтому косинус угла φ равен

$$\cos \varphi = \frac{|(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2)|}{|\mathbf{q}_1| \cdot |\mathbf{q}_2|} = \frac{|\ell_1 \ell_2 + m_1 m_2|}{\sqrt{\ell_1^2 + m_1^2} \sqrt{\ell_2^2 + m_2^2}}. \quad (4.28)$$

3. Прямые заданы уравнениями с угловыми коэффициентами:

$$L_1: y = k_1x + b_1, \quad L_2: y = k_2x + b_2,$$

причем L_1 не перпендикулярна L_2 . Здесь $k_1 = \operatorname{tg} \varphi_1$, $k_2 = \operatorname{tg} \varphi_2$.

Угол φ между прямыми L_1 и L_2 равен либо $\varphi_2 - \varphi_1$ (рис. 4.22), либо $\pi - (\varphi_2 - \varphi_1)$. Поскольку $\operatorname{tg}(\pi - \varphi) = -\operatorname{tg} \varphi$, то тангенс острого угла φ между прямыми L_1 и L_2 равен

$$\operatorname{tg} \varphi = |\operatorname{tg}(\varphi_2 - \varphi_1)| = \left| \frac{\operatorname{tg} \varphi_2 - \operatorname{tg} \varphi_1}{1 + \operatorname{tg} \varphi_1 \operatorname{tg} \varphi_2} \right|.$$

Но $\operatorname{tg} \varphi_1 = k_1$, $\operatorname{tg} \varphi_2 = k_2$, поэтому

$$\operatorname{tg} \varphi = \left| \frac{k_2 - k_1}{1 + k_1 k_2} \right|. \quad (4.29)$$

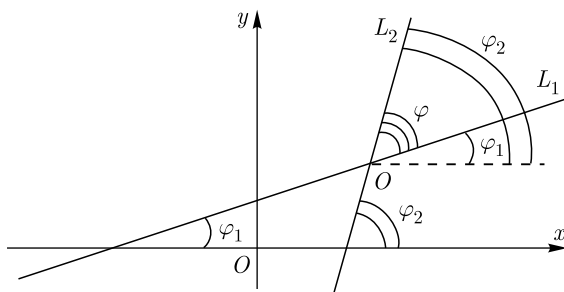


Рис. 4.22

Если под углом φ понимать угол поворота прямой L_1 относительно точки O_1 пересечения прямых L_1 и L_2 против хода часовой стрелки до совмещения с L_2 , то

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{k_2 - k_1}{1 + k_1 k_2}.$$

В частности, эту формулу нужно использовать для нахождения углов в многоугольнике.

Отметим, что необходимые и достаточные условия *перпендикулярности прямых* следуют из формул (4.27) и (4.28):

$$L_1 \perp L_2 \Leftrightarrow A_1 A_2 + B_1 B_2 = 0,$$

если прямые L_1 и L_2 заданы общими уравнениями;

$$L_1 \perp L_2 \Leftrightarrow \ell_1 \ell_2 + m_1 m_2 = 0,$$

если прямые L_1 и L_2 заданы каноническими уравнениями. Действительно, если $L_1 \perp L_2$, то $\varphi = \frac{\pi}{2}$ и $\cos \varphi = 0$ и, как следствие, из (4.27) и (4.28) получаем приведенные условия перпендикулярности прямых L_1 и L_2 .

Утверждение. *Условие перпендикулярности прямых, заданных уравнениями с угловым коэффициентом, имеет следующий вид:*

$$L_1 \perp L_2 \Leftrightarrow k_1 k_2 = -1. \quad (4.30)$$

Доказательство. Если $L_1 \perp L_2$, то можно считать, что $\varphi_2 = \varphi_1 + \frac{\pi}{2}$. Тогда $\operatorname{tg} \varphi_2 = \operatorname{tg} \left(\varphi_1 + \frac{\pi}{2} \right) = -\operatorname{ctg} \varphi_1$, т. е. $k_2 = -\frac{1}{k_1}$ или $k_1 k_2 = -1$. Обратно, если $k_1 k_2 = -1$, т. е. $k_1 k_2 + 1 = 0$, то из формулы (4.29) следует, что $\operatorname{tg} \varphi$ не определен, а тангенс не определен в точках $\frac{\pi}{2} + \pi n$, $n \in \mathbb{Z}$, и поскольку $\varphi \in \left[0; \frac{\pi}{2} \right]$, то $\varphi = \frac{\pi}{2}$ и $L_1 \perp L_2$. ■

§ 32. Нормальное уравнение прямой

Пусть $L: Ax + By + C = 0$ — общее уравнение прямой. Умножим обе части уравнения на некоторое число μ :

$$\mu Ax + \mu By + \mu C = 0 \quad (4.31)$$

и подберем μ так, чтобы имело место равенство

$$(\mu A)^2 + (\mu B)^2 = 1.$$

Последнее равенство можно одновременно рассматривать как уравнение относительно параметра μ . Оно имеет два решения:

$$\mu_1 = \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \quad \mu_2 = -\frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}}.$$

Выбор одного из них подчиним дополнительному условию. Обозначим

$$\mu C = -p, \quad p > 0.$$

Тогда знак μ должен быть противоположным знаку коэффициента C .

Пусть значение μ , удовлетворяющее условию $\mu C < 0$ (при $C \neq 0$), найдено. Поскольку $(\mu A)^2 + (\mu B)^2 = 1$, то можем положить

$$\mu A = \cos \alpha, \quad \mu B = \sin \alpha.$$

С учетом введенных обозначений уравнение (4.31) примет следующий вид:

$$\boxed{L: x \cos \alpha + y \sin \alpha - p = 0}. \quad (4.32)$$

Определение 4.12. Уравнение (4.32) называется *нормальным уравнением прямой*.

Выясним смысл коэффициентов $\cos \alpha$, $\sin \alpha$ и p в уравнении (4.32). Пусть $O(0; 0)$ — начало координат.

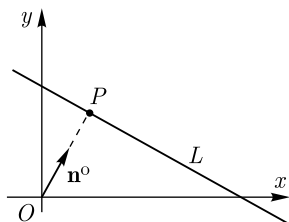


Рис. 4.23

1. Вектор $\mathbf{n}^0 = (\cos \alpha; \sin \alpha)$ является единичным вектором нормали прямой L , сонаправленным с вектором нормали $\mathbf{n} = (A; B)$ этой прямой, если $\mu > 0$ ($C < 0$), и противоположно направленным, если $\mu < 0$ ($C > 0$).

2. Вектор $\mathbf{n}^0 = (\cos \alpha; \sin \alpha)$ с началом в точке O направлен в сторону этой прямой (при $C \neq 0$) (рис. 4.23).

3. Значение параметра p равно расстоянию от начала координат до данной прямой (рис. 4.23), т. е.

$$\rho = |OP| = p.$$

Действительно, в соответствии с формулой (4.26) и с учетом (4.23) получаем

$$\rho(O, L) = \frac{|0 \cdot \cos \alpha + 0 \cdot \sin \alpha - p|}{|\mathbf{n}^0|} = |-p| = p.$$

4. Расстояние от произвольной точки $M_0(x_0; y_0)$ до прямой L , заданной нормальным уравнением (4.32), находится по формуле

$$\rho(M_0, L) = |x_0 \cos \alpha + y_0 \sin \alpha - p|. \quad (4.33)$$

Число $\delta(M_0) = x_0 \cos \alpha + y_0 \sin \alpha - p$ можно использовать для определения положения точки $M_0(x_0; y_0)$ относительно прямой L . Если $\delta(M_0) > 0$, то точки M_0 и O лежат по разные стороны от этой прямой; если же $\delta(M_0) < 0$, то эти точки лежат по одну сторону от прямой L .

Пример 4.8. В треугольнике ABC известны координаты двух вершин: $A(-4; 1)$, $B(8; -1)$; уравнение перпендикуляра CH , опущенного из третьей вершины C на сторону AB : $6x - y - 26 = 0$. Площадь треугольника ABC равна 27; известно также, что вершина C и начало координат лежат по разные стороны от прямой L_{AB} . Найти координаты вершины C .

Решение. Пусть $(x_0; y_0)$ — координаты вершины C . Площадь треугольника ABC в соответствии с формулой (3.46) должна удовлетворять условию $\frac{1}{2} |[\overline{AB}, \overline{AC}]| = 27$. Поскольку $\overline{AB} = (12; -2)$, $\overline{AC} = (x_0 + 4; y_0 - 1)$, то

$$\begin{aligned} \left| \det \begin{pmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 12 & -2 & 0 \\ x_0 + 4 & y_0 - 1 & 0 \end{pmatrix} \right| &= 54 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow |(12(y_0 - 1) + 2(x_0 + 4)) \mathbf{k}| &= 54 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow |x_0 + 6y_0 - 2| = 27 &\Leftrightarrow \begin{cases} x_0 + 6y_0 - 2 = 27, \\ x_0 + 6y_0 - 2 = -27. \end{cases} \quad (4.34) \end{aligned}$$

Для определения координат точки C имеем две возможные системы двух уравнений: одно уравнение из совокупности уравнений (4.34) и уравнение высоты CH : $6x_0 - y_0 - 26 = 0$.

Составим и решим каждую из двух систем.

$$\begin{aligned} \begin{cases} x_0 + 6y_0 - 2 = 27, \\ 6x_0 - y_0 - 26 = 0 \end{cases} &\Rightarrow C_1(5; 4), \\ \begin{cases} x_0 + 6y_0 - 2 = -27, \\ 6x_0 - y_0 - 26 = 0 \end{cases} &\Rightarrow C_2\left(\frac{131}{37}; -\frac{176}{37}\right). \end{aligned}$$

Для выбора искомой точки C воспользуемся последним условием — третья вершина C треугольника и начало координат лежат по разные стороны от прямой L_{AB} .

Запишем каноническое уравнение прямой L_{AB} :

$$\frac{x + 4}{12} = \frac{y - 1}{-2}$$

и преобразуем его к виду нормального уравнения

$$L_{AB}: x + 6y - 2 = 0 \Leftrightarrow \frac{1}{\sqrt{37}}x + \frac{6}{\sqrt{37}}y - \frac{2}{\sqrt{37}} = 0.$$

Определим знаки величин $\delta(C_1)$ и $\delta(C_2)$:

$$\begin{aligned} \delta(C_1) &= \frac{5}{\sqrt{37}} + \frac{6 \cdot 4}{\sqrt{37}} - \frac{2}{\sqrt{37}} > 0, \\ \delta(C_2) &= \frac{131}{(\sqrt{37})^3} - \frac{6 \cdot 176}{(\sqrt{37})^3} - \frac{2}{\sqrt{37}} < 0. \end{aligned}$$

Поскольку $\delta(C_1) > 0$, то точка C_1 и начало координат лежат по разные стороны от прямой L_{AB} , а точка C_2 и начало координат — по одну сторону. Значит, $C = C_1$.

Ответ: $C(5; 4)$.

§ 33. Уравнение пучка прямых

Определение 4.13. *Пучком прямых* называется множество прямых, проходящих через данную точку $M_0(x_0; y_0)$, называемую *центром пучка*.

Пусть

$$\begin{aligned} L_1: A_1x + B_1y + C_1 &= 0, \\ L_2: A_2x + B_2y + C_2 &= 0 \end{aligned} \quad (4.35)$$

— общие уравнения двух прямых, пересекающихся в точке $M_0(x_0; y_0)$. Тогда уравнение пучка прямых, т. е. уравнение произвольной прямой пучка, может быть записано в виде

$$\alpha(A_1x + B_1y + C_1) + \beta(A_2x + B_2y + C_2) = 0, \quad (4.36)$$

или

$$(\alpha A_1 + \beta A_2)x + (\alpha B_1 + \beta B_2)y + (\alpha C_1 + \beta C_2) = 0. \quad (4.37)$$

Назовем прямые L_1 и L_2 *порождающими прямыми* пучка.

Можно показать, что необходимым и достаточным условием принадлежности некоторой прямой $L: A'x + B'y + C' = 0$ пучку прямых (4.36) является существование чисел α, β таких, что

$$\begin{aligned} A' &= \alpha A_1 + \beta A_2, \\ B' &= \alpha B_1 + \beta B_2, \\ C' &= \alpha C_1 + \beta C_2, \end{aligned} \quad (4.38)$$

т. е. левая часть общего уравнения прямой L должна быть линейной комбинацией левых частей уравнений (4.35) — порождающих прямых пучка.

Заметим, что при $\beta = 0$ уравнение пучка (4.36) задает порождающую прямую L_1 , а при $\alpha = 0$ — прямую L_2 .

Для всех $\alpha, \alpha \neq 0$, уравнение пучка (4.36) можно переписать в равносильной форме

$$A_1x + B_1y + C_1 + \lambda(A_2x + B_2y + C_2) = 0. \quad (4.39)$$

Здесь $\lambda = \frac{\beta}{\alpha}$.

Уравнение (4.39) задает все прямые пучка (4.36), в частности, порождающую прямую L_1 при $\lambda = 0$, кроме порождающей прямой L_2 .

Для выделения из пучка определенной прямой используют дополнительные условия (коллинеарность или ортогональность искомой прямой некоторому вектору (прямой)).

Пример 4.9. Из пучка прямых

$$2x - y + 3 + \lambda(x + 3y - 4) = 0,$$

порожденного прямыми $L_1: 2x - y + 3 = 0$ и $L_2: x + 3y - 4 = 0$, выделить прямую L_3 , перпендикулярную прямой $L_0: 4x - 2y - 7 = 0$.

Решение. Перепишем уравнение пучка в виде (4.37):

$$(2 + \lambda)x + (-1 + 3\lambda)y + 3 - 4\lambda = 0.$$

Поскольку $L_3 \perp L_0$, то $4(2 + \lambda) + (-2)(-1 + 3\lambda) = 0$, откуда $\lambda = 5$ и искомое уравнение получается в виде

$$L_3: (2 + 5)x + (-1 + 3 \cdot 5)y + 3 - 4 \cdot 5 = 0;$$

после преобразования получаем

$$\text{Ответ: } L_3: 7x + 14y - 17 = 0.$$

Вопросы для самоконтроля к гл. 4

1. Напишите каноническое и параметрические уравнения прямой, проходящей через точку $M_0(-2; 5)$ с заданным направляющим вектором $\mathbf{q} = (3; -4)$.

2. Напишите каноническое уравнение прямой, проходящей через точку $M_0(x_0; y_0)$, если известно ее общее уравнение: $ax + by + c = 0$.

3. Как связаны между собой координаты $(A; B)$ вектора нормали и координаты $(\ell; m)$ направляющего вектора прямой?

4. Напишите канонические уравнения осей Ox и Oy декартовой прямоугольной системы координат на плоскости.

5. Пусть $ax + by + c = 0$ — общее уравнение прямой L , точка $M_0(x_0; y_0)$ не принадлежит этой прямой. Напишите уравнение перпендикуляра, опущенного из точки M_0 на прямую L .

6. Найдите «длины» отрезков, отсекаемых прямой $ax + by + c = 0$, $c \neq 0$ на координатных осях. Запишите уравнение этой прямой в отрезках.

7. Напишите уравнение прямой, проходящей через точку $M_0(x_0; y_0)$ и перпендикулярной к вектору $\mathbf{n} = (A; B)$.

8. Запишите формулу расстояния от точки $M_0(x_0; y_0)$ до прямой $L: 2x - 7y + 11 = 0$.

9. Напишите формулу угла между прямыми $L_1: ax + by + c = 0$ и $L_2: \frac{x - x_0}{\ell} = \frac{y - y_0}{m}$.

10. Запишите условия: а) параллельности, б) перпендикулярности двух прямых, заданных: 1) общими уравнениями, 2) каноническими уравнениями.

ническими уравнениями, 3) уравнениями с угловыми коэффициентами.

11. Чему равно расстояние от прямой $L: \frac{3}{5}x - \frac{4}{5}y - 11 = 0$ до начала координат? Как называется записанное уравнение прямой?

Упражнения

1. Напишите уравнения прямых L_1 и L_2 , проходящих через точку $M(-4; 2)$ так, что L_1 параллельна, а L_2 перпендикулярна прямой $L_0: x - 2y - 4 = 0$.

2. Напишите уравнение прямой, проходящей через точки $M_1(-5; -1)$ и $M_2(2; 3)$.

3. Напишите уравнение высоты BH , медианы AM и биссектрисы CK угла ACB треугольника ABC , заданного координатами своих вершин $A(-4; -3)$, $B(-1; 4)$, $C(2; 0)$. Найдите также величину угла ACB и длину высоты BH .

4. Найдите точку M' , симметричную точке $M(1; -3)$ относительно прямой $L: x + 2y - 5 = 0$.

5. Найдите угол между прямыми:

а) $L_1: 3x - 4y + 12 = 0$, $L_2: y = x$;

б) $L_1: \frac{x+2}{3} = \frac{y-6}{-1}$, $L_2: 3x - y - 3 = 0$;

в) $L_1: y = \frac{x}{2}$, $L_2: y = \frac{x}{3}$.

6. Найдите расстояние между параллельными прямыми:

а) $L_1: 2x - y + 1 = 0$, $L_2: 2x - y + 6 = 0$;

б) $L_1: \frac{x-3}{3} = \frac{y+2}{-4}$, $L_2: \frac{x}{-3} = \frac{y-2}{4}$;

в) $L_1: y = \frac{5}{12}x - 1$, $L_2: y = \frac{5}{12}x + 3$.

7. В треугольнике ABC известны координаты вершины $C(6; -7)$, угловой коэффициент $k = -\frac{1}{2}$ прямой AC , а также уравнения стороны $AB: x - y - 1 = 0$ и медианы $BK: 4x - y - 13 = 0$. Найдите площади треугольника ABC и треугольника MBN , отсекаемого прямой $x + 2y - 1 = 0$ от треугольника ABC .

8. Напишите уравнение прямой, равноудаленной от прямых $L_1: 4x - 3y - 5 = 0$ и $L_2: 3x + 4y - 10 = 0$.

9. Найдите координаты точки пересечения биссектрис внутренних углов треугольника, образованного прямой $3x + 4y - 12 = 0$ и отрезками координатных осей.

10. Найдите координаты вершин параллелограмма, если известны уравнения $2x - y - 1 = 0$ и $3x - y - 3 = 0$ двух его смежных сторон, а также уравнение $12x - 5y - 9 = 0$ диагонали, заключенной между этими сторонами, и ее длина $\rho = 13$.

11. В условиях упр. 10 найдите расстояние между параллельными сторонами параллелограмма и острый угол.

12. Найдите точки M_1 , M_2 , M_3 , симметричные центру окружности, вписанной в равнобедренный треугольник с основанием 6 и боковыми сторонами 5, относительно всех сторон треугольника. Основание треугольника лежит на оси Ox ; одна вершина расположена в начале системы координат, а еще одна имеет положительную ординату.

Ответы

1. а) $L_1: x - 2y + 8 = 0$; б) $L_2: 2x + y + 6 = 0$.

2. $4x - 7y + 13 = 0$. **3.** $L_{BH}: 2x + y - 2 = 0$,

$L_{AM}: 10x - 9y + 13 = 0$, $L_{CK}: \frac{x-2}{-(2\sqrt{5}+3)} = \frac{y}{4-\sqrt{5}}$;

$\angle ACB = \arccos \frac{2\sqrt{5}}{25}$; $BH = \frac{11\sqrt{5}}{5}$. **4.** $M'(5; 5)$.

5. а) $\arccos \frac{7\sqrt{2}}{10}$; б) $\frac{\pi}{2}$; в) $\arccos \frac{7\sqrt{2}}{10}$. **6.** а) $\sqrt{5}$; б) 0; в) $\frac{48}{13}$.

7. $S_{ABC} = 36$, $S_{MBN} = 9$. **8.** $x - 7y + 5 = 0$, $7x + y - 15 = 0$.

9. $x = 1$, $y = 1$. **10.** *Вариант 1:* (2; 3), (5; 9), (7; 15), (4; 9); *вариант 2:* (2; 3), (-1; -3), (-3; -9), (0; -3).

11. $a = \frac{3}{\sqrt{10}}$, $b = \frac{2}{\sqrt{5}}$, $\varphi = \arccos \frac{7\sqrt{2}}{10}$.

12. $M_1 \left(3; -\frac{3}{2} \right)$, $M_2 \left(\frac{3}{5}; \frac{33}{10} \right)$, $M_3 \left(\frac{27}{5}; \frac{33}{10} \right)$.

Глава 5

ПЛОСКОСТЬ И ПРЯМАЯ В ПРОСТРАНСТВЕ

Вывод уравнений плоскости по аналогии с прямой на плоскости выполним в виде серии теоретических задач. Общий подход к получению уравнений плоскости повторяет основные приемы, использованные при выводе уравнений прямой на плоскости. В задачах на плоскость в пространстве, как правило, известны точка, через которую проходит плоскость, и некоторые дополнительные условия, позволяющие однозначно выбрать из множества плоскостей, проходящих через данную точку, искомую плоскость.

Для прямой на плоскости в качестве дополнительного условия, позволяющего написать уравнение прямой, выступал либо ее направляющий вектор, либо вектор нормали. В случае с плоскостью в пространстве таким дополнительным условием является либо пара неколлинеарных векторов, параллельных искомой плоскости, либо вектор, ортогональный данной плоскости, т. е. вектор нормали плоскости.

§ 34. Уравнение плоскости, проходящей через заданную точку перпендикулярно заданному вектору

Пусть в пространстве зафиксирована декартова прямоугольная система координат $Oxyz$. Решим следующую задачу.

Задача 5.1. Написать уравнение плоскости P , проходящей через точку $M_0(x_0; y_0; z_0)$ и перпендикулярной ненулевому вектору $\mathbf{n} = (A; B; C)$.

Решение. Пусть $M(x, y, z)$ — некоторая точка пространства. Точка $M(x, y, z)$ принадлежит плоскости P тогда и только тогда, когда вектор

$$\overrightarrow{M_0M} = (x - x_0; y - y_0; z - z_0)$$

перпендикулярен вектору $\mathbf{n} = (A; B; C)$ (рис. 5.1). В этом случае (точка M — произвольная точка плоскости P) вектор $\mathbf{n}$

перпендикулярен всякому вектору $\overline{M_0M}$, лежащему в плоскости P , и, как следствие, перпендикулярен плоскости P .

Используя необходимое и достаточное условия ортогональности двух векторов (формулы (3.31) и (3.36)), получаем уравнение плоскости P в векторной форме

$$P: (\overline{M_0M}, \mathbf{n}) = 0, \quad (5.1)$$

или в координатной форме

$$P: A(x - x_0) + B(y - y_0) + C(z - z_0) = 0. \quad (5.2)$$

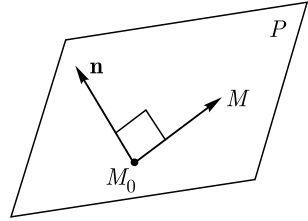


Рис. 5.1

Определение 5.1. Уравнение (5.2) называется *уравнением плоскости, проходящей через заданную точку $M_0(x_0; y_0; z_0)$ перпендикулярно заданному вектору $\mathbf{n} = (A; B; C)$* .

§ 35. Общее уравнение плоскости

Теорема 5.1. Уравнение всякой плоскости в заданной декартовой прямоугольной системе координат $Oxyz$ является алгебраическим уравнением первой степени

$$P: Ax + By + Cz + D = 0, \quad (5.3)$$

и обратно, всякое линейное уравнение (5.3) определяет в заданной декартовой системе координат некоторую плоскость. При этом вектор $\mathbf{n} = (A; B; C)$, составленный из первых трех коэффициентов уравнения (5.3), перпендикулярен плоскости P .

Доказательство начнем с прямого утверждения. Пусть плоскость P задана уравнением (5.2), причем $A^2 + B^2 + C^2 \neq 0$. Перепишем уравнение в следующем виде:

$$Ax + By + Cz + (-Ax_0 - By_0 - Cz_0) = 0.$$

Введем обозначение

$$D = -Ax_0 - By_0 - Cz_0.$$

В итоге получили уравнение (5.3).

Докажем теперь обратное утверждение. Дано линейное уравнение (5.3). Требуется доказать, что оно определяет некоторую

плоскость P . Пусть $(x_0; y_0; z_0)$ — некоторое фиксированное решение уравнения (5.3), т. е.

$$Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D = 0. \quad (5.4)$$

Решение уравнения (5.3) при наложенных ограничениях на его коэффициенты существует (теорема 2.9). Вычтем из левой части уравнения (5.3) левую часть равенства (5.4). В итоге получим уравнение

$$A(x - x_0) + B(y - y_0) + C(z - z_0) = 0, \quad (5.5)$$

равносильное уравнению (5.3). Но уравнение (5.5) является уравнением плоскости, проходящей через точку $M_0(x_0; y_0; z_0)$ и перпендикулярной вектору $\mathbf{n} = (A; B; C)$.

Таким образом, обратное утверждение также доказано. Одновременно доказано, что вектор $\mathbf{n} = (A; B; C)$, координатами которого являются коэффициенты уравнения (5.3), перпендикулярен плоскости, заданной этим уравнением. ■

Определение 5.2. Уравнение (5.3) называется *общим уравнением плоскости*.

Определение 5.3. Всякий ненулевой вектор $\mathbf{n}$, перпендикулярный плоскости P , называется *вектором нормали* этой плоскости.

§ 36. Уравнение плоскости, проходящей через заданную точку параллельно двум неколлинеарным векторам

Задача 5.2. Написать уравнение плоскости P , проходящей через заданную точку $M_0(x_0; y_0; z_0)$ и параллельной двум неколлинеарным векторам $\mathbf{a}_1 = (\ell_1; m_1; n_1)$ и $\mathbf{a}_2 = (\ell_2; m_2; n_2)$.

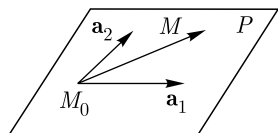


Рис. 5.2

Решение. Пусть $M(x; y; z)$ — некоторая точка пространства.

Построим вектор $\overline{M_0M} = (x - x_0; y - y_0; z - z_0)$ (рис. 5.2). Точка M принадлежит плоскости P тогда и только тогда, когда тройка векторов $\overline{M_0M}$, $\mathbf{a}_1$, $\mathbf{a}_2$ компланарна, т. е. когда смешанное произведение этих векторов равно нулю:

$$P: (\overline{M_0M}, \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2) = 0, \quad (5.6)$$

или в координатной форме

$$P: \begin{vmatrix} x - x_0 & y - y_0 & z - z_0 \\ \ell_1 & m_1 & n_1 \\ \ell_2 & m_2 & n_2 \end{vmatrix} = 0. \quad (5.7)$$

Уравнения (5.6) и (5.7) являются искомыми уравнениями плоскости P соответственно в векторной и координатной формах.

Разложим определитель (5.7) по первой строке:

$$\begin{vmatrix} m_1 & n_1 \\ m_2 & n_2 \end{vmatrix} (x - x_0) - \begin{vmatrix} \ell_1 & n_1 \\ \ell_2 & n_2 \end{vmatrix} (y - y_0) + \begin{vmatrix} \ell_1 & m_1 \\ \ell_2 & m_2 \end{vmatrix} (z - z_0) = 0,$$

или

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} m_1 & n_1 \\ m_2 & n_2 \end{vmatrix} x + \left(- \begin{vmatrix} \ell_1 & n_1 \\ \ell_2 & n_2 \end{vmatrix} \right) y + \begin{vmatrix} \ell_1 & m_1 \\ \ell_2 & m_2 \end{vmatrix} z + \\ + \left(- \begin{vmatrix} m_1 & n_1 \\ m_2 & n_2 \end{vmatrix} x_0 + \begin{vmatrix} \ell_1 & n_1 \\ \ell_2 & n_2 \end{vmatrix} y_0 - \begin{vmatrix} \ell_1 & m_1 \\ \ell_2 & m_2 \end{vmatrix} z_0 \right) = 0. \end{aligned}$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} A &= \begin{vmatrix} m_1 & n_1 \\ m_2 & n_2 \end{vmatrix}, \quad B = - \begin{vmatrix} \ell_1 & n_1 \\ \ell_2 & n_2 \end{vmatrix}, \quad C = \begin{vmatrix} \ell_1 & m_1 \\ \ell_2 & m_2 \end{vmatrix}, \\ D &= - \begin{vmatrix} m_1 & n_1 \\ m_2 & n_2 \end{vmatrix} x_0 + \begin{vmatrix} \ell_1 & n_1 \\ \ell_2 & n_2 \end{vmatrix} y_0 - \begin{vmatrix} \ell_1 & m_1 \\ \ell_2 & m_2 \end{vmatrix} z_0. \end{aligned}$$

С учетом этих обозначений уравнение плоскости P принимает вид общего уравнения плоскости

$$P: Ax + By + Cz + D = 0. \quad \blacksquare$$

Решение задачи 5.2, т. е. уравнение плоскости, проходящей через заданную точку $M_0(x_0; y_0; z_0)$ параллельно векторам $\mathbf{a}_1 = (\ell_1; m_1; n_1)$ и $\mathbf{a}_2 = (\ell_2; m_2; n_2)$, можно записать также в виде параметрических уравнений

$$P: \mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \alpha_1 \mathbf{a}_1 + \alpha_2 \mathbf{a}_2, \quad \alpha_1, \alpha_2 \in \mathbb{R}, \quad (5.8)$$

или в координатной форме

$$P: \begin{cases} x = x_0 + \alpha_1 \ell_1 + \alpha_2 \ell_2, \\ y = y_0 + \alpha_1 m_1 + \alpha_2 m_2, \\ z = z_0 + \alpha_1 n_1 + \alpha_2 n_2. \end{cases} \quad (5.9)$$

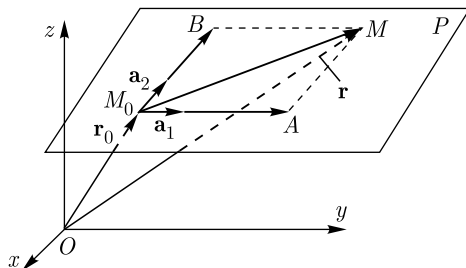


Рис. 5.3

Действительно, пусть $\mathbf{r}_0 = \overline{OM_0}$ и $\mathbf{r} = \overline{OM}$ — радиусы-векторы точек M_0 и M , лежащих в плоскости P (рис. 5.3). Тогда

$$\overline{M_0M} = \mathbf{r} - \mathbf{r}_0. \quad (5.10)$$

С другой стороны, вектор $\overline{M_0M}$ можно разложить по двум неколлинеарным векторам $\mathbf{a}_1$ и $\mathbf{a}_2$, лежащим в плоскости P :

$$\overline{M_0M} = \alpha_1 \mathbf{a}_1 + \alpha_2 \mathbf{a}_2, \quad \alpha_1, \alpha_2 \in \mathbb{R}. \quad (5.11)$$

Из векторных равенств (5.10) и (5.11) следует, что

$$\mathbf{r} - \mathbf{r}_0 = \alpha_1 \mathbf{a}_1 + \alpha_2 \mathbf{a}_2,$$

или

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \alpha_1 \mathbf{a}_1 + \alpha_2 \mathbf{a}_2.$$

Отметим, что использование равенства нулю смешанного произведения трех компланарных векторов и равенства нулю скалярного произведения двух ортогональных векторов — *два основных общих способа* получения уравнения плоскости. Все остальные сводятся к ним.

§ 37. Уравнение плоскости, проходящей через три точки

Пусть в пространстве зафиксирована декартова прямоугольная система координат $Oxyz$. Решим следующую задачу.

Задача 5.3. Написать уравнение плоскости P , проходящей через три заданные точки $M_1(x_1; y_1; z_1)$, $M_2(x_2; y_2; z_2)$, $M_3(x_3; y_3; z_3)$, не лежащие на одной прямой.

Решение. Данная задача легко сводится к задаче 5.2. Действительно, плоскость P проходит через точку $M_1(x_1; y_1; z_1)$ параллельно двум неколлинеарным векторам

$$\begin{aligned} \overline{M_1M_2} &= (x_2 - x_1; y_2 - y_1; z_2 - z_1), \\ \overline{M_1M_3} &= (x_3 - x_1; y_3 - y_1; z_3 - z_1) \end{aligned}$$

(рис. 5.4). А это исходные условия задачи 2. Поэтому решением задачи 3 являются уравнения

$$P: (\overline{M_1M}, \overline{M_1M_2}, \overline{M_1M_3}) = 0$$

— в векторной и

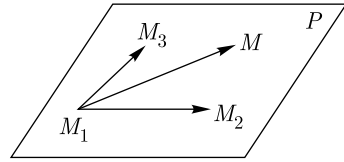


Рис. 5.4

$$P: \begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (5.12)$$

— в координатной форме.

Определитель в левой части уравнения (5.12), а значит, и уравнение плоскости P , проходящей через три заданные точки, можно записать еще в одном виде:

$$P: \begin{vmatrix} x & y & z & 1 \\ x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \end{vmatrix} = 0. \quad (5.13)$$

Для доказательства равенства определителей в формулах (5.13) и (5.12) достаточно в определителе (5.13) вычесть вторую строку из первой, третьей и четвертой и затем разложить полученный определитель по последнему столбцу. ■

§ 38. Уравнение плоскости в отрезках

В качестве трех точек, через которые проходит плоскость P , можно взять точки M_1, M_2, M_3 пересечения данной плоскости с координатными осями (при условии, что плоскость не проходит через начало координат), т. е. $M_1(a; 0; 0)$, $M_2(0; b; 0)$, $M_3(0; 0; c)$, $a \neq 0$, $b \neq 0$, $c \neq 0$. В этом частном случае задачи 5.3 говорят, что плоскость P отсекает на координатных осях Ox , Oy и Oz отрезки a , b и c соответственно (рис. 5.5).

В соответствии с формулой (5.12) уравнение плоскости P будет иметь следующий вид:

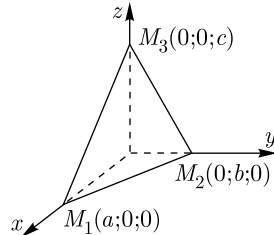


Рис. 5.5

$$P: \begin{vmatrix} x - a & y & z \\ -a & b & 0 \\ -a & 0 & c \end{vmatrix} = 0,$$

или $bc(x - a) + acy + abz = 0$.

Разделив обе части данного уравнения на произведение abc , получим окончательно

$$P: \frac{x}{a} + \frac{y}{b} + \frac{z}{c} = 1. \quad (5.14)$$

Определение 5.4. Уравнение (5.14) называется *уравнением плоскости в отрезках*.

Замечание. Знаки коэффициентов a, b, c в уравнении (5.14) определяются положением точек M_1, M_2 и M_3 на соответствующих координатных осях, а именно: $a > 0$, если плоскость P пересекает ось Ox в точке M_1 , принадлежащей положительной части оси Ox и $a < 0$, если точка M_1 принадлежит отрицательной части оси Ox ; аналогично определяются знаки коэффициентов b и c .

Рассмотрим несколько типовых примеров на получение уравнения плоскости.

Пример 5.1. Написать уравнение плоскости P , проходящей через точку $M_0(-2; 1; -3)$ параллельно плоскости $P_0: 4x - 3y + 5z + 7 = 0$.

Решение. По условию задачи $P \parallel P_0$. Поэтому вектор нормали $\mathbf{n}_0 = (4; -3; 5)$ плоскости P_0 перпендикулярен также плоскости P , т. е. его можно взять в качестве вектора нормали этой плоскости. В соответствии с формулой (5.2) получаем искомое уравнение

$$P: 4(x - (-2)) - 3(y - 1) + 5(z - (-3)) = 0,$$

или

$$P: 4x - 3y + 5z + 26 = 0.$$

Ответ: $P: 4x - 3y + 5z + 26 = 0$.

Пример 5.2. Написать уравнение плоскости P , проходящей через точки $A(-4; 0; 0)$, $B(2; -3; 6)$, $C(0; 0; 3)$.

Решение. Поскольку точка A лежит на оси Ox , а точка C — на оси Oz , то удобно воспользоваться уравнением (5.14) при $a = -4$, $c = 3$ и пока неопределенном параметре b :

$$\frac{x}{-4} + \frac{y}{b} + \frac{z}{3} = 1. \quad (5.15)$$

Для определения значения параметра b (величины отрезка, отсекаемого на оси Oy) подставим в уравнение (5.15) координаты точки B , принадлежащей плоскости:

$$\frac{2}{-4} + \frac{-3}{b} + \frac{6}{3} = 1,$$

откуда получаем $b = 6$.

В итоге имеем

$$P: \frac{x}{-4} + \frac{y}{6} + \frac{z}{3} = 1 \Leftrightarrow 3x - 2y - 4z + 12 = 0.$$

Ответ: $P: 3x - 2y - 4z + 12 = 0$.

Пример 5.3. Написать уравнение плоскости P , проходящей через две точки $M_1(-2; 3; 0)$, $M_2(1; -1; 4)$ параллельно вектору $\mathbf{a} = (3; 1; -1)$.

Решение. Поставленная задача сводится к задаче 5.2: плоскость P проходит через точку $M_1(-2; 3; 0)$ параллельно двум неколлинеарным (проверьте!) векторам

$$\overline{M_1M_2} = (3; -4; 4), \quad \mathbf{a} = (3; 1; -1).$$

В соответствии с формулой (5.7) получим уравнение плоскости

$$P: \begin{vmatrix} x+2 & y-3 & z \\ 3 & -4 & 4 \\ 3 & 1 & -1 \end{vmatrix} = 0.$$

Прибавив ко второй строке определителя третью, умноженную на 4:

$$P: \begin{vmatrix} x+2 & y-3 & z \\ 15 & 0 & 0 \\ 3 & 1 & -1 \end{vmatrix} = 0,$$

и разложив полученный определитель по второй строке, будем иметь окончательно

$$P: y + z - 3 = 0.$$

Ответ: $P: y + z - 3 = 0$.

§ 39. Взаимное расположение двух плоскостей

Пусть

$$\begin{aligned} P_1: A_1x + B_1y + C_1z + D_1 &= 0, \\ P_2: A_2x + B_2y + C_2z + D_2 &= 0 \end{aligned} \tag{5.16}$$

— уравнения двух плоскостей в декартовой прямоугольной системе координат.

Как и в случае с прямой на плоскости (§ 29), возможны три различных случая взаимного расположения плоскостей P_1 и P_2 :

- 1) плоскости пересекаются;
- 2) плоскости параллельны;
- 3) плоскости совпадают.

Плоскостям P_1 и P_2 соответствуют их векторы нормалей $\mathbf{n}_1 = (A_1; B_1; C_1)$ и $\mathbf{n}_2 = (A_2; B_2; C_2)$. Очевидно, что если плоскости P_1 и P_2 пересекаются, то векторы $\mathbf{n}_1$ и $\mathbf{n}_2$ не коллинеарны; следовательно, их координаты не пропорциональны. Легко показать, что непропорциональность координат векторов нормалей $\mathbf{n}_1$ и $\mathbf{n}_2$ является необходимым и достаточным условием пересечения плоскостей P_1 и P_2 .

Если же плоскости P_1 и P_2 параллельны или совпадают, то их векторы нормалей $\mathbf{n}_1$ и $\mathbf{n}_2$ коллинеарны и соответственно имеют место равенства

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2} = \frac{C_1}{C_2}.$$

Если при этом и $\frac{D_1}{D_2} = \frac{A_1}{A_2}$, т. е. пропорциональны все четыре коэффициента в уравнениях (5.16), то плоскости P_1 и P_2 совпадают. Если же $\frac{D_1}{D_2} \neq \frac{A_1}{A_2}$, то плоскости P_1 и P_2 параллельны.

Приведенные рассуждения о взаимном расположении двух плоскостей позволяют сформулировать следующую теорему.

Теорема 5.2. *Для того чтобы плоскости P_1 и P_2 (5.16):*

1) *пересекались, необходимо и достаточно, чтобы выполнялось хотя бы одно из неравенств*

$$\frac{A_1}{A_2} \neq \frac{B_1}{B_2}, \quad \frac{A_1}{A_2} \neq \frac{C_1}{C_2}, \quad \frac{B_1}{B_2} \neq \frac{C_1}{C_2}, \quad (5.17)$$

что равносильно тому, что хотя бы один из определителей

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} B_1 & C_1 \\ B_2 & C_2 \end{vmatrix}, \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} C_1 & A_1 \\ C_2 & A_2 \end{vmatrix}, \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{vmatrix}$$

отличен от нуля;

2) *были параллельны, необходимо и достаточно, чтобы выполнялись соотношения*

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2} = \frac{C_1}{C_2} \neq \frac{D_1}{D_2}, \quad (5.18)$$

что равносильно условиям $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = 0$, причем хотя бы один из определителей

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} A_1 & D_1 \\ A_2 & D_2 \end{vmatrix}, \quad \Delta_5 = \begin{vmatrix} B_1 & D_1 \\ B_2 & D_2 \end{vmatrix}, \quad \Delta_6 = \begin{vmatrix} C_1 & D_1 \\ C_2 & D_2 \end{vmatrix}$$

отличен от нуля;

3) совпадали, необходимо и достаточно, чтобы выполнялись равенства

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{D_1}{D_2}, \quad (5.19)$$

что равносильно равенству нулю всех шести определителей $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_6$.

Условие перпендикулярности двух пересекающихся плоскостей, заданных общими уравнениями (5.16), имеет такой же вид, как и условие перпендикулярности двух прямых (4.23) (§ 29)

$$P_1 \perp P_2 \Leftrightarrow \mathbf{n}_1 \perp \mathbf{n}_2 \Leftrightarrow (\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2) = 0$$

— в векторной и

$$P_1 \perp P_2 \Leftrightarrow A_1 A_2 + B_1 B_2 + C_1 C_2 = 0 \quad (5.20)$$

— в координатной формах.

§ 40. Частные случаи расположения плоскости

Пусть

$$P: Ax + By + Cz + D = 0 \quad (5.21)$$

— уравнение плоскости P в заданной декартовой прямоугольной системе координат $Oxyz$. Исследуем расположение относительно системы координат неполных уравнений плоскости, т. е. уравнений (5.21), в которых хотя бы один из четырех коэффициентов A, B, C, D равен нулю. Естественно, коэффициенты A, B, C при этом одновременно в нуль не обращаются. Справедливы следующие утверждения.

- 1) $A = 0 \Rightarrow P \parallel Ox$;
- 2) $B = 0 \Rightarrow P \parallel Oy$;
- 3) $C = 0 \Rightarrow P \parallel Oz$;
- 4) $D = 0 \Rightarrow O(0; 0; 0) \in P$;
- 5) $A = 0, B = 0 \Rightarrow P \parallel Oxy \Leftrightarrow P \perp Oz$;
- 6) $A = 0, C = 0 \Rightarrow P \parallel Oxz \Leftrightarrow P \perp Oy$;
- 7) $B = 0, C = 0 \Rightarrow P \parallel Oyz \Leftrightarrow P \perp Ox$.

Докажем в качестве примера утверждения 1) и 5).

1) Если $A = 0$, то уравнение плоскости P (5.21) принимает следующий вид: $P: By + Cz + D = 0$. Вектор нормали $\mathbf{n} = (0; B; C)$ этой плоскости перпендикулярен оси Ox (орту $\mathbf{i} = (1; 0; 0)$), а плоскость P в этом случае параллельна оси Ox .

5) Если $A = 0$ и $B = 0$, то в уравнении (5.21) остаются два слагаемых $P: Cz + D = 0$. Вектор нормали $\mathbf{n} = (0; 0; C)$ этой плоскости перпендикулярен плоскости Oxy (вектору $\alpha\mathbf{i} + \beta\mathbf{j}$, $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$), соответственно плоскость P параллельна координатной плоскости Oxy и перпендикулярна координатной оси Oz .

Важные частные случаи:

$A = 0, D = 0$ — плоскость содержит ось Ox ;

$B = 0, D = 0$ — плоскость содержит ось Oy ;

$C = 0, D = 0$ — плоскость содержит ось Oz ;

$A = 0, B = 0, D = 0 \Rightarrow Cz = 0 \Leftrightarrow z = 0$ — уравнение координатной плоскости Oxy ;

$A = 0, C = 0, D = 0 \Rightarrow By = 0 \Leftrightarrow y = 0$ — уравнение координатной плоскости Oxz ;

$B = 0, C = 0, D = 0 \Rightarrow Ax = 0 \Leftrightarrow x = 0$ — уравнение координатной плоскости Oyz .

§ 41. Расстояние от точки до плоскости

Определение 5.5. Расстоянием от точки $M_0(x_0; y_0; z_0)$ до плоскости P называется длина перпендикуляра M_0H , опущенного из точки M_0 на плоскость P (рис. 5.6).

Задача нахождения расстояния

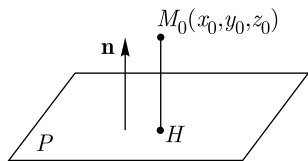


Рис. 5.6

$$\rho(M_0, P) = M_0H$$

аналогична соответствующей задаче для прямой (задача 4.5) и решается аналогично.

Пусть

$$P: Ax + By + Cz + D = 0$$

— общее уравнение плоскости P . Тогда расстояние от точки $M_0(x_0; y_0; z_0)$ до плоскости P может быть найдено по формуле

$$\rho(M_0, P) = \frac{|Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}. \quad (5.22)$$

Эта формула выводится аналогично формуле (4.2) для нахождения расстояния от точки $M_0(x_0; y_0)$ до прямой $L: Ax + By + C = 0$ на плоскости (§ 30).

Действительно, в данном случае

$$\rho(M_0, P) = |\text{пр}_{\mathbf{n}} \overline{M_0 M}| = \frac{|(\overline{M_0 M}, \mathbf{n})|}{|\mathbf{n}|},$$

где $\overline{M_0 M} = (x - x_0; y - y_0; z - z_0)$, $\mathbf{n} = (A; B; C)$.

Предлагаем читателю самостоятельно выполнить дальнейшие преобразования, приводящие к формуле (5.22).

Пример 5.4. Найти расстояние между параллельными плоскостями

$$P_1: 4x - 3y + z - 1 = 0,$$

$$P_2: -8x + 6y - 2z + 15 = 0.$$

Решение. Плоскости P_1 и P_2 параллельны, поскольку выполняется условие (5.18) параллельности двух плоскостей

$$\frac{4}{-8} = \frac{-3}{6} = \frac{1}{-2} \neq \frac{-1}{15}.$$

Расстояние между двумя параллельными плоскостями равно расстоянию от произвольной точки $M_0 \in P_2$ до плоскости P_1 . Положим в уравнении P_2 : $x = 0$, $y = 0$. Из уравнения $-2z + 15 = 0$ находим $z = \frac{15}{2}$. Таким образом, точка $M_0 \left(0; 0; \frac{15}{2}\right)$ принадлежит плоскости P_2 . По формуле (5.22) находим

$$\rho(P_1, P_2) = \rho(M_0, P_1) = \frac{\left|4 \cdot 0 - 3 \cdot 0 + \frac{15}{2} - 1\right|}{\sqrt{4^2 + (-3)^2 + 1^2}} = \frac{13}{2\sqrt{26}} = \frac{\sqrt{26}}{4}.$$

$$\text{Ответ: } \rho(P_1, P_2) = \frac{\sqrt{26}}{4}.$$

§ 42. Угол между двумя плоскостями

Определение 5.6. Углом между плоскостями P_1 и P_2 назовем острый или прямой угол φ (рис. 5.7).

Пусть в декартовой прямоугольной системе координат плоскости P_1 и P_2 заданы общими уравнениями

$$P_1: A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0,$$

$$P_2: A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0.$$

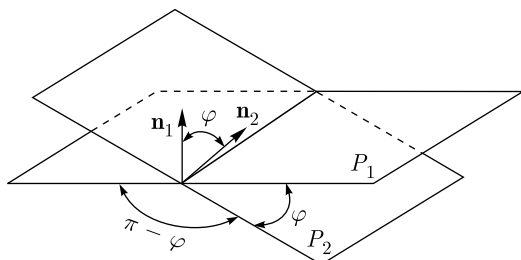


Рис. 5.7

Один из двух углов φ и $(\pi - \varphi)$ равен углу между векторами нормалей $\mathbf{n}_1 = (A_1; B_1; C_1)$ и $\mathbf{n}_2 = (A_2; B_2; C_2)$. Если из двух углов необходимо выбрать острый, то следует в формуле

$$\frac{(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2)}{|\mathbf{n}_1| \cdot |\mathbf{n}_2|}$$

скалярное произведение в числителе взять по модулю, т. е.

$$\cos \varphi = \frac{|(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2)|}{|\mathbf{n}_1| \cdot |\mathbf{n}_2|} = \frac{|A_1 A_2 + B_1 B_2 + C_1 C_2|}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2} \sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}}. \quad (5.23)$$

Пример 5.5. Найти угол между плоскостями

$$P_1: 4x - y + 8z - 13 = 0,$$

$$P_2: 3x - 4y - 12z + 5 = 0.$$

Решение. Имеем $\mathbf{n}_1 = (4; -1; 8)$, $\mathbf{n}_2 = (3; -4; -12)$. В соответствии с формулой (5.23) находим

$$\cos \varphi = \frac{|4 \cdot 3 + (-1)(-4) + 8(-12)|}{\sqrt{4^2 + (-1)^2 + 8^2} \sqrt{3^2 + (-4)^2 + (-12)^2}} = \frac{|-80|}{9 \cdot 13} = \frac{80}{117}.$$

$$\text{Ответ: } \varphi = \arccos \frac{80}{117}.$$

§ 43. Нормальное уравнение плоскости

Пусть

$$P: Ax + By + Cz + D = 0 \quad (5.24)$$

— общее уравнение плоскости. Умножим обе части этого уравнения на нормирующий множитель

$$\mu = \pm \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}.$$

Из двух значений μ , различающихся только знаком, выбирается то, у которого знак противоположен знаку коэффициента D .

Поскольку $(\mu A)^2 + (\mu B)^2 + (\mu C)^2 = 1$, то можем обозначить:

$$\mu A = \cos \alpha, \quad \mu B = \cos \beta, \quad \mu C = \cos \gamma, \quad \mu D = -p, \quad p \geq 0.$$

С учетом введенных обозначений уравнение

$$\mu Ax + \mu By + \mu Cz + \mu D = 0,$$

эквивалентное уравнению (5.24), примет вид

$$\boxed{P: x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma - p = 0}. \quad (5.25)$$

Определение 5.7. Уравнение (5.25) называется *нормальным уравнением* плоскости.

Свойства нормального уравнения плоскости аналогичны свойствам 1–4 нормального уравнения прямой (§ 32). По этой причине приведем их без доказательства.

Нормальное уравнение плоскости (5.25) примечательно тем, что:

1) его вектор нормали $\mathbf{n} = (\cos \alpha; \cos \beta; \cos \gamma)$ с началом в точке $O(0; 0; 0)$ направлен в сторону плоскости (при $p \neq 0$) и имеет единичную длину. При этом α, β, γ — углы, которые вектор нормали $\mathbf{n} = (A; B; C)$ образует с координатными осями;

2) расстояние $\rho(M_0, P)$ от точки $M_0(x_0; y_0; z_0)$ до плоскости P (5.25) находится по формуле

$$\rho(M_0; P) = |x_0 \cos \alpha + y_0 \cos \beta + z_0 \cos \gamma - p|;$$

3) произвольная точка $M_0(x_0; y_0; z_0)$ и начало координат лежат по разные стороны от плоскости P , если $\delta(M_0) > 0$, где $\delta(M_0) = x_0 \cos \alpha + y_0 \cos \beta + z_0 \cos \gamma - p$, и по одну сторону, если $\delta(M_0) < 0$; если $\delta(M_0) = 0$, то $M_0 \in P$.

§ 44. Прямая в пространстве

44.1. Уравнения прямой

44.1.1. Общее уравнение прямой. Как уже отмечалось в п. 24.2, один из основных способов задания линии Γ в пространстве — через пересечение двух поверхностей. Для задания прямой в пространстве в качестве таких поверхностей выступают плоскости.

Определение 5.8. Система уравнений

$$L: \begin{cases} A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0, \\ A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0 \end{cases} \quad (5.26)$$

называется *общим уравнением прямой в пространстве*.

Вектор $\mathbf{q} = [\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2]$ является направляющим вектором прямой L . Здесь $\mathbf{n}_1 = (A_1; B_1; C_1)$, $\mathbf{n}_2 = (A_2; B_2; C_2)$ — векторы нормалей плоскостей $P_1: A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0$ и $P_2: A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0$. Уравнения (5.26) задают прямую тогда и только тогда, когда $\mathbf{n}_1 \nparallel \mathbf{n}_2$, иными словами, если плоскости P_1 и P_2 не параллельны. В этом случае система уравнений (5.26) является совместной и, заметим, неопределенной, т. е. имеющей бесконечное множество решений.

Таким образом, *система уравнений (5.26) определяет некоторую прямую тогда и только тогда, когда коэффициенты A_1, B_1, C_1 и A_2, B_2, C_2 уравнений системы не пропорциональны, т. е. выполняется хотя бы одно из неравенств: $\frac{A_1}{A_2} \neq \frac{B_1}{B_2}, \frac{A_1}{A_2} \neq \frac{C_1}{C_2}, \frac{B_1}{B_2} \neq \frac{C_1}{C_2}$.*

44.1.2. Параметрические и канонические уравнения прямой. Пусть прямая L проходит через точку $M_0(x_0; y_0; z_0)$ параллельно вектору $\mathbf{q} = (\ell; m; n)$ (рис. 5.8), который так же, как и в случае прямой на плоскости, называется *направляющим вектором прямой*. Требуется написать уравнение прямой L .

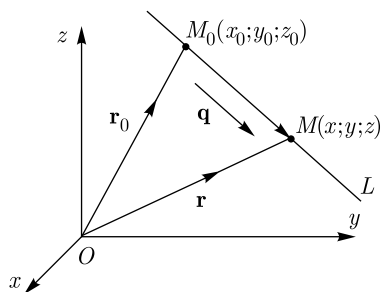


Рис. 5.8

Постановка задачи полностью совпадает с постановкой задачи 1 для прямой на плоскости (§ 25). Соответственно и решение этой задачи имеет такой же вид, что и для прямой на плоскости.

Учитывая, что вектор $\overline{M_0M}$, где M — некоторая точка пространства, коллинеарен вектору $\mathbf{q}$ тогда и только тогда, когда существует $t \in \mathbb{R}$: $\overline{M_0M} = t\mathbf{q}$, а также то, что $\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \overline{M_0M}$,

если $M \in L$ (рис. 5.8), получаем уравнение прямой L в векторной форме

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + t\mathbf{q}, \quad t \in \mathbb{R}. \quad (5.27)$$

Поскольку $\mathbf{r} - \mathbf{r}_0 = (x - x_0; y - y_0; z - z_0)$, то, переходя от (5.27) к скалярным аналогам, получаем:

- параметрические уравнения прямой L

$$\boxed{\begin{cases} x = x_0 + t\ell, \\ y = y_0 + tm, \\ z = z_0 + tn, \end{cases} \quad t \in \mathbb{R},} \quad (5.28)$$

а после исключения параметра t из (5.28)

- канонические уравнения

$$\boxed{\frac{x - x_0}{\ell} = \frac{y - y_0}{m} = \frac{z - z_0}{n}} \quad (5.29)$$

прямой в пространстве.

Отметим, что направляющий вектор $\mathbf{q}$ прямой может быть перпендикулярен одной из координатных осей, например Oy , и тогда $\mathbf{q} = (\ell; 0; n)$, а уравнение (5.29) будет иметь следующий вид:

$$\frac{x - x_0}{\ell} = \frac{y - y_0}{0} = \frac{z - z_0}{n} \quad (\ell, n \neq 0).$$

Это уравнение равносильно системе

$$\begin{cases} y - y_0 = 0, \\ \frac{x - x_0}{\ell} = \frac{z - z_0}{n}. \end{cases}$$

Если же вектор $\mathbf{q}$ коллинеарен одной из координатных осей, например Oz , и соответственно перпендикулярен плоскости Oxy , то $\mathbf{q} = (0; 0; n)$, $n \neq 0$, а уравнение (5.29) принимает следующий вид:

$$\frac{x - x_0}{0} = \frac{y - y_0}{0} = \frac{z - z_0}{n}.$$

Данное уравнение равносильно системе $\begin{cases} x - x_0 = 0, \\ y - y_0 = 0, \end{cases}$ т. е. прямая L в этом случае задается как пересечение двух плоскостей $P_1: x = x_0$ и $P_2: y = y_0$.

Частные случаи:

$$\frac{x}{1} = \frac{y}{0} = \frac{z}{0} \Leftrightarrow \begin{cases} y = 0, \\ z = 0 \end{cases} \quad \text{— уравнение оси } Ox;$$

$$\frac{x}{0} = \frac{y}{1} = \frac{z}{0} \Leftrightarrow \begin{cases} x = 0, \\ z = 0 \end{cases} \quad \text{— уравнение оси } Oy;$$

$$\frac{x}{0} = \frac{y}{0} = \frac{z}{1} \Leftrightarrow \begin{cases} x = 0, \\ y = 0 \end{cases} \quad - \text{уравнение оси } Oz.$$

В задачах на прямую в пространстве часто в качестве исходных условий выступают координаты двух точек $M_1(x_1; y_1; z_1)$, $M_2(x_2; y_2; z_2)$, через которые проходит прямая. В этом случае в качестве точки M_0 , через которую проходит прямая, можно взять любую из двух точек M_1 и M_2 , а в качестве направляющего вектора — вектор $\overline{M_1M_2} = (x_2 - x_1; y_2 - y_1; z_2 - z_1)$. В этих условиях каноническое уравнение прямой (5.29) будет иметь следующий вид:

$$\boxed{\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1}}. \quad (5.30)$$

Определение 5.9. Уравнение (5.30) называется *уравнением прямой, проходящей через две несовпадающие точки $M_1(x_1; y_1; z_1)$, $M_2(x_2; y_2; z_2)$* .

44.2. Взаимное расположение двух прямых в пространстве

Пусть

$$\begin{aligned} L_1: \frac{x - x_1}{\ell_1} &= \frac{y - y_1}{m_1} = \frac{z - z_1}{n_1}, \\ L_2: \frac{x - x_2}{\ell_2} &= \frac{y - y_2}{m_2} = \frac{z - z_2}{n_2} \end{aligned} \quad (5.31)$$

— уравнения двух прямых в заданной декартовой системе координат.

Очевидно, что взаимное расположение этих прямых зависит в первую очередь от того, лежат они в одной плоскости или нет.

Если прямые L_1 и L_2 не лежат в одной плоскости, то они являются *скрещивающимися*. Если же прямые лежат в одной плоскости, то, как и в случае с прямыми на плоскости, они могут *пересекаться*, быть *параллельными* или *совпадать*.

Вясним сначала условия, при которых две прямые в пространстве лежат в одной плоскости. Эти условия очевидным образом вытекают из анализа рис. 5.9. Прямые L_1 и L_2 лежат в одной плоскости тогда и только тогда, когда векторы $\mathbf{q}_1$, $\mathbf{q}_2$ и вектор $\overline{M_1M_2} = (x_2 - x_1; y_2 - y_1; z_2 - z_1)$ компланарны.

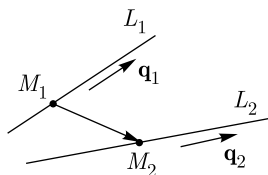


Рис. 5.9

Необходимое и достаточное условие компланарности векторов приводит к условию

$$\Delta = \overline{M_1 M_2} \mathbf{q}_1 \mathbf{q}_2 = 0,$$

или в координатной форме

$$\Delta = \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ \ell_1 & m_1 & n_1 \\ \ell_2 & m_2 & n_2 \end{vmatrix} = 0. \quad (5.32)$$

Таким образом:

- если определитель $\Delta = 0$, то прямые L_1 и L_2 лежат в одной плоскости;
- если $\Delta \neq 0$, то прямые не лежат в одной плоскости и являются скрещивающимися прямыми.

Если $\Delta = 0$, но при этом направляющие векторы $\mathbf{q}_1$ и $\mathbf{q}_2$ прямых L_1 и L_2 не коллинеарны, то прямые пересекаются. Если же $\Delta = 0$ и одновременно $\mathbf{q}_1 \parallel \mathbf{q}_2 \parallel \overline{M_1 M_2}$, то прямые L_1 и L_2 параллельны.

При условии коллинеарности трех векторов $\mathbf{q}_1 \parallel \mathbf{q}_2 \parallel \overline{M_1 M_2}$, определитель $\Delta = 0$, а прямые L_1 и L_2 совпадают.

Рассмотренные случаи взаимного расположения двух прямых в пространстве сведены в таблицу.

Значение Δ	Взаимное расположение прямых	Соотношение между векторами	Прямые L_1 и L_2
$\Delta = 0$	лежат в одной плоскости	$\mathbf{q}_1 \nparallel \mathbf{q}_2$	пересекаются
		$\mathbf{q}_1 \parallel \mathbf{q}_2 \nparallel \overline{M_1 M_2}$	параллельны
		$\mathbf{q}_1 \parallel \mathbf{q}_2 \parallel \overline{M_1 M_2}$	совпадают
$\Delta \neq 0$	не лежат в одной плоскости		скрещиваются

44.3. Угол между двумя прямыми в пространстве

Пусть прямые L_1 и L_2 заданы каноническими уравнениями (5.31). Требуется найти угол между ними. Искомый угол между прямыми либо совпадает с углом между их направляющими векторами, либо дополняет последний до π . Тогда по аналогии с прямыми на плоскости

$$\cos \varphi = \frac{|(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2)|}{|\mathbf{q}_1| \cdot |\mathbf{q}_2|},$$

или в координатной форме

$$\cos \varphi = \frac{|\ell_1 \ell_2 + m_1 m_2 + n_1 n_2|}{\sqrt{\ell_1^2 + m_1^2 + n_1^2} \sqrt{\ell_2^2 + m_2^2 + n_2^2}}. \quad (5.33)$$

Прямые L_1 и L_2 перпендикулярны тогда и только тогда, когда $\cos \varphi = 0$ ($\varphi = \frac{\pi}{2}$).

Таким образом,

$$L_1 \perp L_2 \Leftrightarrow \ell_1 \ell_2 + m_1 m_2 + n_1 n_2 = 0 \quad (5.34)$$

— критерий *перпендикулярности* прямых в пространстве.

44.4. Угол между прямой и плоскостью

Пусть

$$L: \frac{x - x_0}{\ell} = \frac{y - y_0}{m} = \frac{z - z_0}{n}$$

— уравнение прямой L , а

$$P: Ax + By + Cz + D = 0$$

— уравнение плоскости.

Взаимное расположение прямой L и плоскости P определяется углом между направляющими вектором $\mathbf{q} = (\ell; m; n)$ прямой L и вектором нормали $\mathbf{n} = (A; B; C)$ плоскости P .

$\mathbf{n} \perp \mathbf{q} \Leftrightarrow$ *прямая L лежит на плоскости P или параллельна ей.*

Но $\mathbf{n} \perp \mathbf{q} \Leftrightarrow (\mathbf{n}, \mathbf{q}) = 0$. В итоге получаем необходимое и достаточное условие параллельности прямой и плоскости

$$L \parallel P \Leftrightarrow A\ell + Bm + Cn = 0 \quad (5.35)$$

(если при этом координаты точки $M_0(x_0; y_0; z_0)$ прямой L удовлетворяют уравнению плоскости, т. е.

$$Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D = 0,$$

то *прямая L лежит в плоскости P*).

Определение 5.10. Углом φ между прямой L и плоскостью P называется угол между прямой L и ее ортогональной проекцией L' на плоскость P (рис. 5.10).

Здесь угол между прямыми L и L' понимается в смысле определения 4.11.

Угол $(\widehat{\mathbf{n}, \mathbf{q}}) = \frac{\pi}{2} - \varphi$ между направляющим вектором $\mathbf{q}$ прямой и вектором нормали $\mathbf{n}$ плоскости может быть найден по формуле

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = \frac{|(\mathbf{n}, \mathbf{q})|}{|\mathbf{n}| \cdot |\mathbf{q}|}.$$

Учитывая, что $\cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = \sin \varphi$, получаем формулу для нахождения синуса угла между прямой L и плоскостью P .

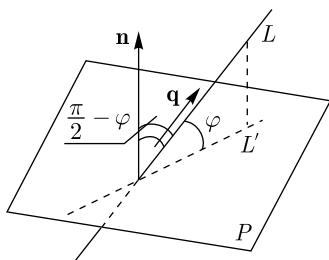


Рис. 5.10

$$\sin \varphi = \frac{|A\ell + Bm + Cn|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2} \sqrt{\ell^2 + m^2 + n^2}}. \quad (5.36)$$

Прямая L перпендикулярна плоскости $P \Leftrightarrow \mathbf{n} \parallel \mathbf{q}$, что равносильно пропорциональности координат векторов $\mathbf{n}$ и $\mathbf{q}$:

$$L \perp P \Leftrightarrow \frac{A}{\ell} = \frac{B}{m} = \frac{C}{n}. \quad (5.37)$$

§ 45. Типовые задачи

Пример 5.6. Перейти от общего уравнения прямой

$$L: \begin{cases} 2x - y - z - 1 = 0, \\ x + 2y + z = 0, \end{cases} \quad (5.38)$$

к каноническому.

Решение. Способ 1. Поскольку векторы нормалей $\mathbf{n}_1 = (2; -1; -1)$ и $\mathbf{n}_2 = (1; 2; 1)$ плоскостей не пропорциональны, то система уравнений (5.38) действительно задает прямую. Для решения задачи необходимо найти некоторую точку $M_0 \in L$, т. е. одно из бесконечного множества решений неопределенной системы уравнений (5.38), и направляющий вектор. Если прямая не параллельна координатным осям и координатным плоскостям (как в данном случае), то переменные x, y, z принимают все значения от $-\infty$ до $+\infty$. Поэтому можно назначить произвольно значение одной переменной, например x . Примем $x = 0$, тогда СЛАУ (5.38) будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} y + z = -1, \\ 2y + z = 0. \end{cases}$$

Решив эту СЛАУ, найдем $y = 1$, $z = -2$. Следовательно, $M_0(0; 1; -2)$.

В качестве направляющего вектора прямой можно взять вектор $[\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2]$. Действительно, векторы нормалей $\mathbf{n}_1$ и $\mathbf{n}_2$ перпендикулярны плоскостям P_1 и P_2 соответственно, а значит, и прямой L , по которой эти плоскости пересекаются. Но тогда в силу свойств векторного произведения вектор $[\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2]$ коллинеарен прямой L . Найдем вектор $\mathbf{q} = [\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2]$:

$$\mathbf{q} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 2 & -1 & -1 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix} = \mathbf{i} - 3\mathbf{j} + 5\mathbf{k}.$$

Прямая L проходит через точку $M_0(0; 1; -2)$ и параллельна вектору $\mathbf{q} = (1; -3; 5)$. Тогда можем записать ее каноническое уравнение L : $\frac{x}{1} = \frac{y-1}{-3} = \frac{z+2}{5}$.

Способ 2. Найдем еще одну, отличную от $M_0(0; 1; -2)$, точку, принадлежащую прямой L . Пусть, например, $z = 0$, тогда (5.38) принимает следующий вид:

$$\begin{cases} 2x - y = 1, \\ x + 2y = 0. \end{cases}$$

Ее решение: $x = \frac{2}{5}$, $y = -\frac{1}{5}$. Значит, точка $M_1\left(\frac{2}{5}; -\frac{1}{5}; 0\right)$ также принадлежит L , а вектор $\overline{M_0M_1} = \left(\frac{2}{5}; -\frac{6}{5}; 2\right)$ или вектор $\mathbf{q} = \frac{5}{2}\overline{M_0M_1} = (1; -3; 5)$ можно взять в качестве направляющего вектора прямой L . В итоге L : $\frac{x}{1} = \frac{y-1}{-3} = \frac{z+2}{5}$.

Ответ: L : $\frac{x}{1} = \frac{y-1}{-3} = \frac{z+2}{5}$.

Пример 5.7. Найти точку пересечения прямой L : $\frac{x}{1} = \frac{y-1}{-3} = \frac{z+2}{5}$ с плоскостью P : $3x - y + 2z - 3 = 0$ и угол между данными прямой и плоскостью.

Решение. Заданная прямая L и плоскость P пересекаются, поскольку $(\mathbf{n}, \mathbf{q}) \neq 0$ (см. (5.35)):

$$(\mathbf{n}, \mathbf{q}) = ((3; -1; 2), (1; -3; 5)) = 3 + 3 + 10 = 16 \neq 0.$$

Решим систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{x}{1} = \frac{y-1}{-3} = \frac{z+2}{5}, \\ 3x - y + 2z - 3 = 0. \end{cases}$$

Для этого перейдем к параметрическим уравнениям прямой L :

$$\begin{cases} x = t, \\ y = 1 - 3t, \\ z = -2 + 5t. \end{cases} \quad (5.39)$$

Подставим правые части этих уравнений во второе уравнение системы:

$$3t - (1 - 3t) + 2(-2 + 5t) - 3 = 0, \quad 16t = 8, \quad t = \frac{1}{2}.$$

Возвращаясь к (5.39), находим координаты точки M пересечения прямой L с плоскостью P : $x = \frac{1}{2}$, $y = -\frac{1}{2}$, $z = \frac{1}{2}$.

Найдем теперь угол φ между прямой и плоскостью. В соответствии с формулой (5.36) получаем

$$\sin \varphi = \frac{|1 \cdot 3 + (-3)(-1) + 2 \cdot 5|}{\sqrt{1 + (-3)^2 + 5^2} \sqrt{3^2 + (-1)^2 + 2^2}} = \frac{16}{7\sqrt{10}},$$

т. е. $\varphi = \arcsin \frac{16}{7\sqrt{10}}.$

Ответ: $M \left(\frac{1}{2}; -\frac{1}{2}; \frac{1}{2} \right)$, $\varphi = \arcsin \frac{16}{7\sqrt{10}}.$

Пример 5.8. Доказать, что прямая L : $\frac{x-2}{1} = \frac{y+1}{2} = \frac{z+3}{-4}$ и плоскость P : $2x - 3y - z - 4 = 0$ параллельны, и найти расстояние между ними.

Решение. Проверим выполнение условия (5.35) параллельности прямой и плоскости. Учитывая, что $\mathbf{q} = (1; 2; -4)$, $\mathbf{n} = (2; -3; -1)$, вычисляем скалярное произведение этих векторов $(\mathbf{q}, \mathbf{n}) = 1 \cdot 2 + 2(-3) + (-4)(-1) = 0$. Таким образом, $(\mathbf{q}, \mathbf{n}) = 0$ и потому $L \parallel P$.

Расстояние между прямой, параллельной плоскости P , и этой плоскостью равно расстоянию от произвольной точки $M \in L$ до

плоскости P . Найдем такую точку. Для этого в параметрических уравнениях прямой L

$$L: \begin{cases} x = 2 + t, \\ y = -1 + 2t, \\ z = -3 - 4t \end{cases}$$

примем, например, $t = 1$. Тогда $x = 3$, $y = 1$, $z = -7$ — координаты точки $M \in L$. Теперь в соответствии с формулой (5.22) находим

$$\rho(L, P) = \rho(M, P) = \frac{|2 \cdot 3 - 3 \cdot 1 - (-7) - 4|}{\sqrt{2^2 + (-3)^2 + (-1)^2}} = \frac{6}{\sqrt{14}} = \frac{3\sqrt{14}}{7}.$$

$$\text{Ответ: } \rho(L, P) = \frac{3\sqrt{14}}{7}.$$

Пример 5.9. Найти точку M' , симметричную точке $M(2; 4; -3)$ относительно прямой $L: \frac{x-3}{2} = \frac{y-1}{3} = \frac{z-2}{-2}$.

Решение. 1. Найдем уравнение плоскости, проходящей через точку M перпендикулярно прямой L . Направляющий вектор $\mathbf{q} = (2; 3; -2)$ прямой перпендикулярен этой плоскости, что позволяет записать ее уравнение как уравнение плоскости, проходящей через точку M с заданным вектором нормали $\mathbf{n} = \mathbf{q}$:

$$2(x - 2) + 3(y - 4) - 2(z + 3) = 0,$$

или $P: 2x + 3y - 2z - 22 = 0$.

2. Теперь найдем точку M_0 пересечения прямой L с плоскостью P , следуя типовому алгоритму (см. пример 5.7). Переходим от канонического уравнения прямой к параметрическим:

$$L: \begin{cases} x = 2t + 3, \\ y = 3t + 1, \\ z = 2 - 2t. \end{cases}$$

Решая совместно систему из этих уравнений и уравнения плоскости, находим соответствующие значения параметра t , а по нему координаты точки M_0 :

$$2(2t + 3) + 3(3t + 1) - 2(2 - 2t) - 22 = 0 \Rightarrow t = 1;$$

$$x = 2 \cdot 1 + 3 = 5, \quad y = 3 \cdot 1 + 1 = 4, \quad z = 2 - 2 \cdot 1 = 0.$$

Таким образом, точка $M_0(5; 4; 0)$ найдена.

3. Точку M' , симметричную точке M относительно прямой L , найдем из условия $MM_0 = M'M_0$. Точка M_0 является средней

точкой отрезка MM' (рис. 5.11).

Но тогда $x_{M'} = 2x_{M_0} - x_M$, $y_{M'} = 2y_{M_0} - y_M$, $z_{M'} = 2z_{M_0} - z_M$, т. е.

$$x_{M'} = 2 \cdot 5 - 2 = 8, \quad y_{M'} = 2 \cdot 4 - 4 = 4,$$

$$z_{M'} = 2 \cdot 0 + 3 = 3.$$

Ответ: $M'(8; 4; 3)$.

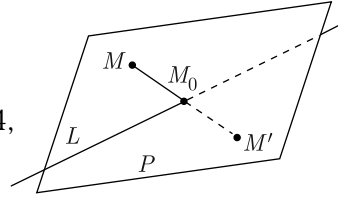


Рис. 5.11

Пример 5.10. Определить взаимное расположение прямых L_1 и L_2 в пространстве:

$$\text{а) } L_1: \frac{x-1}{2} = \frac{y+3}{-1} = \frac{z+1}{3}, \quad L_2: \frac{x+2}{4} = \frac{y-1}{2} = \frac{z+2}{-1};$$

$$\text{б) } L_1: \begin{cases} x = -t, \\ y = 2 + 2t, \\ z = 2 - 2t, \end{cases} \quad L_2: \frac{x+3}{1} = \frac{y}{-2} = \frac{z+4}{2}.$$

Решение. а) Прямая L_1 проходит через точку $M_1(1; -3; -1)$ и имеет направляющий вектор $\mathbf{q}_1 = (2; -1; 3)$; прямая L_2 проходит через точку $M_2(-2; 1; -2)$, ее направляющий вектор $\mathbf{q}_2 = (4; 2; -1)$. Руководствуясь таблицей в п. 44.2 по определению взаимного расположения прямых, вычислим определитель $\Delta = \overline{M_1 M_2} \mathbf{q}_1 \mathbf{q}_2$:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 2 & -1 & 3 \\ 4 & 2 & -1 \\ -3 & 4 & -1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -7 & 11 & 0 \\ 7 & -2 & 0 \\ -3 & 4 & -1 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} -7 & -11 \\ 7 & -2 \end{vmatrix} \neq 0.$$

Поскольку $\Delta \neq 0$, то прямые L_1 и L_2 являются скрещивающимися.

б) В данном случае $\mathbf{q}_1 = (-1; 2; -2)$, $\mathbf{q}_2 = (1; -2; 2)$. Поскольку $\mathbf{q}_1 \parallel \mathbf{q}_2$, то определитель $\Delta = 0$, а прямые L_1 и L_2 лежат в одной плоскости и параллельны. Они не совпадают, так как вектор $\overline{M_1 M_2} = (-3; -2; -6)$ не коллинеарен $\mathbf{q}_1$ и $\mathbf{q}_2$.

Ответ: а) L_1 и L_2 — скрещивающиеся прямые; б) $L_1 \parallel L_2$.

Пример 5.11. Найти расстояние между скрещивающимися прямыми в примере 5.10, а).

Решение. Расстояние между скрещивающимися прямыми равно длине отрезка, перпендикулярного обеим прямым, с концами на этих прямых. Для нахождения искомого расстояния достаточно найти:

а) уравнение плоскости P , проходящей через одну из этих прямых, например L_2 , параллельно другой прямой, например L_1 ;

б) расстояние от плоскости P до точки $M_1(1; -3; -1)$, через которую проходит прямая L_1 .

Для того чтобы составить уравнение плоскости P , имеем точку $M_2(-2; 1; -2) \in P$ и два вектора $\mathbf{q}_1 = (2; -1; 3)$ и $\mathbf{q}_2 = (4; 2; -1)$, параллельных P :

$$\begin{vmatrix} x+2 & y-1 & z+2 \\ 2 & -1 & 3 \\ 4 & 2 & -1 \end{vmatrix} = 0 \Leftrightarrow -5x + 14y + 8z - 8 = 0.$$

Теперь находим искомое расстояние $\rho(L_1, L_2) = \rho(M_1, P)$:

$$\rho(L_1, L_2) = \frac{|-5 \cdot 1 + 14 \cdot (-3) + 8 \cdot (-1) - 8|}{\sqrt{(-5)^2 + 14^2 + 8^2}} = \frac{21\sqrt{285}}{95}.$$

Ответ: $\frac{21\sqrt{285}}{95}$.

Вопросы для самоконтроля к гл. 5

1. Напишите (выведите) уравнение плоскости, проходящей через заданную точку $M_0(x_0; y_0; z_0)$ перпендикулярно заданному вектору $\mathbf{n} = (A; B; C)$.

2. Напишите (выведите) уравнение плоскости, проходящей через заданную точку $M_0(x_0; y_0; z_0)$ и параллельной двум неколлинеарным векторам $\mathbf{a}_1 = (\ell_1; m_1; n_1)$ и $\mathbf{a}_2 = (\ell_2; m_2; n_2)$.

3. Запишите условия: а) параллельности, б) перпендикулярности двух плоскостей P_1 и P_2 , заданных общими уравнениями:

$$P_1: A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0;$$

$$P_2: A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0.$$

4. Напишите (выведите) уравнение плоскости, проходящей через три точки $M_1(x_1; y_1; z_1)$, $M_2(x_2; y_2; z_2)$, $M_3(x_3; y_3; z_3)$, не лежащие на одной прямой.

5. Запишите условия, при которых плоскость $P: Ax + By + Cz + D = 0$:

а) проходит через начало координат;

б) параллельна одной из трех координатных осей;

в) параллельна одной из трех координатных плоскостей.

6. Каким условиям должны удовлетворять коэффициенты общих уравнений $A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0$ и $A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0$ плоскостей P_1 и P_2 , чтобы эти плоскости: а) пересекались, б) были параллельны, в) совпадали?

7. Напишите формулу для нахождения расстояния от точки $M_0(x_0; y_0; z_0)$ до плоскости $P: Ax + By + Cz + D = 0$.

8. Напишите формулу для нахождения угла между двумя плоскостями, заданными уравнениями $A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0$ и $A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0$.

9. Напишите общее уравнение прямой в пространстве и алгоритм перехода от общего уравнения прямой к ее каноническим уравнениям.

10. Составьте и запишите по шагам алгоритм нахождения точки пересечения прямой, заданной каноническими уравнениями, с плоскостью.

11. Напишите (выведите) условия, при которых две прямые, заданные своими каноническими уравнениями

$$L_1: \frac{x - x_1}{\ell_1} = \frac{y - y_1}{m_1} = \frac{z - z_1}{n_1},$$

$$L_2: \frac{x - x_2}{\ell_2} = \frac{y - y_2}{m_2} = \frac{z - z_2}{n_2} :$$

— лежат в одной плоскости и при этом:

а) пересекаются, б) параллельны, в) совпадают;

— не лежат в одной плоскости (являются скрещивающимися).

12. Составьте и запишите по шагам алгоритм нахождения расстояния между скрещивающимися прямыми.

13. Запишите формулы для нахождения угла между двумя прямыми, заданными каноническими уравнениями (см. вопрос 11).

14. Составьте и запишите по шагам алгоритм нахождения расстояния между двумя параллельными прямыми

$$L_1: \frac{x - x_1}{\ell_1} = \frac{y - y_1}{m_1} = \frac{z - z_1}{n_1},$$

$$L_2: \frac{x - x_2}{\ell_2} = \frac{y - y_2}{m_2} = \frac{z - z_2}{n_2} :$$

а) посредством построения плоскости, перпендикулярной этим прямым, и нахождения точек пересечения прямых с плоскостью;

б) как высоту параллелограмма, построенного на векторах $\mathbf{q}_1 = (\ell_1; m_1; n_1)$ и $\overline{M_0^{(1)}M_0^{(2)}} = (x_2 - x_1; y_2 - y_1; z_2 - z_1)$:

$$\rho(L_1, L_2) = \frac{|[\overline{M_0^{(1)}M_0^{(2)}}, \mathbf{q}_1]|}{|\mathbf{q}_1|}.$$

Ответ к примеру 14, б):

$$\begin{aligned} \rho(L_1; L_2) &= \\ &= \frac{\left(\left| \begin{array}{cc} y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ m_1 & n_1 \end{array} \right|^2 + \left| \begin{array}{cc} x_2 - x_1 & z_2 - z_1 \\ \ell_1 & n_1 \end{array} \right|^2 + \left| \begin{array}{cc} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ \ell_1 & m_1 \end{array} \right|^2 \right)^{1/2}}{\sqrt{\ell_1^2 + m_1^2 + n_1^2}}. \end{aligned}$$

Упражнения

1. Напишите уравнение плоскости, проходящей через точку $M_0(0; 3; -2)$ и

а) параллельной плоскости $P: 2x - 3y + 5z - 7 = 0$;

б) перпендикулярной к прямой $L: \frac{x-1}{2} = \frac{y}{-3} = \frac{z+4}{1}$.

2. Напишите уравнение плоскости, проходящей через три точки $M_1(-2; 1; 3)$, $M_2(1; 0; 7)$, $M_3(0; 4; -1)$.

3. Напишите уравнение плоскости, отсекающей на координатных осях Ox и Oz отрезки длины 3 и 5 соответственно и проходящей через точку $M_0(6; 4; 5)$.

4. Напишите уравнение плоскости, параллельной оси Oz и проходящей через точки $M_1(-2; 1; 0)$ и $M_2(0; 2; 0)$.

5. Установите взаимное расположение плоскостей:

а) $P_1: x - 2y + 2z - 8 = 0$, $P_2: x + z - 6 = 0$;

б) $P_1: -2x + y - 3z - 1 = 0$, $P_2: 4x - 2y + 6z + 9 = 0$;

в) $P_1: 3x - 2y + z - 6 = 0$, $P_2: x - \frac{2}{3}y + \frac{1}{3}z - 2 = 0$;

и в случае их пересечения найдите угол между ними, а для параллельных плоскостей — расстояние между ними.

6. Найдите точку пересечения плоскостей:

$$2x - y + 3z - 9 = 0; \quad x + 2y + 2z - 3 = 0; \quad 3x + y - 4z + 6 = 0.$$

7. Найдите значения параметров α и β , при которых плоскость $P: \alpha x + \beta y - 6z + 8 = 0$:

а) параллельна оси Ox и проходит через точку $M(3; -2; 4)$;

б) перпендикулярна оси Oz ;

в) параллельна оси Oy и отсекает на осях Ox и Oz равные отрезки.

8. Напишите уравнение прямой, проходящей через точку $M(3; -2; 5)$ и перпендикулярной плоскости $P: 4x - y - 2z + 6 = 0$.

9. Найдите каноническое уравнение прямой, проходящей через точку $M(0; -3; 2)$ параллельно прямой

$$L: \begin{cases} 3x - y + 2z - 6 = 0, \\ x + 2y - z + 1 = 0. \end{cases}$$

10. Напишите каноническое уравнение прямой

$$L: \begin{cases} x + 2y - z - 1 = 0, \\ 2x - y + 3z - 2 = 0. \end{cases}$$

11. Найдите точку пересечения прямой $L: \frac{x}{1} = \frac{y-1}{-1} = \frac{z-1}{-1}$ с плоскостью $P: 3x - y + 2z - 5 = 0$ и угол между прямой и плоскостью.

12. Найдите точку M' , симметричную точке $M(1; 0; -2)$ относительно прямой $L: \frac{x+2}{2} = \frac{y+2}{3} = \frac{z}{-1}$.

13. Найдите ортогональную проекцию точки $M(3; -2; 1)$ на плоскость $P: 2x - y - 2z + 3 = 0$.

14. Найдите уравнение множества точек, равноудаленных от двух данных точек $M_1(2; -1; 1)$ и $M_2(-2; 3; -1)$.

15. Установите взаимное расположение прямых:

а) $L_1: \frac{x-1}{2} = \frac{y}{1} = \frac{z-4}{-1}$, $L_2: \frac{x+2}{-2} = \frac{y+2}{1} = \frac{z-4}{7}$;

б) $L_1: \frac{x-1}{2} = \frac{y+2}{-1} = \frac{z}{3}$, $L_2: \frac{x}{-2} = \frac{y+2}{1} = \frac{z+4}{-3}$;

в) $L_1: \begin{cases} x - y + 2z - 2 = 0, \\ 2x + y - z + 1 = 0, \end{cases}$ $L_2: \begin{cases} x = 2t - 1, \\ y = -t + 2, \\ z = 2t - 3 \end{cases}$

и если они параллельны, то найдите расстояние между ними, в ином случае — угол между прямыми.

16. Найдите расстояние между скрещивающимися прямыми в примере 15, в).

Ответы

1. а) $2x - 3y + 5z + 19 = 0$; б) $2x - 3y + z + 11 = 0$.

2. $8x - 20y - 11z + 69 = 0$. **3.** $\frac{x}{3} - \frac{y}{2} + \frac{z}{5} = 1$.

4. $2x - 3y + 5z + 19 = 0$. **5.** а) пересекаются, $\alpha = 45^\circ$; б) параллельны, $\rho(P_1, P_2) = \frac{1}{4}\sqrt{14}$; в) совпадают, $\rho(P_1, P_2) = 0$.

6. $(1; -1; 2)$. **7.** а) $\alpha = 0$; $\beta = -8$ ($P: 4y + 3z - 4 = 0$);

б) $\alpha = 0$; $\beta = 0$ ($P: 3z - 4 = 0$);

в) $\alpha = -6$, $\beta = 0$ ($P: x + z - \frac{4}{3} = 0$).

8. $\frac{x-3}{4} = \frac{y+2}{-1} = \frac{z-5}{-2}.$

9. $\frac{x}{3} = \frac{y+3}{-5} = \frac{z-2}{-7}.$ **10.** $\frac{x}{1} = \frac{y-1}{-1} = \frac{z-1}{-1}.$

11. $M(2; -1; -1), \varphi = \arcsin \frac{\sqrt{42}}{21}.$ **12.** $M'(-1; 2; 0).$

13. $M_0(1; -1; 3).$ **14.** $P: 2x - 2y + z + 2 = 0.$

15. а) пересекаются, $\varphi = \arccos \frac{5}{9};$ б) параллельны, $\rho(L_1, L_2) =$

$= \sqrt{3};$ в) скрещиваются, $\varphi = \arccos \frac{\sqrt{35}}{105}.$ **16.** $\frac{39}{\sqrt{314}}.$

Глава 6

АЛГЕБРАИЧЕСКИЕ КРИВЫЕ ВТОРОГО ПОРЯДКА

§ 46. Общие понятия

В настоящей главе изучаются алгебраические кривые, задаваемые уравнением (4.4). Для целей анализа уравнения и определяемых им кривых целесообразно переписать его в видоизменной форме

$$a_{11}x^2 + 2a_{12}xy + a_{22}y^2 + 2a_{13}x + 2a_{23}y + a_{33} = 0. \quad (6.1)$$

Левая часть уравнения (6.1) является квадратичной функцией двух переменных x и y . Свойства кривых, задаваемых уравнением (6.1), определяются, в первую очередь, квадратичной функцией

$$h(x, y) = a_{11}x^2 + 2a_{12}xy + a_{22}y^2, \quad (6.2)$$

являющейся составной частью этого уравнения. Функция $h(x, y)$ называется еще *квадратичной формой*; ее свойства и применения изучаются в курсе линейной алгебры.

Легко проверить, что уравнение (6.1) и квадратичную функцию $h(x, y)$ можно записать в матричной форме

$$X_1^\top A X_1 = 0,$$

где $X_1^\top = (x \ y \ 1)$, $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix}$, и соответственно

$$h(x, y) = X^\top A_0 X,$$

где $X^\top = (x \ y)$, $A_0 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{pmatrix}$.

В гл. 7 будет показано, что в зависимости от значений коэффициентов a_{ij} , $i, j = 1, 2, 3$, уравнение (6.1) определяет либо *эллипс*, либо *гиперболу*, либо *параболу*, либо *пару прямых* (пересекающихся, параллельных или совпадающих), либо *точку*, либо *пустое множество*.

Уравнения перечисленных линий в некоторой декартовой прямоугольной системе координат, подобранной должным образом, записываются в компактной форме с минимальным числом слагаемых. Так, в § 54 доказывается, что с помощью пары преобразований исходной системы координат Oxy — поворота на некоторый угол α (переход от системы координат Oxy к $Ox'y'$) и параллельного переноса новой системы координат $Ox'y'$ в точку O' (переход от системы координат $Ox'y'$ к $O'\tilde{x}\tilde{y}$), — уравнение (6.1) приводится к одному из следующих видов:

$$\lambda_1 \tilde{x}^2 + \lambda_2 \tilde{y}^2 + \lambda_3 = 0, \quad \lambda_1 \neq 0, \quad \lambda_3 \neq 0;$$

$$\lambda_1 \tilde{x}^2 + \lambda_4 \tilde{y} = 0, \quad \lambda_1 \neq 0, \quad \lambda_4 \neq 0;$$

$$\lambda_1 \tilde{x}^2 + \lambda_3 = 0, \quad \lambda_1 \neq 0.$$

Подробное изучение кривых второго порядка выполним в следующей последовательности:

- 1) канонические уравнения кривых;
- 2) преобразования систем координат на плоскости и в пространстве;
- 3) приведение общего уравнения кривой к каноническому виду.

§ 47. Эллипс

47.1. Вывод и исследование канонического уравнения

Определение 6.1. *Эллипсом* называется множество точек плоскости (множество точек $\{M(x; y)\}$), для каждой из которых сумма расстояний до двух фиксированных точек F_1 , F_2 плоскости, называемых *фокусами эллипса*, есть величина постоянная, равная $2a$, $a = \text{const} > 0$, причем $2a > 2c$, где $2c$ — расстояние между фокусами эллипса (*фокусное расстояние*).

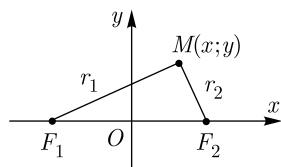


Рис. 6.1

Пусть на плоскости зафиксированы две точки F_1 , F_2 — фокусы эллипса, а M — произвольная точка эллипса такая, что $|MF_1| + |MF_2| > |F_1F_2|$, т. е. $2a > 2c$. Построим на плоскости декартову прямоугольную систему координат Oxy следующим образом. Ось Ox проведем через фокусы F_1 и F_2 эллипса (*фокальная ось*), начало координат (точку O) расположим в середине отрезка F_1F_2 , ось Oy проведем перпендикулярно фокальной оси Ox . Положительное направление оси Ox выберем по направлению вектора $\overrightarrow{F_1F_2}$. Назовем построенную систему

координат Oxy канонической системой координат для рассматриваемого эллипса (рис. 6.1).

Введем обозначения:

$$r_1 = \rho(M, F_1) = |\overline{MF_1}|, \quad r_2 = \rho(M, F_2) = |\overline{MF_2}|.$$

Определение 6.2. Числа r_1 и r_2 — расстояния от точки M до фокусов F_1 и F_2 соответственно — называются *фокальными радиусами* точки M .

Из определения 6.1 с учетом введенных обозначений получаем уравнение эллипса

$$r_1 + r_2 = 2a. \quad (6.3)$$

Поскольку $r_1 = \sqrt{(x+c)^2 + y^2}$, $r_2 = \sqrt{(x-c)^2 + y^2}$, то уравнение (6.3) можно записать также в следующем виде:

$$\sqrt{(x+c)^2 + y^2} + \sqrt{(x-c)^2 + y^2} = 2a. \quad (6.4)$$

Упростим уравнение (6.4). Для этого перенесем второе слагаемое из левой части уравнения в правую (уединим радикал) и возведем обе части получившегося равенства в квадрат:

$$(x+c)^2 + y^2 = 4a^2 - 4a\sqrt{(x-c)^2 + y^2} + (x-c)^2 + y^2,$$

или после очевидных упрощений

$$a\sqrt{(x-c)^2 + y^2} = a^2 - cx. \quad (6.5)$$

Вновь возведем в квадрат обе части (6.5) при дополнительном ограничении $a^2 - cx \geq 0$:

$$a^2x^2 - 2a^2cx + a^2c^2 + a^2y^2 = a^4 - 2a^2cx + c^2x^2,$$

откуда после преобразований получим

$$(a^2 - c^2)x^2 + a^2y^2 = a^2(a^2 - c^2). \quad (6.6)$$

Введем в рассмотрение еще один параметр:

$$b \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{a^2 - c^2}.$$

Число b является действительным, так как $a > c$. Заменяя в (6.6) разность $(a^2 - c^2)$ на b^2 , получим $b^2x^2 + a^2y^2 = a^2b^2$, или после деления обеих частей этого равенства на a^2b^2 :

$$\boxed{\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1}. \quad (6.7)$$

Утверждение. Уравнение (6.7) является уравнением эллипса.

Доказательство. Уравнение (6.7) получено из (6.4) в результате возведения в квадрат выражений, содержащих радикалы, и потому является следствием уравнения (6.4). Покажем, что эти уравнения равносильны.

Пусть $(x; y)$ — некоторое решение уравнения (6.7). Покажем, что эта пара удовлетворяет и уравнению (6.4), или — в другой форме записи — уравнению (6.3). Сначала докажем равносильность (6.5) и (6.7). Для этого достаточно доказать, что из уравнения (6.7) и ограничения на параметры a и c ($a > c$) следует неравенство $a^2 - cx \geq 0$, или $cx \leq a^2$.

Непосредственно из уравнения (6.7) имеем оценку $\frac{x^2}{a^2} \leq 1$, откуда $|x| \leq a$. С учетом неравенства $c < a$ окончательно получаем, что $cx \leq a^2$.

Из уравнения (6.5) с учетом (6.4) получаем

$$ar_2 = a^2 - cx \Leftrightarrow r_2 = a - \frac{c}{a}x,$$

или $r_2 = a - ex$, где

$$e \stackrel{\text{def}}{=} \frac{c}{a}. \quad (6.8)$$

Выразим y из уравнения (6.7): $y^2 = b^2 \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right)$, и подставим в правую часть выражения для r_1 :

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{(x+c)^2 + y^2} = \sqrt{x^2 + 2cx + c^2 + b^2 \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right)} = \\ &= \sqrt{x^2 + 2a\frac{c}{a}x + c^2 + b^2 - b^2\frac{x^2}{a^2}} = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}x^2 + 2a\frac{c}{a}x + c^2 + b^2}. \end{aligned}$$

Учтем, что $a^2 - b^2 = c^2$, $c^2 + b^2 = a^2$ и $\frac{c}{a} = e$; тогда

$$r_1 = \sqrt{a^2 + 2aex + e^2x^2} = \sqrt{(a + ex)^2} = |a + ex|.$$

Легко видеть, что для эллипса $|a + ex| = a + ex$. Действительно, $0 \leq e < 1$, $-a \leq x \leq a$, поэтому $a + ex > 0$. Таким образом,

$$\boxed{r_1 = a + ex}, \quad \boxed{r_2 = a - ex}. \quad (6.9)$$

Значит, если $(x; y)$ — решение уравнения (6.7), то имеют место равенства (6.9), а, значит, и искомое равенство $r_1 + r_2 = 2a$.

Таким образом, уравнение (6.7) является уравнением геометрического места точек, задаваемых определением 1, т. е. уравнением эллипса. ■

Определение 6.3. Уравнение (6.7) называется *каноническим уравнением эллипса*.

Исследуем это уравнение.

1. Уравнение (6.7) определяет кривую, расположенную в прямоугольнике $EFGH$ со сторонами $2a$ и $2b$, симметричными относительно координатных осей (рис. 6.2).

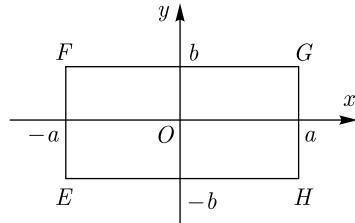


Рис. 6.2

Действительно, непосредственно из уравнения следует, что $|x| \leq a$ и $|y| \leq b$ для всех пар чисел $(x; y)$, удовлетворяющих уравнению (6.7).

2. Точки $A_1(-a; 0)$, $A_2(a; 0)$, $B_1(0; -b)$, $B_2(0; b)$, лежащие на сторонах прямоугольника, принадлежат эллипсу (они называются вершинами эллипса).

3. Кривая, определяемая уравнением (6.7), симметрична относительно обеих координатных осей и является центрально-симметричной кривой (рис. 6.3).

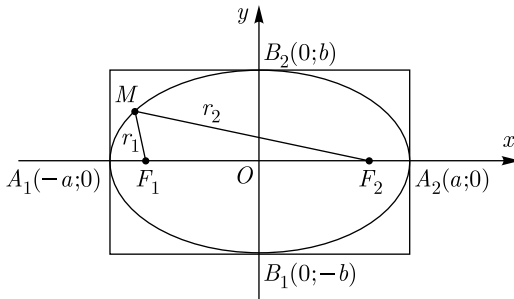


Рис. 6.3

Это следует из того, что переменные x и y входят в уравнение (6.7) в четных степенях. Если координаты точки $M_1(x; y)$ удовлетворяют уравнению (6.7), то и координаты симметричных точек $M_2(-x; y)$, $M_3(x; -y)$, $M_4(-x; -y)$ также удовлетворяют этому уравнению. Следовательно, эллипс — центрально-симметричная фигура, а точка O — центр эллипса.

Симметричность множества точек, задаваемых уравнением (6.7), относительно координатных осей позволяет упростить исследование и построение искомой кривой. Достаточно исследовать и построить часть этой кривой, расположенную, например, в первой четверти. Затем построенную линию следует отобра-

зять симметрично (зеркально) относительно одной из двух осей, например Ox , а после этого полученную с учетом данного отображения кривую отобразить симметрично относительно другой оси (оси Oy).

Разрешим уравнение (6.7) относительно переменной y при условии $x \geq 0$, $y \geq 0$:

$$\begin{cases} y = b\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}, \\ x \geq 0, \quad y \geq 0. \end{cases}$$

Функция $y(x)$ определена на отрезке $[0; a]$ (при $x \geq 0$). На концах отрезка она принимает значения $y(0) = b$, $y(a) = 0$ и является монотонно убывающей в интервале $(0; a)$ (рис. 6.2). График функции $y(x)$ обращен выпуклостью вверх. Наиболее просто это свойство эллипса доказывается с помощью производной второго порядка функции $y(x)$. Поскольку

$$y'' = -\frac{b}{a^2} \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right)^{-3/2} < 0 \quad \forall x \in (0; a),$$

то график функции $y(x)$ в этом промежутке обращен выпуклостью вверх. Соответствующее доказательство будет проведено в курсе математического анализа. Выпуклость графика функции $y(x)$ можно доказать и элементарными средствами, не прибегая к понятию производной. Рекомендуем читателю выполнить соответствующее исследование самостоятельно.

Выполнив отображение полученной части кривой симметрично относительно координатных осей, получим замкнутую кривую (рис. 6.3).

Подводя итог проведенному исследованию, отмечаем, что эллипс:

- является замкнутой кривой, симметричной относительно обеих координатных осей и центрально-симметричной относительно точки O — центра эллипса;

- имеет 4 вершины A_1, A_2, B_1, B_2 (рис. 6.3);

Длина $|\overline{OA_1}| = |\overline{OA_2}| = a$ отрезков OA_1 и OA_2 называется *большой полуосью* (при $a > b$), а длина $|\overline{OB_1}| = |\overline{OB_2}| = b$ отрезков OB_1, OB_2 — *меньшей полуосью эллипса*; отрезки A_1A_2 и B_1B_2 называются соответственно *большой и меньшей осями эллипса*.

Степень «сплюснутости» эллипса вдоль большей оси зависит от соотношения между параметрами a и b : чем больше разность $a - b$, тем больше вытянут («сплюснут») эллипс; чем

меньше эта разность, тем ближе эллипс по форме к окружности. Наконец, при $a = b$ эллипс превращается в окружность.

Числовой характеристикой степени вытянутости эллипса служит параметр e , который называется *эксцентриситетом эллипса*. Эксцентриситет эллипса принимает значения из полуинтервала $[0; 1)$.

При $e = 0$ ($a = b$) эллипс является окружностью ($x^2 + y^2 = a^2$). Если же $b \ll a$, то значение эксцентриситета e близко к единице. В этом случае эллипс сильно вытянут вдоль большей оси («сплюснут» вдоль малой оси).

Замечание. Если в системе координат Oxy уравнение кривой второго порядка имеет вид (6.7), но при этом $b > a$, то эта кривая является эллипсом, фокусы которого расположены на оси Oy . Канонической для такого эллипса является система координат $Ox'y'$. Она получается в результате поворота исходной системы координат Oxy на угол 90° . Это соответствует преобразованию $x' = y$, $y' = -x$ (см. § 52, 53).

47.2. Директрисы эллипса

Построим на плоскости эллипс с некоторыми заданными значениями параметров a и b , $a > b > 0$. Введем каноническую систему координат Oxy , в которой уравнение эллипса будет иметь вид (6.7).

Определение 6.4. *Директрисами эллипса* называются две прямые, перпендикулярные его фокальной оси и расположенные симметрично относительно центра O эллипса на расстоянии $\frac{a}{e}$ от O .

Для окружности директрисы не существуют. В этом случае эксцентриситет $e = 0$ и число $\frac{a}{e}$ не определено. В остальных случаях $0 < e < 1$ и потому $\frac{a}{e} > a$, т. е. директрисы расположены вне прямоугольника, содержащего эллипс. Левая директриса D_1 : $x = -\frac{a}{e}$ находится левее вершины $A_1(-a; 0)$, правая D_2 : $x = \frac{a}{e}$ — правее вершины $A_2(a; 0)$ эллипса (рис. 6.4). Если $e \rightarrow 0$, то левая и правая директрисы смещаются от центра эллипса соответственно влево и вправо.

Директриса D_1 называется *соответствующей* фокусу F_1 , а директриса D_2 — фокусу F_2 . На рис. 6.4 обозначены: r_1, r_2 — фокальные радиусы точки M эллипса; $d_1 = |MK|$, $d_2 = |MN|$ — расстояния от точки M до директрис D_1 и D_2 соответственно.

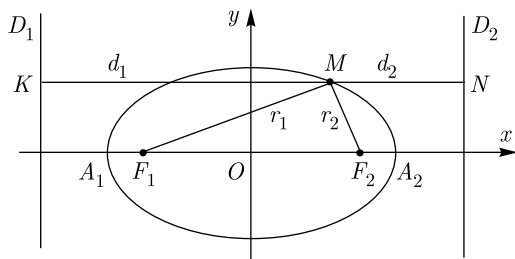


Рис. 6.4

Установим связь параметров r_i , d_i , $i = 1, 2$, с координатами $(x; y)$ точки $M(x; y)$ эллипса. Пусть координаты точки M удовлетворяют уравнению (6.7) эллипса. Тогда согласно (6.8)

$$r_1 = a + ex, \quad r_2 = a - ex.$$

Из определения директрис и величин d_1 , d_2 следует, что

$$d_1 = x + \frac{a}{e}, \quad d_2 = -x + \frac{a}{e}. \quad (6.10)$$

Найдем условия, при которых точка $M(x; y)$ плоскости принадлежит эллипсу. Справедлива следующая теорема.

Теорема 6.1. *Для того чтобы точка $M(x; y)$ была точкой эллипса (6.7), необходимо и достаточно, чтобы выполнялись равенства*

$$\boxed{\frac{r_1}{d_1} = \frac{r_2}{d_2} = e}. \quad (6.11)$$

Доказательство. *Необходимость.* Дано: точка $M(x; y)$ принадлежит эллипсу, т. е. ее координаты удовлетворяют уравнению (6.7) и, как следствие, выполняются равенства (6.9) и (6.10). Требуется доказать, что в этих условиях имеют место равенства (6.11). Действительно,

$$\frac{r_1}{d_1} = \frac{a + ex}{x + \frac{a}{e}} = e, \quad \frac{r_2}{d_2} = \frac{a - ex}{-x + \frac{a}{e}} = e.$$

Достаточность. Даны две точки F_1 и F_2 на оси Ox и две прямые D_1 и D_2 , перпендикулярные оси Ox и проходящие соответственно слева и справа от точек F_1 и F_2 на расстоянии $\left(\frac{a}{e} - c\right)$ от них (рис. 6.4); при этом $\rho(F_1, F_2) = 2c$, выполняются равенства (6.11) и справедливы формулы (6.10) для расстояний d_1 , d_2 от произвольной точки M до прямых D_1 и D_2 соответственно.

Требуется доказать, что точка M принадлежит эллипсу, т. е. сумма $r_1 + r_2$ расстояний от этой точки до фокусов эллипса равна $2a$ (формула (6.3)). Имеем из (6.11): $r_1 = d_1e$, $r_2 = d_2e$. Тогда $r_1 + r_2 = d_1e + d_2e = (d_1 + d_2)e$, но

$$d_1 + d_2 = \frac{a}{e} + x + \left(-x + \frac{a}{e}\right) = 2\frac{a}{e}.$$

В результате $r_1 + r_2 = 2\frac{a}{e}e = 2a$. ■

Замечание. При доказательстве достаточности условий (6.11) были использованы оба равенства в его составе. Однако нетрудно показать, что даже из одного равенства, например $\frac{r_1}{d_1} = e$, для произвольной точки M , следует, что эта точка принадлежит заданному эллипсу. Действительно, учитывая, что $r_1 = \sqrt{(x+c)^2 + y^2}$, $d_1 = x + \frac{a}{e}$, $e = \frac{c}{a}$, получаем

$$r_1 = d_1e \Leftrightarrow \sqrt{(x+c)^2 + y^2} = a + ex,$$

или

$$x^2 + 2cx + c^2 + y^2 = a^2 + 2cx + \frac{c^2}{a^2}x^2.$$

Выполнив очевидные преобразования с учетом равенства $a^2 - c^2 = b^2$, придем к уравнению $b^2x^2 + a^2y^2 = a^2b^2$. Разделив обе части этого уравнения на a^2b^2 , получим каноническое уравнение (6.7) эллипса.

Таким образом, *точка принадлежит эллипсу тогда и только тогда, когда отношение фокального радиуса этой точки к расстоянию от той же точки $M(x; y)$ до соответствующей директрисы равно эксцентриситету эллипса.*

47.3. Параметрические уравнения эллипса

Докажем, что уравнения

$$\begin{cases} x = a \cos t, \\ y = b \sin t, \end{cases} \quad 0 \leq t \leq 2\pi, \quad (6.12)$$

где $a > 0$, $b > 0$, являются параметрическими уравнениями эллипса.

Преобразуем равенства (6.12): $\begin{cases} \frac{x}{a} = \cos t, \\ \frac{y}{b} = \sin t. \end{cases}$ Теперь возведем

левые и правые части полученных равенств в квадрат и сложим:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = \cos^2 t + \sin^2 t,$$

или $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$, а это каноническое уравнение эллипса (6.7).

Отметим, что изменению параметра t от 0 до 2π соответствует пробегание точки $M(x(t); y(t))$, где $x(t) = a \cos t$, $y(t) = b \times \sin t$, по эллипсу против хода часовой стрелки от точки $A_1(a; 0)$ при $t = 0$ до этой же точки при $t = 2\pi$ (рис. 6.5).

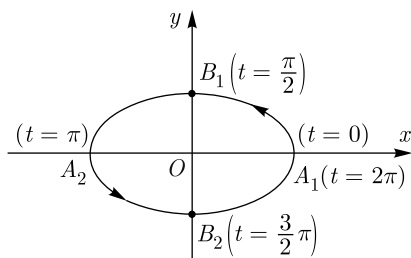


Рис. 6.5

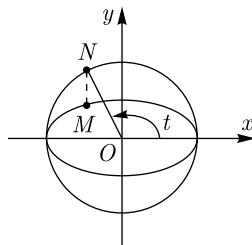


Рис. 6.6

Параметрические уравнения эллипса удобны для решения задач математического анализа (нахождение длины эллипса или его площади, вычисления массы пластинки, границей которой является эллипс, и др.).

Известно [7], что эллипс может рассматриваться как образ окружности с центром в той же точке, что и центр эллипса, и радиусом $R = a$, где a — большая полуось эллипса, при равномерном сжатии окружности вдоль оси Oy с коэффициентом сжатия $k = \frac{b}{a}$. При таком преобразовании каждой точке $M(x; y)$ эллипса отвечает точка $N\left(x; \frac{a}{b}y\right)$ окружности. Угол $t = (\overline{ON}, \overline{Ox})$, образованный вектором $\overline{ON}$ с положительным направлением оси Ox , называется *эксцентрисическим углом* точки M эллипса и является параметром t в уравнениях (6.12) (рис. 6.6).

Пример 6.1. Известны эксцентриситет эллипса $e = 0,6$ и уравнение левой директрисы $D_1: x = -25$. Требуется написать каноническое уравнение эллипса и построить его.

Решение. Дано:

$$e = \frac{c}{a} = 0,6, \quad \text{и} \quad -\frac{a^2}{c} = -25.$$

Имеем два уравнения с двумя неизвестными a и c . Из первого уравнения находим $c = 0,6a$. С учетом этого результата из второго уравнения находим значение параметра

$$a = 0,6 \cdot 25 = 15,$$

а затем и значение параметра

$$c = 0,6 \cdot 15 = 9.$$

Тогда $b = \sqrt{15^2 - 9^2} = 12$. Теперь мы можем написать каноническое уравнение эллипса с полуосями $a = 15$ (большая полуось) и $b = 12$ (меньшая полуось): $\frac{x^2}{15^2} + \frac{y^2}{12^2} = 1$.

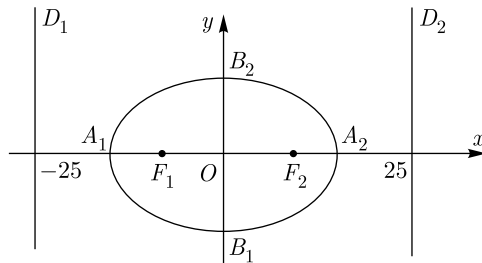


Рис. 6.7

Найденный эллипс вписан в прямоугольник с центром в начале координат, стороны которого параллельны координатным осям Ox и Oy канонической системы координат Oxy . Длины сторон прямоугольника равны соответственно 30 и 24 ($2a = 30$, $2b = 24$). Координаты вершин эллипса: $A_1(-15; 0)$, $A_2(15; 0)$, $B_1(0; -12)$, $B_2(0; 12)$. Строим замкнутую кривую, проходящую через эти вершины. Искомый эллипс изображен на рис. 6.7. ■

Вопросы для самоконтроля к § 47

1. Дайте определение фокальных радиусов точки эллипса и запишите условие, которому они удовлетворяют.

2. Дайте определение большей и меньшей полуосей эллипса. Напишите каноническое уравнение эллипса с полуосями:

$$\text{а) } a = 5, \quad b = 3; \quad \text{б) } a = 5, \quad b = 9.$$

3. Может ли расстояние между двумя различными точками эллипса превышать длину $2a$ его большей оси?

4. Дайте определение эксцентриситета эллипса. Какую форму принимает эллипс, если его эксцентриситет равен: а) $e = 0$; б) $e = 0,01$?

5. Напишите формулы, позволяющие находить фокальные радиусы r_1 и r_2 точки M эллипса, через его эксцентриситет и абсциссу точки M .

6. Напишите уравнения директрис эллипса. Чему равно расстояние между директрисами?

7. Отметьте на листе бумаги две точки F_1 и F_2 так, чтобы расстояние между ними было равно 8 см. Проведите через эти точки прямую F_1F_2 . На расстоянии 3 см слева от точки F_1 и справа от точки F_2 (вне отрезка F_1F_2) проведите прямые D_1 и D_2 , перпендикулярные прямой F_1F_2 . Постройте кривую, каждая точка M которой удовлетворяет условию $\frac{\rho(F_1, M)}{\rho(D_1, M)} = \frac{\rho(F_2, M)}{\rho(D_2, M)} = \frac{2}{3}$, и напишите ее каноническое уравнение.

8. Постройте в системе координат Oxy эллипс, параметрические уравнения которого имеют следующий вид:
$$\begin{cases} x = 4 \cos t, \\ y = 3 \sin t, \end{cases}$$
 $0 \leq t \leq 2\pi$. Найдите эксцентриситет и уравнения директрис и напишите каноническое уравнение данного эллипса.

§ 48. Гипербола

48.1. Вывод и исследование канонического уравнения

Определение 6.5. *Гиперболой* называется множество точек плоскости (множество точек $\{M(x; y)\}$), для каждой из которых модуль разности расстояний до двух фиксированных точек F_1, F_2 плоскости, называемых *фокусами гиперболы*, есть величина постоянная, равная $2a$, $a > 0$, причем $2a < 2c$, где c — расстояние между фокусами (*фокусное расстояние*), a и c — заданные числа.

Общая схема и даже многие детали вывода и исследования уравнения гиперболы совпадают с соответствующими выкладками для эллипса (§ 47). Пусть на плоскости зафиксированы две точки F_1, F_2 — фокусы гиперболы. Значит, известно и фокусное расстояние: $\rho(F_1; F_2) = |F_1F_2| = 2c$. Пусть M — некоторая точка гиперболы (рис. 6.8), причем $|F_1F_2| > |r_1 - r_2|$, где $r_1 = \rho(M, F_1) = |MF_1|$, $r_2 = \rho(M, F_2) = |MF_2|$ — *фокальные радиусы* гиперболы. Таким образом, $|r_1 - r_2| = 2a$, причем $2a < 2c$.

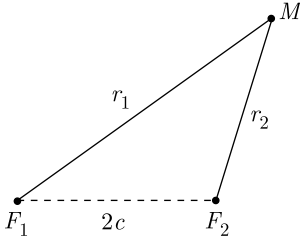


Рис. 6.8

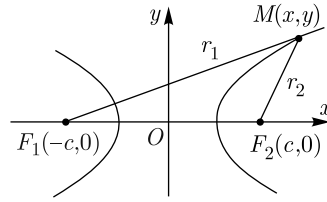


Рис. 6.9

Построим на плоскости декартову прямоугольную систему координат Oxy . Ось Ox (фокальная ось) проведем через фокусы F_1, F_2 . Положительное направление на оси Ox выберем сонаправленным с вектором $\overline{F_1 F_2}$. Начало координат — точку O поместим в середине отрезка $F_1 F_2$. Ось Oy проведем перпендикулярно фокальной оси (оси Ox).

Назовем построенную систему координат *канонической системой координат* для рассматриваемой гиперболы (рис. 6.9).

В соответствии с определением 6.5 точка $M(x, y)$ принадлежит гиперболе тогда и только тогда, когда

$$|r_1 - r_2| = 2a, \quad (6.13)$$

где $r_1 = \sqrt{(x+c)^2 + y^2}$, $r_2 = \sqrt{(x-c)^2 + y^2}$. Учитывая, что $|r_1 - r_2| = 2a \Leftrightarrow r_1 - r_2 = \pm 2a$, или $r_1 = r_2 \pm 2a$, получаем

$$\sqrt{(x+c)^2 + y^2} = \sqrt{(x-c)^2 + y^2} \pm 2a.$$

Возведем обе части последнего равенства в квадрат:

$$(x+c)^2 + y^2 = (x-c)^2 + y^2 \pm 4a\sqrt{(x-c)^2 + y^2} + 4a^2,$$

или после преобразования

$$cx - a^2 = \pm a\sqrt{(x-c)^2 + y^2}.$$

Знак в правой части полученного уравнения выбирается соответствующим знаком левой части, т. е. «+», если $cx - a^2 > 0$, и «-», если $cx - a^2 < 0$. Вновь возведем в квадрат обе части последнего равенства:

$$c^2 x^2 - 2a^2 cx + a^4 = a^2 x^2 - 2a^2 cx + a^2 c^2 + a^2 y^2,$$

или после очевидных преобразований

$$(c^2 - a^2)x^2 - a^2 y^2 = a^2(c^2 - a^2).$$

Обозначим $b^2 = c^2 - a^2$, $b = \sqrt{c^2 - a^2}$ ($c > a \Rightarrow c^2 - a^2 > 0$). С учетом введенного обозначения уравнение примет следующий вид: $b^2x^2 - a^2y^2 = a^2b^2$, а после деления обеих частей последнего равенства на a^2b^2 получим окончательную каноническую форму записи уравнения, выведенного из условия (6.13):

$$\boxed{\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1}. \quad (6.14)$$

Равносильность уравнений (6.13) и (6.14) не является очевидным фактом. Пока установлено, что координаты каждой точки $M(x; y)$ гиперболы удовлетворяют не только уравнению (6.13), но и уравнению (6.14). Покажем, что справедливо и обратное, а именно, что каждая точка $M(x; y)$, удовлетворяющая уравнению (6.14), удовлетворяет и уравнению (6.13), т. е. $|r_1 - r_2| = 2a$.

Получим сначала выражения для фокальных радиусов гиперболы, аналогичные формулам (6.8) для эллипса. Пусть координаты точки $M(x; y)$ удовлетворяют уравнению (6.16). Тогда $y^2 = b^2 \left(\frac{x^2}{a^2} - 1 \right)$ и

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{(x+c)^2 + y^2} = \sqrt{x^2 + 2cx + c^2 + \frac{b^2}{a^2}x^2 - b^2} = \\ &= \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{a^2}x^2 + 2a\frac{c}{a}x + c^2 - b^2}. \end{aligned}$$

Учтем введенные ранее обозначения ($b^2 = c^2 - a^2$, $c^2 - b^2 = a^2$, $a^2 + b^2 = c^2$) и введем еще одно: $\frac{c}{a} = e$. В итоге получим

$$r_1 = \sqrt{e^2x^2 + 2aex + a^2} = \sqrt{(a + ex)^2} = |a + ex|.$$

Определение 6.6. Параметры a и b в уравнении (6.14) гиперболы называются соответственно *действительной и мнимой полуосями гиперболы*, а параметр $e = \frac{c}{a}$ — *эксцентриситетом гиперболы*.

Поскольку $c > a$, то эксцентриситет гиперболы принимает значения из бесконечного интервала $(1; +\infty)$. Из уравнения гиперболы следует, что допустимые значения абсциссы точки M принадлежат множеству $(-\infty; -a] \cup [a; +\infty)$. Действительно,

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \Leftrightarrow \frac{x^2}{a^2} = 1 + \frac{y^2}{b^2} \Rightarrow \frac{x^2}{a^2} \geq 1 \Leftrightarrow |x| \geq a.$$

Но тогда $|a + ex| = \begin{cases} a + ex, & \text{если } x \geq a, \\ -a - ex, & \text{если } x \leq -a, \end{cases} \quad \text{т. е.}$

$$\boxed{\begin{matrix} r_1 = a + ex, & \text{если } x \geq a, \\ r_1 = -a - ex, & \text{если } x \leq -a. \end{matrix}} \quad (6.15)$$

Аналогично выводятся формулы для фокального радиуса r_2 :

$$\boxed{\begin{matrix} r_2 = -a + ex, & \text{если } x \geq a, \\ r_2 = a - ex, & \text{если } x \leq -a. \end{matrix}} \quad (6.16)$$

Из формул (6.15) и (6.16) следует, что

$$|r_1 - r_2| = |a + ex - (-a + ex)| = 2a \quad \text{при } x \geq a$$

и

$$|r_1 - r_2| = |-a - ex - (a - ex)| = |-2a| = 2a \quad \text{при } x \leq -a.$$

Значит, для каждого x , $|x| \geq a$, и каждого y , удовлетворяющего равенству $y^2 = b^2 \left(\frac{x^2}{a^2} - 1 \right)$, выполняется равенство (6.13), а именно это мы должны были доказать.

Таким образом, если координаты точки $M(x; y)$ удовлетворяют уравнению (6.14), то они удовлетворяют и соотношению (6.13), определяющему гиперболу. Уравнение (6.14) получено в канонической для данной гиперболы системе координат, поэтому оно называется *каноническим уравнением гиперболы*.

Исследуем каноническое уравнение гиперболы (6.14).

1. Уравнение (6.14) определяет кривую, расположенную вне прямоугольника (за исключением точек $A_1(-a; 0)$ и $A_2(a; 0)$) со сторонами, параллельными координатным осям и равными $2a$ и $2b$. (Этот прямоугольник называется *основным прямоугольником* гиперболы, а точки A_1 и A_2 — его *вершинами*.)

Выше установлено, что абсциссы x точек гиперболы удовлетворяют неравенству $|x| \geq a$, т. е. в вертикальной полосе $-a < x < a$, $y \in \mathbb{R}$ нет точек гиперболы.

2. Гипербола симметрична относительно обеих координатных осей и точки O — центра гиперболы.

3. Симметричность гиперболы относительно обеих координатных осей позволяет проводить дальнейшее исследование уравнения (6.14) только в первой четверти, т. е. при $x \geq a$ и $y \geq 0$.

Разрешив уравнение (6.14) относительно y при $x \geq a$ и $y \geq 0$, получим

$$y(x) = \frac{b}{a} \sqrt{x^2 - a^2}, \quad x \geq a. \quad (6.17)$$

Функция $y(x)$ определена в бесконечном промежутке $[a; +\infty)$, при этом $y(a) = 0$; она строго возрастает в интервале $(a; +\infty)$, причем $\lim_{x \rightarrow +\infty} y(x) = +\infty$.

4. Прямые $y_1 = \frac{b}{a}x$ и $y_2 = -\frac{b}{a}x$, проходящие через противоположные вершины основного прямоугольника гиперболы, являются асимптотами гиперболы при $x \rightarrow +\infty$ и при $x \rightarrow -\infty$.

Напомним, что прямая $y = kx + b$ называется асимптотой графика функции $f(x)$ при $x \rightarrow +\infty$ ($x \rightarrow -\infty$), если график функции f неограниченно приближается к этой прямой при удалении точки M на кривой в бесконечность, т.е. если $\lim_{x \rightarrow +\infty} (f(M) - y(N)) = 0$. Точка N на асимптоте имеет такую же абсциссу, что и точка M на соответствующей ветви гиперболы (рис. 6.10).

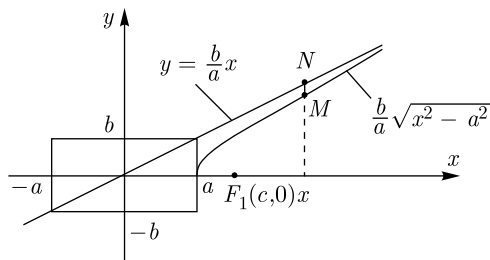


Рис. 6.10

В данном случае для доказательства утверждения 4 достаточно убедиться в том, что

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \left(y(x) - \frac{b}{a}x \right) = 0 \quad \text{и} \quad \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \left(y(x) - \left(-\frac{b}{a}x \right) \right) = 0.$$

Найдем, например, первый из двух пределов при $x \rightarrow +\infty$ (второй вычисляется аналогично):

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow +\infty} (y(M) - y_1(N)) &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \left(\frac{b}{a} \sqrt{x^2 - a^2} - \frac{b}{a}x \right) = \infty - \infty = \\ &= \frac{b}{a} \cdot \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(\sqrt{x^2 - a^2} - x)(\sqrt{x^2 - a^2} + x)}{\sqrt{x^2 - a^2} + x} = \\ &= -ab \cdot \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{\sqrt{x^2 - a^2} + x} = 0. \end{aligned}$$

Неопределенность $\infty - \infty$ раскрыта умножением выражения $\sqrt{x^2 - a^2} - x$ на сопряженное выражение $\sqrt{x^2 - a^2} + x$.

Отобразим построенную в первой четверти кривую (рис. 6.10) из верхней полуплоскости в нижнюю симметрично относительно оси Ox . Затем кривую, полученную в результате такого преобразования в правой полуплоскости, отобразим симметрично относительно оси Oy в левую полуплоскость. В итоге получим искомую кривую — гиперболу (рис. 6.11).

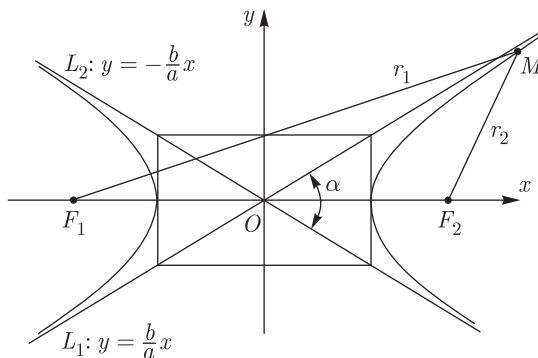


Рис. 6.11

Подводя итог исследованию, отметим, что гипербола:

- не является замкнутой кривой;
- не ограничена ($y(x) \rightarrow \pm\infty$ при $x \rightarrow \pm\infty$), но при этом имеет две асимптоты $y = \frac{b}{a}x$ и $y = -\frac{b}{a}x$ при $x \rightarrow \pm\infty$;
- симметрична относительно обеих координатных осей и точки O — центра гиперболы;
- имеет две ветви, расположенные симметрично относительно оси Oy .

Кроме того:

- фокусы F_1, F_2 гиперболы находятся внутри соответственно левой и правой ветвей гиперболы;
- эксцентриситет гиперболы больше 1; чем ближе число e к 1, тем меньше угол α между асимптотами (рис. 6.10) и тем больше «прижаты» ветви гиперболы к оси Ox ; чем больше значение эксцентриситета, тем больше «раскрываются» ветви гиперболы.

Рассмотрим две гиперболы, имеющие равные действительные полуоси $a_1 = a_2 = 4$ и неравные мнимые полуоси: $b_1 = 1$, а $b_2 = 8$. Для первой гиперболы (рис. 6.12, а) эксцентриситет

$$e_1 = \frac{\sqrt{4^2 + 1}}{4} = \frac{\sqrt{17}}{4} \approx 1,$$

а для второй (рис. 6.12, б) —

$$e_2 = \frac{\sqrt{4^2 + 8^2}}{4} = \sqrt{5}.$$

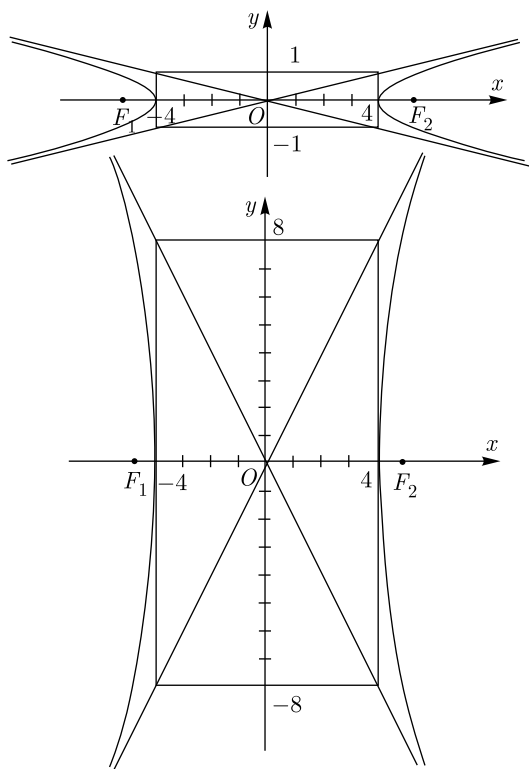


Рис. 6.12

Гипербола $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = -1$ или $-\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ называется *сопряженной к гиперболе* $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$.

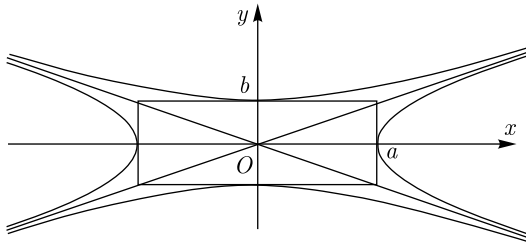


Рис. 6.13

Обе гиперболы изображены на рис. 6.13.

48.2. Директрисы гиперболы

Рассмотрим на плоскости гиперболу с заданными действительной и мнимой полуосями (с фиксированными значениями параметров a и b) и введем каноническую систему координат Oxy . В этой системе координат уравнение гиперболы будет иметь вид (6.14). Введем понятие директрис гиперболы, которые определяются аналогично директрисам эллипса.

Определение 6.7. Директрисами гиперболы называются две прямые, перпендикулярные к ее действительной оси и расположенные симметрично относительно центра гиперболы на расстоянии $\frac{a}{e}$ от него.

Для гиперболы эксцентриситет $e > 1$ и потому расстояние $\frac{a}{e}$ от центра гиперболы до директрисы меньше, чем расстояние до соответствующей вершины $\left(\frac{a}{e} < a\right)$. Это означает, что левая директриса D_1 пересекает ось Ox в точке $x = -\frac{a}{e}$, расположенной между вершиной $A_1(-a; 0)$ и центром гиперболы, а правая директриса D_2 — в точке $x = \frac{a}{e}$, расположенной между центром гиперболы и вершиной $A_2(a; 0)$. Таким образом, (рис. 6.14):

$$D_1: x = -\frac{a}{e}; \quad D_2: x = \frac{a}{e}.$$

Учитывая, что

$$e = \frac{c}{a},$$

уравнения директрис гиперболы можно записать также в виде

$$D_1: x = -\frac{a^2}{c}; \quad D_2: x = \frac{a^2}{c}.$$

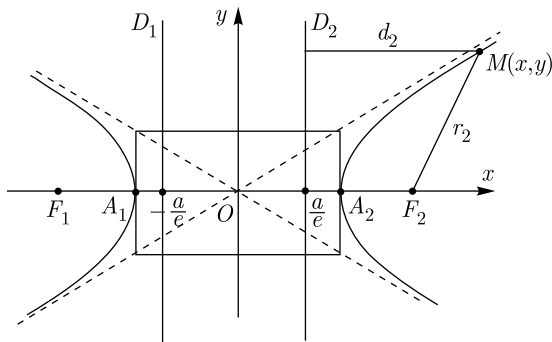


Рис. 6.14

На рис. 6.14: r_2 — фокальный радиус гиперболы, а $d_2 = \rho(M, D_2) = x - \frac{a}{e}$ есть расстояние от точки M до директрисы D_2 . Фокальный радиус r_1 и расстояние $d_1 = \rho(M, D_1)$ от точки M до директрисы D_1 на рис. 6.14 не показаны.

Установим связь параметров $r_1, d_1; r_2, d_2$ с координатами $(x; y)$ точки $M(x; y)$ гиперболы, а именно, найдем условия, при которых точка плоскости принадлежит гиперболе. Справедлива следующая теорема.

Теорема 6.2. Для того чтобы точка $M(x; y)$ была точкой гиперболы (6.14), необходимо и достаточно, чтобы выполнялись равенства

$$\boxed{\frac{r_1}{d_1} = \frac{r_2}{d_2} = e}. \quad (6.18)$$

Доказательство. Доказательство теоремы проводится аналогично доказательству теоремы 6.1 для эллипса. Различие заключается лишь в том, что гипербола имеет две ветви и потому следует рассмотреть два случая для каждого равенства в составе формулы (6.18) (для каждого фокуса).

Приведем доказательство только необходимости. Дано: точка $M(x; y)$ принадлежит гиперболе, т. е. ее координаты удовлетворяют уравнению (6.14) и, как следствие, справедливы формулы (6.15), (6.16) для фокальных радиусов гиперболы. Требуется доказать, что для произвольной точки $M(x; y)$ гиперболы и, например, левого фокуса F_1 в этих условиях выполняется равенство $\frac{r_1}{d_1} = e$.

Рассмотрим два случая: а) точка $M(x; y)$ принадлежит левой ветви гиперболы; б) точка $M(x; y)$ принадлежит правой ветви гиперболы.

а) Если точка $M(x; y)$ принадлежит левой ветви гиперболы (рис. 6.15), то в соответствии с формулой (6.15) $r_1 = -a - ex$. Из определения расстояния между двумя точками на числовой прямой и рис. 6.15 следует, что $d_1 = \left| x - \left(-\frac{a}{e} \right) \right| = -\frac{a + ex}{e}$. Тогда $\frac{r_1}{d_1} = \frac{-(a + ex)}{-\frac{a + ex}{e}} = e$.

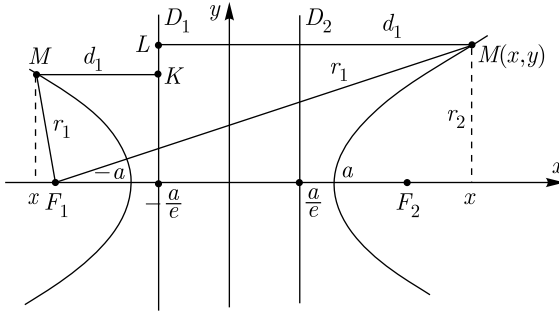


Рис. 6.15

б) Пусть точка $M(x; y)$ принадлежит правой ветви гиперболы (рис. 6.15), т. е. $x \geq a$. В этом случае из формулы (6.15) имеем $r_1 = a + ex$. Далее, $d_1 = |ML| = \left| x - \left(-\frac{a}{e} \right) \right| = \left| \frac{a + ex}{e} \right| = \frac{a + ex}{e}$. Полученные выражения для фокального радиуса r_1 и расстояния d_1 от точки M до директрисы D_1 гиперболы позволяют записать равенство $\frac{r_1}{d_1} = \frac{a + ex}{(a + ex)/e} = e$.

Доказательство достаточности условий (6.18) предлагается читателю провести самостоятельно.

В заключение отметим, что условия (6.11) и (6.18) принадлежности точки эллипсу и гиперболе соответственно идентичны: *точка $M(x; y)$ принадлежит эллипсу (гиперболе) в заданной канонической системе координат тогда и только тогда, когда выполняются равенства*

$$\frac{r_1}{d_1} = \frac{r_2}{d_2} = e.$$

Пример 6.2. Написать каноническое уравнение гиперболы и построить ее, если известно, что ее мнимая полуось равна 5, а эксцентриситет равен $\frac{13}{12}$.

Решение. Поскольку $e = \frac{c}{a}$, $a^2 + b^2 = c^2$, то имеем уравнения $\frac{c}{a} = \frac{13}{12}$, $a^2 + 25 = c^2$. Решая их совместно, получаем:

$$c = \frac{13a}{12}, \quad a^2 + 25 = \frac{169a^2}{12} \Rightarrow a = 12, \quad c = 13.$$

Каноническое уравнение гиперболы с полученными значениями параметров имеет вид $\frac{x^2}{12^2} - \frac{y^2}{5^2} = 1$.

Гиперболу будем строить в следующей последовательности:

1) строим прямоугольник с центром в начале координат и сторонами $2a = 24$, $2b = 10$, параллельными координатным осям Ox и Oy соответственно;

2) проводим асимптоты $y = \pm \frac{5}{12}x$, являющиеся продолжениями диагоналей построенного прямоугольника (рис. 6.16);

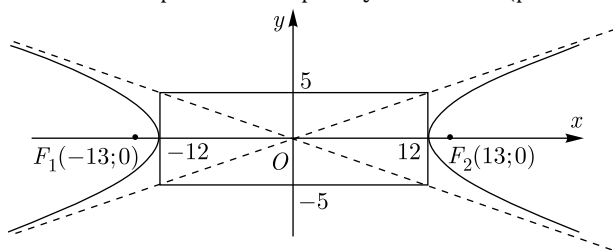


Рис. 6.16

3) строим гиперболу с вершинами в точках $A_1(-12; 0)$, $A_2(12; 0)$, ветви которой приближаются к проведенным асимптотам. ■

Вопросы для самоконтроля к § 48

1. Дайте определение фокальных радиусов точки гиперболы и запишите условия, которым они удовлетворяют.

2. Дайте определение действительной и мнимой полуосей гиперболы. Напишите каноническое уравнение гиперболы с полуосями:

а) $a = 5$, $b = 3$; б) $a = 5$, $b = 9$.

3. Может ли расстояние между какими-либо двумя точками гиперболы превышать длину $2a$ ее действительной оси? Имеет ли гиперболa точки (на разных ветвях), расстояние между которыми меньше расстояния $2c$ между ее фокусами?

4. Дайте определение эксцентриситета гиперболы. В чем различие формы гипербол, эксцентриситет которых равен: а) $e = 2$; б) $e = 100$?

5. Напишите формулы, позволяющие находить фокальные радиусы r_1 и r_2 точки M гиперболы через ее эксцентриситет и абсциссу точки M .

6. Напишите уравнения директрис гиперболы. Чему равны расстояния между директрисой и ее фокусами?

7. Напишите каноническое уравнение гиперболы с заданным фокусным расстоянием c и прямым углом между асимптотами.

8. Отметьте на листе бумаги две точки F_1 и F_2 так, чтобы расстояние между ними было равно 20 см. Проведите через эти точки прямую. На расстоянии 3,6 см справа от точки F_1 и слева от точки F_2 (внутри отрезка F_1F_2) проведите прямые D_1 и D_2 , перпендикулярные прямой F_1F_2 . Постройте кривую, каждая точка M которой удовлетворяет условию $\frac{\rho(F_1, M)}{\rho(D_1, M)} = \frac{\rho(F_2, M)}{\rho(D_2, M)} = 1,25$, и напишите ее каноническое уравнение.

§ 49. Парабола

Из § 46, 47 следует, что если:

а) зафиксировать на плоскости две различные точки F_1 и F_2 — фокусы кривой;

б) провести две прямые, перпендикулярные фокальной оси F_1F_2 , либо вне, либо внутри отрезка F_1F_2 , но на равных расстояниях от соответствующих фокусов;

в) зафиксировать некоторое число e , либо большее 1, либо меньшее 1, и затем выбирать точки M на плоскости так, чтобы отношения фокальных расстояний r_1 и r_2 к расстояниям d_1 и d_2 от этих точек до соответствующей прямой было равно e ($\frac{r_i}{d_i} = e$, $i = 1, 2$), то при этом будут получаться только:

- эллипсы при $e < 1$;
- гиперболы при $e > 1$.

Нерассмотренным остался случай, когда отношение r/d равно единице. Как увидим ниже, кривая, точки которой удовлетворяют этому свойству, является параболой.

Определение 6.8. *Параболой* называется множество точек плоскости, для каждой из которых расстояние до некоторой фиксированной точки плоскости, называемой *фокусом параболы*, равно расстоянию до прямой, не проходящей через фокус и называемой *директрисой параболы*.

Пусть на плоскости зафиксированы точка F и прямая D , не проходящая через точку F (рис. 6.17). Проведем через точку F прямую K_0F , перпендикулярную директрисе D . На отрезке K_0F отметим точку O — середину отрезка K_0F . Поскольку $|\overline{OK_0}| = |\overline{OF}|$, т. е. расстояние от точки O до директрисы D равно расстоянию от этой точки до фокуса параболы F , то точка M_0 принадлежит параболе.

Отметим теперь на плоскости две точки M_1 и M'_1 , симметричные относительно прямой K_0F и удовлетворяющие условиям: $\rho(M_1, F) = \rho(M_1, K_1)$, $\rho(M'_1, F) = \rho(M'_1, K'_1)$. Здесь $\rho(M_1, K_1)$ — расстояние от точки M_1 до директрисы D . В соответствии с определением 6.8 точки M_1 и M'_1 принадлежат параболе. Довольно очевидно, что таких точек плоскости (расположенных симметрично относительно прямой K_0F и на одинаковом расстоянии от фокуса параболы F и ее директрисы D) бесконечно много.

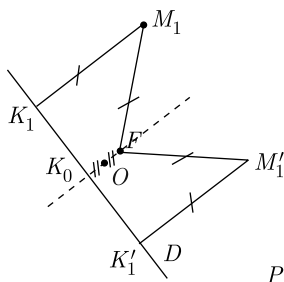


Рис. 6.17

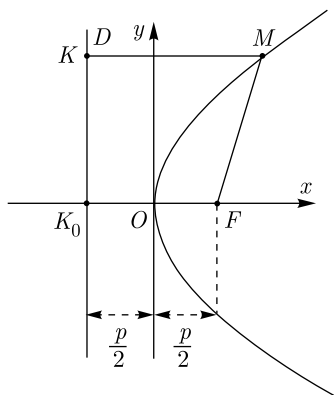


Рис. 6.18

Определение 6.9. Прямая, проходящая через фокус параболы перпендикулярно к ее директрисе, называется *осью симметрии параболы*.

Получим уравнение параболы в канонической системе координат, которую введем следующим образом. В качестве начала декартовой прямоугольной системы координат возьмем точку O — вершину параболы; ось Ox проведем в направлении вектора $\overline{OF}$, ось Oy — перпендикулярно оси Ox (рис. 6.18).

Расстояние $\rho(F, D)$ от фокуса параболы до ее директрисы обозначим p и назовем *фокальным параметром параболы*. По построению $|\overline{K_0O}| = |\overline{OF}| = \frac{p}{2}$. Это позволяет записать:

- уравнение директрисы

$$D: x = -\frac{p}{2};$$

- координаты фокуса $F\left(\frac{p}{2}; 0\right)$.

Подчеркнем еще раз, что:

• осью симметрии параболы в канонической системе координат является ось Ox ;

• парабола не имеет центра симметрии, т.е. в отличие от эллипса и гиперболы не является центрально-симметричной кривой.

В соответствии с определением 6.8 для любой точки $M(x; y)$, принадлежащей параболе, должно выполняться равенство $|MF| = |MK|$, или в координатной форме

$$\sqrt{\left(x - \frac{p}{2}\right)^2 + y^2} = \left|x + \frac{p}{2}\right|. \quad (6.19)$$

Упростим уравнение (6.19) с помощью стандартных процедур — возведения обеих частей уравнения в квадрат с последующим тождественным преобразованием:

$$x^2 - px + \frac{p^2}{4} + y^2 = x^2 + px + \frac{p^2}{4} \Rightarrow y^2 = 2px.$$

Полученное уравнение

$$\boxed{y^2 = 2px} \quad (6.20)$$

называется *каноническим уравнением параболы*. Равносильность уравнений (6.19) и (6.20) очевидна.

Подводя итоги изучения параболы, сформулируем теорему, являющуюся аналогом теорем 6.1 и 6.2.

Теорема 6.3. Для того чтобы точка $M(x; y)$ принадлежала параболе (6.20) необходимо и достаточно, чтобы выполнялось равенство

$$\boxed{\frac{r}{d} = 1}. \quad (6.21)$$

Здесь (см. рис. 6.18) $r = \rho(M, F)$, $d = \rho(M, D)$, где F — фокус параболы, а D — ее директриса.

Исследование канонического уравнения параболы (6.20) с целью построения ее графика не представляет особого труда и потому может быть выполнено читателем самостоятельно. Свойства параболы $y = x^2$ и ее обобщения $y = ax^2$ подробно изучаются в средней школе.

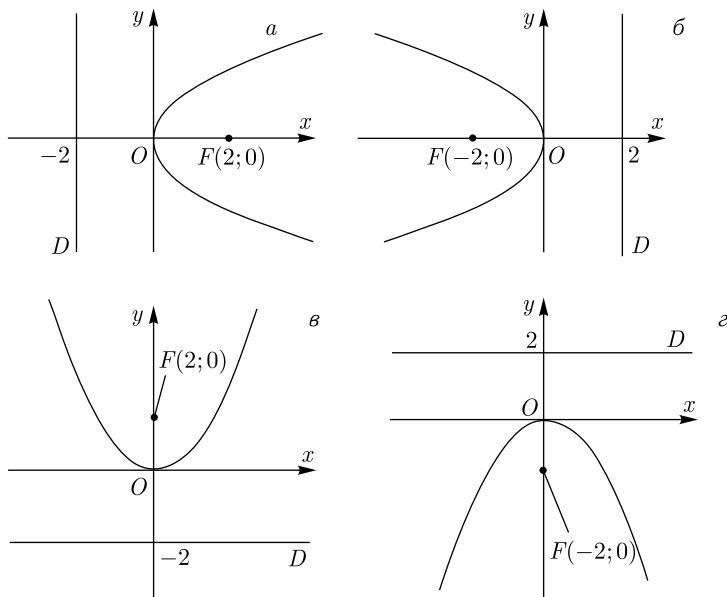


Рис. 6.19

На рис. 6.19, *а–г* приведены графики парабол:

$$x = 8y^2 \text{ (а); } x = -8y^2 \text{ (б); } y = 8x^2 \text{ (в); } y = -8x^2 \text{ (г).}$$

В каждом из четырех вариантов $2p = 8$, т. е. фокальный параметр p для каждой из четырех парабол равен 4. Координаты фокусов и уравнения директрис соответственно таковы:

$$\text{а) } F(2;0), D: x = -2; \quad \text{б) } F(-2;0), D: x = 2;$$

$$\text{в) } F(0;2), D: y = -2; \quad \text{г) } F(0;-2), D: y = 2.$$

В заключение отметим, что:

- каждая из парабол $y^2 = 2px$ и $y^2 = -2px$ симметрична относительно оси Ox ; график одной из них (при фиксированном значении параметра p) получается из графика другой зеркальным отображением относительно оси Oy (рис. 6.19, *а, б* при $p = 4$);

- каждая из парабол $x^2 = 2py$ и $x^2 = -2py$ симметрична относительно оси Oy ; график одной из них (при фиксированном значении параметра p) получается из графика другой зеркальным отображением относительно оси Ox (рис. 6.19, *в, г* при $p = 4$).

§ 50. Полярное уравнение эллипса, гиперболы и параболы

В теоремах 6.1–6.3 приведены условия, при которых некоторое множество точек плоскости $\{M(x; y)\}$ является соответственно эллипсом, гиперболой или параболой. Эти условия зафиксированы в равенствах (6.11), (6.18) и (6.21) соответственно. Общий вид этих условий позволяет объединить теоремы 6.1–6.3 в одну.

Теорема 6.4. Пусть на плоскости зафиксированы некоторая точка F (фокус), прямая D (директриса), не проходящая через точку F , и пусть задано некоторое число e , $e \in (0; +\infty)$, а также введена соответствующая каноническая декартова прямоугольная система координат. Тогда множество точек плоскости $\{M(x; y)\}$, для каждой из которых отношение фокального расстояния $r = \rho(M, F)$ к расстоянию $d = \rho(M, D)$ от точки M до директрисы D равно заданному числу e , т. е.

$$\boxed{\frac{r}{d} = e}, \quad (6.22)$$

является:

- а) эллипсом, если $0 < e < 1$;
- б) гиперболой, если $e > 1$;
- в) параболой, если $e = 1$.

Иллюстрация к теореме 6.4 приведена на рис. 6.20.

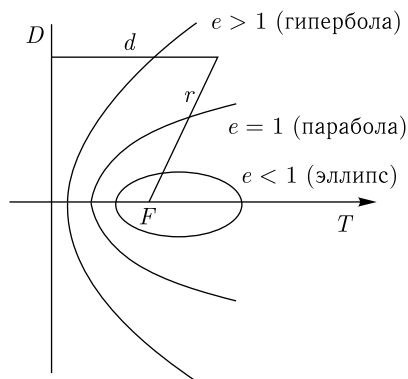


Рис. 6.20

Равенство (6.22), определяющее в зависимости от значения параметра e (эксцентриситет) одну из трех изученных кривых,

позволяет, при соответствующем построении полярной системы координат, получить единое полярное уравнение эллипса, параболы и одной ветви гиперболы. Пусть выполняются условия теоремы 6.4, т. е. зафиксированы точка F (фокус) и некоторая прямая D (директриса), $F \notin D$ и выбрано некоторое положительное значение параметра e . Значит, выбраны тип и параметры кривой (рис. 6.20). Это может быть эллипс с левым фокусом, парабола либо правая ветвь гиперболы с правым фокусом.

Введем полярную систему координат следующим образом:

- полюс совместим с фокусом F кривой;
- полярную ось FT проведем через точку F перпендикулярно директрисе D ; в качестве положительного направления полярной оси выберем направление вектора $\overrightarrow{K_0F}$.

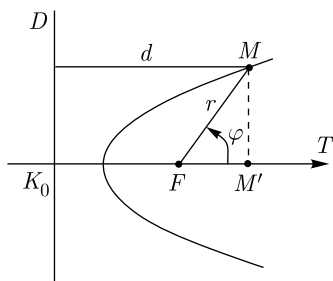


Рис. 6.21

Тогда для произвольной точки M кривой имеем: $r = |\overrightarrow{MF}|$ — полярный радиус точки M , или фокальное расстояние, $\varphi = (\overrightarrow{MF}, \overrightarrow{FT})$ — полярный угол точки M , $d = \rho(M, D)$ — расстояние от точки M до директрисы D . Введем еще один параметр $p = \rho(F, K_0)$ — расстояние от фокуса F до директрисы D .

Выразим параметр d через полярные координаты φ , ρ точки M и параметр p . Имеем (см. рис. 6.21)

$$d = |\overrightarrow{K_0M'}| = |\overrightarrow{K_0F}| + |\overrightarrow{FM'}| = p + r \cos \varphi.$$

Учитывая, что $\frac{r}{d} = e$, получаем уравнение относительно переменной r

$$\frac{r}{p + r \cos \varphi} = e.$$

Выразив отсюда r , получим искомое полярное уравнение:

$$\boxed{r = \frac{pe}{1 - e \cos \varphi}}. \quad (6.23)$$

Определение 6.10. Уравнение (6.23) называется полярным уравнением эллипса, параболы и правой ветви гиперболы.

Полярное уравнение левой ветви гиперболы в этой же системе координат имеет следующий вид:

$$\boxed{r = \frac{-pe}{1 + e \cos \varphi}}. \quad (6.24)$$

Действительно, в этом случае (рис. 6.22) имеем:

$$d = |\overline{MK}| = |\overline{M'K_0}| = |\overline{M'F}| - |\overline{K_0F}| = -r \cos \varphi - p.$$

Тогда поскольку $\frac{\pi}{2} < \varphi < \frac{3}{2}\pi$, то $\cos \varphi < 0$ и потому

$$|\overline{M'F}| = |r \cos \varphi| = -r \cos \varphi.$$

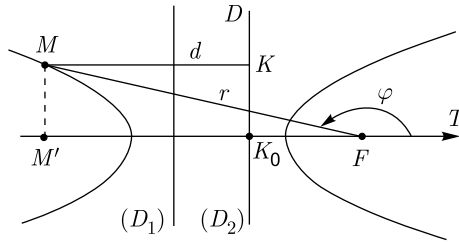


Рис. 6.22

Как следствие, в этом случае

$$\frac{r}{d} = e \Leftrightarrow \frac{r}{-r \cos \varphi - p} = e,$$

откуда следует (6.24).

Установим пределы изменения полярных координат φ и r для эллипса, параболы и гиперболы.

1. *Эллипс*. Очевидно, что для эллипса полярный угол может изменяться в пределах от 0 до 2π ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$). Тогда из формулы (6.23) получаем пределы изменения полярного радиуса: $\frac{pe}{1+e} \leq r \leq \frac{pe}{1-e}$. Так, например, для эллипса $\frac{x^2}{25} + \frac{y^2}{9} = 1$ имеем: $a = 5$, $c = 4$, $e = \frac{4}{5}$, $p = \frac{25}{4} - 4 = \frac{9}{4}$. Поэтому

$$\frac{\frac{9}{4} \cdot \frac{4}{5}}{1 + \frac{4}{5}} \leq r \leq \frac{\frac{9}{4} \cdot \frac{4}{5}}{1 - \frac{4}{5}}, \quad \text{или} \quad 1 \leq r \leq 9.$$

2. *Парабола*. Здесь $0 < \varphi < 2\pi$, и так как для параболы $e = 1$, то из формулы (6.23) получаем $\frac{p}{2} \leq r < +\infty$.

3. *Гипербола*. Найдём сначала пределы изменения полярных координат φ и r для правой ветви гиперболы. Если точка M пробегает правую ветвь гиперболы против хода часовой стрелки, то полярный угол $\varphi = \widehat{MF, FT}$ изменяется в пределах от φ_1 до φ_2 ($\varphi_1 < \varphi < \varphi_2$) (рис. 6.23).

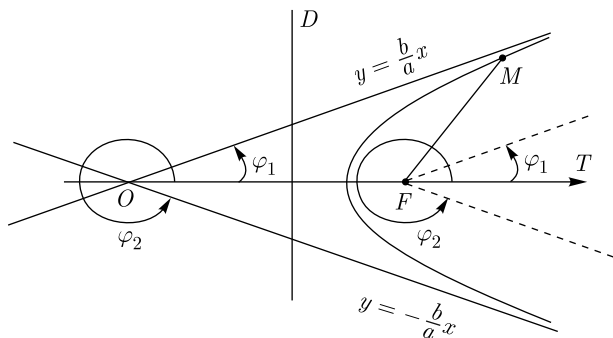


Рис. 6.23

Здесь φ_1 и φ_2 — углы, образованные асимптотами $y = \frac{b}{a}x$ и $y = -\frac{b}{a}x$ соответственно с полярной осью FT .

Из очевидных соотношений $\operatorname{tg} \varphi = \pm \frac{b}{a}$, $\cos^2 \varphi = \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}$ и $a^2 + b^2 = c^2$ получаем

$$\cos^2 \varphi_1 = \frac{a^2}{a^2 + b^2} = \frac{a^2}{c^2} = \frac{1}{e^2}.$$

Отсюда $\varphi_1 = \arccos \frac{1}{e}$ и в силу симметрии $\varphi_2 = 2\pi - \arccos \frac{1}{e}$.

В итоге полярное уравнение правой ветви гиперболы с учетом пределов изменения полярного угла и полярного радиуса будет иметь следующий вид:

$$r = \frac{pe}{1 - e \cos \varphi}, \quad \arccos \frac{1}{e} < \varphi < 2\pi - \arccos \frac{1}{e},$$

$$\frac{pe}{1 + e} \leq r < +\infty. \quad (6.25)$$

Для левой ветви гиперболы аналогично устанавливается справедливость формул

$$r = \frac{-pe}{1 + e \cos \varphi}, \quad \pi - \arccos \frac{1}{e} < \varphi < \pi + \arccos \frac{1}{e},$$

$$\frac{pe}{e - 1} \leq r < +\infty. \quad (6.26)$$

Пример 6.3. Написать полярное уравнение ветвей гиперболы $\frac{x^2}{16} - \frac{y^2}{9} = 1$.

Решение. Имеем: $a = 4$, $b = 3$, $c = 5$, $e = \frac{5}{4}$, $p = 5 - \frac{4^2}{5} = \frac{9}{5}$
 $\left(p = c - \frac{a^2}{c}\right)$, $pe = \frac{9}{5} \cdot \frac{5}{4} = \frac{9}{4}$.

Теперь, следуя формулам (6.25), запишем полярное уравнение правой ветви гиперболы $r = \frac{\frac{9}{4}}{1 - \frac{5}{4} \cos \varphi}$ или $r = \frac{9}{4 - 5 \cos \varphi}$,

где $\arccos \frac{4}{5} < \varphi < 2\pi - \arccos \frac{4}{5}$; тогда

$$\frac{\frac{9}{4}}{1 + \frac{5}{4}} \leq r < +\infty, \quad \text{т. е.} \quad 1 \leq r < +\infty.$$

Используя формулы (6.26), запишем полярное уравнение левой ветви гиперболы

$$r = \frac{-9}{4 + 5 \cos \varphi}, \quad \pi - \arccos \frac{4}{5} < \varphi < \pi + \arccos \frac{4}{5};$$

при этом

$$\frac{\frac{9}{4}}{\frac{5}{4} - 1} \leq r < +\infty, \quad \text{т. е.} \quad 9 \leq r < +\infty.$$

Ответ: $r = \frac{9}{4 - 5 \cos \varphi}$, $\varphi \in \left(\arccos \frac{4}{5}; 2\pi - \arccos \frac{4}{5}\right)$ —

полярное уравнение правой ветви гиперболы; $r = \frac{-9}{4 + 5 \cos \varphi}$,

$\varphi \in \left(\pi - \arccos \frac{4}{5}; \pi + \arccos \frac{4}{5}\right)$ — полярное уравнение левой ветви гиперболы.

§ 51. Оптические свойства эллипса и параболы

Эллипс и парабола обладают замечательными оптическими свойствами. Луч от источника света, помещенного в один из двух фокусов эллипса, отразившись от эллипса, попадает в другой его фокус. Луч от источника света, размещенного в фокусе параболы, отразившись от параболы ¹⁾, распространяется дальше

¹⁾ В обоих случаях выполняется физический закон «угол отражения равен углу падения».

параллельно оси симметрии параболы. Эти свойства эллипса и параболы имеют практическое применение при производстве фар и прожекторов.

Исследуем оптические свойства эллипса.

Утверждение. Пусть в левом фокусе $F_1(-c; 0)$ эллипса $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ расположен источник света, и пусть луч света, отразившись от эллипса в точке $M_0(x_0; y_0)$, пересекает ось Ox в некоторой точке $G(x_G; 0)$ (рис. 6.24). Тогда точка G совпадает со вторым фокусом $F_2(c; 0)$ эллипса.

Доказательство. Достаточно доказать, что равны углы $\angle F_1 M_0 H_1$ и $\angle F_2 M_0 H_2$, образованные касательной к эллипсу в точке M_0 и лучами $F_1 M_0$ и $F_2 M_0$. Здесь H_1, H_2 — основания перпендикуляров, опущенных на касательную из фокусов F_1 и F_2 соответственно. Заметим, что отражение луча от эллипса в точке M_0 равносильно отражению этого луча света от касательной $H_1 H_2$, проведенной к эллипсу в этой точке.

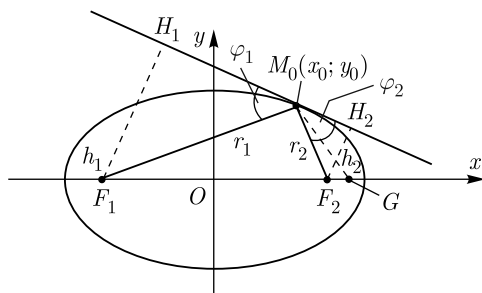


Рис. 6.24

Вполне очевидно, что углы $\varphi_1 = \angle F_1 M_0 H_1$ и $\varphi_2 = \angle F_2 M_0 H_2$ острые. Поэтому для доказательства их равенства достаточно доказать, что равны тангенсы этих углов. Тангенсы углов найдем по формуле (4.29). Для этого необходимо найти угловые коэффициенты прямых $F_1 M_0$, $F_2 M_0$ и $H_1 H_2$. Имеем для $F_1 M_0$ ($k_1 = \operatorname{tg} \varphi_1$): $k_1 = \frac{y_0}{x_0 + c}$; для $F_2 M_0$ ($k_2 = \operatorname{tg} \varphi_2$): $k_2 = \frac{y_0}{x_0 - c}$.

Для касательной $H_1 H_2$: $k_0 = y'(x_0)$, где $y(x) = b\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}$ — уравнение верхней половины эллипса (для случая, изображенного на рис. 6.24). Вычислим производную $y'(x)$:

$$y' = \frac{-bx}{a^2 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} = -\frac{b^2}{a^2} \frac{x}{b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} = -\frac{b^2}{a^2} \cdot \frac{x}{y}.$$

В результате $k_0 = y'(x_0) = -\frac{b^2}{a^2} \cdot \frac{x_0}{y_0}$.

Найдем тангенс угла $\varphi_1 = \angle F_1 M_0 H_1$ $\left(\operatorname{tg} \varphi_1 = \left| \frac{k_1 - k_0}{1 + k_1 k_0} \right| \right)$:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \left| \frac{\frac{y_0}{x_0 + c} - \left(-\frac{b^2}{a^2} \cdot \frac{x_0}{y_0} \right)}{1 + \frac{y_0}{x_0 + c} \left(-\frac{b^2}{a^2} \cdot \frac{x_0}{y_0} \right)} \right| = \left| \frac{a^2 b^2}{y_0} \cdot \frac{a^2 + x_0 c}{a^2 c (a^2 + x_0 c)} \right| = \left| \frac{b^2}{c y_0} \right|.$$

В процессе преобразований были использованы равенства $a^2 - b^2 = c^2$ и $b^2 x_0^2 + a^2 y_0^2 = a^2 b^2$ (точка $M_0(x_0; y_0)$ принадлежит эллипсу).

Аналогично устанавливается, что выражение для тангенса угла $\varphi_2 = \angle F_2 M_0 H_2$: $\operatorname{tg} \varphi_2 = \left| \frac{\frac{y_0}{x_0 - c} + \frac{b^2}{a^2} \cdot \frac{x_0}{y_0}}{1 - \frac{b^2}{a^2} \cdot \frac{x_0}{y_0} \cdot \frac{y_0}{x_0 - c}} \right|$ приводится к виду $\operatorname{tg} \varphi_2 = \left| \frac{b^2}{c y_0} \right|$.

Сопоставив полученные результаты, заключаем, что тангенсы углов, образованных отрезками $F_1 M_0$ и $F_2 M_0$ с касательной $H_1 H_2$, равны. Именно это и требовалось доказать. ■

Таким образом, луч света, направленный из одного фокуса эллипса под некоторым углом α , $0 < \alpha < \pi$, к фокальной оси эллипса, после отражения от эллипса попадает в другой его фокус. В частности, если в одном фокусе поместить источник света, то все лучи, исходящие от него, после отражения от эллипса попадут в другой фокус (рис. 6.25). Это и есть оптическое свойство эллипса.

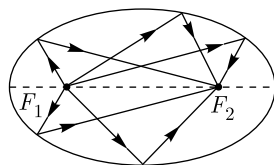


Рис. 6.25

Рассмотрим теперь отражение лучей света от параболы при условии, что источник света находится в фокусе параболы. Докажем, что отраженные от параболы лучи распространяются затем параллельно ее оси симметрии (рис. 6.26).

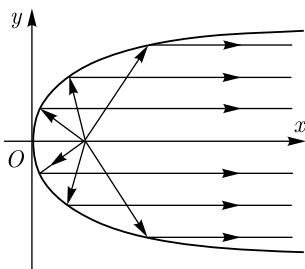


Рис. 6.26

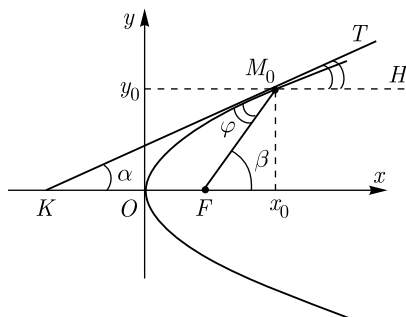


Рис. 6.27

Пусть луч света отражается от параболы в точке $M_0(x_0; y_0)$, где $y_0^2 = 2px_0$. Пусть далее KT — касательная к параболе в точке M_0 (рис. 6.27). Тогда

$$\angle FM_0K = \angle TM_0H =: \varphi.$$

Докажем, что эти углы равны еще и углу α , образованному касательной KT с положительным направлением оси Ox , т. е. $\varphi = \alpha$. Это будет означать, что луч M_0H параллелен оси Ox . Поскольку углы α и φ острые, то достаточно доказать равенство тангенсов этих углов. Пусть для определенности $y_0 > 0$. Имеем

$$\operatorname{tg} \alpha = y'(x_0), \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{y_0}{x_0 - \frac{p}{2}}.$$

Продифференцировав тождество $y^2(x) = 2px$, получим $2yy' = 2p$, откуда $\operatorname{tg} \alpha = y'_0 = \frac{p}{y_0}$ (здесь $y'_0 = y'(x_0)$). Учитывая, что $2x_0 = \frac{y_0^2}{p}$, находим $\operatorname{tg} \beta = \frac{2y_0}{\frac{y_0^2}{p} - p} = \frac{2y_0p}{y_0^2 - p^2}$.

Теперь с помощью формулы тангенса разности углов

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} |\beta - \alpha| = \left| \frac{\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha}{1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta} \right|$$

найдем тангенс угла φ :

$$\operatorname{tg} \varphi = \left| \frac{\frac{2y_0p}{y_0^2 - p^2} - \frac{p}{y_0}}{1 + \frac{2y_0p}{y_0^2 - p^2} \cdot \frac{p}{y_0}} \right| = \frac{p}{y_0} = \operatorname{tg} \alpha.$$

Отсюда следует, что $\varphi = \alpha$. Значит, лучи, отраженные от параболы, параллельны оси Ox .

Упражнения

1. Найдите полуоси, координаты фокусов, эксцентриситет, уравнения директрис эллипса $25x^2 + 169y^2 - 4225 = 0$, а также фокальные радиусы точек эллипса с абсциссой $x = 3$. Изобразите эллипс в канонической системе координат.

2. Постройте: а) гиперболу $25x^2 - 144y^2 - 3600 = 0$ и б) сопряженную к ней $25x^2 - 144y^2 + 3600 = 0$. Найдите полуоси, координаты фокусов, эксцентриситет, уравнения асимптот и уравнения директрис обеих гипербол.

3. Постройте параболы: а) $2y = x^2$; б) $2y = -x^2$; в) $2x = y^2$; г) $2x = -y^2$. Для каждой параболы найдите координаты фокуса и уравнение директрисы.

4. Напишите уравнения эллипса и его директрис, если: его фокусы лежат на оси ординат симметрично относительно начала координат; расстояния между фокусами и между директрисами равны соответственно 8 и 12,5.

5. Напишите уравнение гиперболы, зная уравнения ее асимптот $y = \pm \frac{4}{3}x$ и уравнения директрис $x = \pm 1,8$.

6. Напишите уравнение параболы и постройте ее, если известны ее фокус $F(7; 5)$ и уравнение директрисы $x - 3 = 0$.

7. Центр эллипса находится в точке $(3; 4)$, а один из его фокусов — в точке $(-1; 4)$; эксцентриситет эллипса равен 0,8. Напишите уравнения эллипса, его директрис и постройте эллипс в неканонической системе координат.

8. Эллипс, главные оси которого совпадают с координатными осями, проходит через точки $M_1(2; -\sqrt{2})$ и $M_2(1; \sqrt{7/2})$. Напишите его уравнение, найдите фокальные радиусы r_1, r_2 точки M_1 и расстояния d_1, d_2 от этой точки до директрис. Проверьте выполнение равенств $\frac{r_1}{d_1} = \frac{r_2}{d_2} = e$ для точки M_1 .

9. Одна из ветвей гиперболы, главные оси которой совпадают с координатными осями (Ox — фокальная ось гиперболы), проходит через точки $M_1(2\sqrt{3}; 2)$ и $M_2(2\sqrt{6}; 4)$. Напишите ее уравнение, найдите фокальные радиусы r_1, r_2 точки M_2 и расстояния d_1, d_2 от этой точки до директрис. Проверьте выполнение равенств $\frac{r_1}{d_1} = \frac{r_2}{d_2} = e$ для точки M_2 .

Ответы

1. $a = 13$, $b = 5$; $F_1(-12; 0)$, $F_2(12; 0)$; $e = \frac{12}{13}$; $D_1: x = -14\frac{1}{12}$, $D_2: x = 14\frac{1}{12}$; $r_1 = 15\frac{10}{13}$, $r_2 = 10\frac{3}{13}$ ($r_1 + r_2 = 26$).

2. а) $a = 12$, $b = 5$; $F_1(-13; 0)$, $F_2(13; 0)$; $e = 13/12$; асимптоты $y = \pm \frac{5}{12}x$; директрисы; б) $a = 5$, $b = 12$; $F_1(0; -13)$, $F_2(0; 13)$; $e = 2,6$; асимптоты $y = \pm \frac{5}{12}x$; директрисы $D_1: x = -\frac{25}{13}$, $D_2: x = \frac{25}{13}$.

3. а) $F(0; \frac{1}{2}; 0; \frac{1}{2})$, $D: y = -\frac{1}{2}$; б) $F(0; -\frac{1}{2})$, $D: y = \frac{1}{2}$;

в) $F(\frac{1}{2}; 0)$, $D: x = -\frac{1}{2}$; г) $F(\frac{1}{2}; 0)$, $D: x = \frac{1}{2}$.

4. $\frac{x^2}{9} + \frac{y^2}{25} = 1$, $D_1: y = -6,25$, $D_2: y = 6,25$.

5. $\frac{x^2}{9} - \frac{y^2}{16} = 1$. **6.** $y^2 - 10y - 8x + 55 = 0$ или $(y - 5)^2 = 8(x - 5)$.

7. $9x^2 + 25y^2 - 54x - 200y - 156 = 0$ или $\frac{(x-3)^2}{25} + \frac{(y-4)^2}{9} = 1$, $D_1: x = -3,25$, $D_2: x = 9,25$.

8. $\frac{x^2}{8} + \frac{y^2}{4} = 1$, $r_1 = 3\sqrt{2}$, $r_2 = \sqrt{2}$ ($r_1 + r_2 = 4\sqrt{2} = 2a$); $d_1 = 6$, $d_2 = 2$; $\frac{r_1}{d_1} = \frac{3\sqrt{2}}{6} = \frac{\sqrt{2}}{2}$, $\frac{r_2}{d_2} = \frac{\sqrt{2}}{2}$.

9. $\frac{x^2}{8} - \frac{y^2}{8} = 1$, $r_1 = 4\sqrt{3} + 2\sqrt{2}$, $r_2 = 4\sqrt{3} - 2\sqrt{2}$; $d_1 = 2(\sqrt{6} + 1)$, $d_2 = 2(\sqrt{6} - 1)$; $\frac{r_1}{d_1} = \frac{2\sqrt{2}(\sqrt{6} + 1)}{2(\sqrt{6} + 1)} = \sqrt{2}$, $\frac{r_2}{d_2} = \sqrt{2}$.

Глава 7

ПРИВЕДЕНИЕ ОБЩЕГО УРАВНЕНИЯ КРИВОЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА К КАНОНИЧЕСКОМУ ВИДУ

§ 52. Переход от одной аффинной системы координат к другой

Пусть на плоскости заданы две аффинные системы координат Oxy и $O'x'y'$, порожденные базисами $B = \langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2 \rangle$ и $B' = \langle \mathbf{e}'_1, \mathbf{e}'_2 \rangle$. Пусть, далее, M — некоторая точка на плоскости, $\overline{OM}$ и $\overline{O'M}$ — ее радиусы-векторы в системах координат Oxy и $O'x'y'$ соответственно (рис. 7.1).

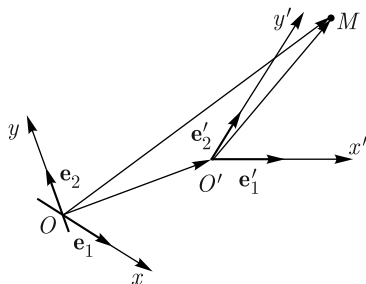


Рис. 7.1

Разложим векторы $\overline{OM}$ и $\overline{O'M}$ по базисам B и B' соответственно:

$$\overline{OM} = x_1 \mathbf{e}_1 + x_2 \mathbf{e}_2, \quad (7.1)$$

$$\overline{O'M} = x'_1 \mathbf{e}'_1 + x'_2 \mathbf{e}'_2, \quad (7.2)$$

или в векторной форме:

$$\overline{OM} = \mathbf{X}^\top \mathbf{E}, \quad \overline{O'M} = \mathbf{X}'^\top \mathbf{E}', \quad (7.3)$$

где $\mathbf{E} = \begin{pmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \end{pmatrix}$, $\mathbf{E}' = \begin{pmatrix} \mathbf{e}'_1 \\ \mathbf{e}'_2 \end{pmatrix}$, $\mathbf{X}^\top = (x_1 \ x_2)$. Здесь $\mathbf{E}$, $\mathbf{E}'$ — символические векторы (векторы-столбцы), компонентами которых являются векторы. Умножение арифметических векторов $\mathbf{X}^\top$ и $\mathbf{X}'^\top$

на символические векторы $\mathbf{E}$ и $\mathbf{E}'$ производится по стандартным правилам умножения вектора-строки на вектор-столбец.

Пусть x_1^0, x_2^0 — координаты начала системы координат $O'x'y'$ (точки O') в базисе B , т. е.

$$\overline{OO'} = x_1^0 \mathbf{e}_1 + x_2^0 \mathbf{e}_2, \quad (7.4)$$

или $\overline{OO'} = X^{0\top} \mathbf{E}$, где $X^{0\top} = (x_1^0 \ x_2^0)$.

Тройка векторов $\overline{OM}$, $\overline{O'M}$, $\overline{OO'}$, в соответствии с правилом треугольника для суммы векторов (рис. 7.1), связана равенством

$$\overline{OM} = \overline{OO'} + \overline{O'M}. \quad (7.5)$$

Напомним, что координаты векторов $\overline{OM}$ и $\overline{OO'}$ заданы в базисе B , а вектора $\overline{O'M}$ — в базисе B' . Установим связь между координатами $(x_1; x_2)$ точки M в базисе B и координатами $(x'_1; x'_2)$ этой точки в базисе B' .

Разложим каждый вектор базиса B' по базису B . Пусть

$$\begin{cases} \mathbf{e}'_1 = p_{11} \mathbf{e}_1 + p_{21} \mathbf{e}_2, \\ \mathbf{e}'_2 = p_{12} \mathbf{e}_1 + p_{22} \mathbf{e}_2, \end{cases} \quad (7.6)$$

или

$$\mathbf{E}' = \mathbf{P}^\top \mathbf{E}. \quad (7.7)$$

Матрица $\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{pmatrix}$ в формуле (7.7) называется *матрицей перехода* из базиса B в базис B' и потому иногда обозначается символом $\mathbf{P}_{B \rightarrow B'}$. Матрица $\mathbf{P}_{B \rightarrow B'}$ перехода из одного базиса в другой является невырожденной, поскольку векторы $\mathbf{e}'_1$ и $\mathbf{e}'_2$ линейно независимы.

Перепишем векторное равенство (7.5) в развернутой координатной форме. С учетом (7.1), (7.2), (7.4) и (7.6) получаем

$$x_1 \mathbf{e}_1 + x_2 \mathbf{e}_2 = x_1^0 \mathbf{e}_1 + x_2^0 \mathbf{e}_2 + x'_1 (p_{11} \mathbf{e}_1 + p_{21} \mathbf{e}_2) + x'_2 (p_{12} \mathbf{e}_1 + p_{22} \mathbf{e}_2),$$

или (группируем слагаемые в правой части)

$$x_1 \mathbf{e}_1 + x_2 \mathbf{e}_2 = (x_1^0 + p_{11} x'_1 + p_{12} x'_2) \mathbf{e}_1 + (x_2^0 + p_{21} x'_1 + p_{22} x'_2) \mathbf{e}_2.$$

Отсюда, с учетом единственности разложения вектора по базису, получаем

$$\begin{cases} x_1 = x_1^0 + p_{11} x'_1 + p_{12} x'_2, \\ x_2 = x_2^0 + p_{21} x'_1 + p_{22} x'_2, \end{cases} \quad (7.8)$$

или в матричной форме

$$\boxed{\mathbf{X} = \mathbf{X}^0 + \mathbf{P} \mathbf{X}'} \quad (7.9)$$

Формулы (7.8) или (7.9) устанавливают связь между координатами X и X' радиусов-векторов $\overline{OM}$ и $\overline{O'M}$ в базисах B и B' соответственно.

Вывод формулы (7.9) можно осуществить в матричной форме. Запишем векторное равенство (7.5) с учетом матричных аналогов формул (7.1), (7.2), (7.4) и (7.6)

$$X^T E = X^{0T} E + X'^T E' = \left| \text{так как } E' = P^T E \right| = \\ = X^{0T} E + X'^T P^T E,$$

или

$$X^T E = (X^{0T} + X'^T P^T) E.$$

Отсюда, с учетом единственности разложения вектора по базису, следует равенство

$$X^T = X^{0T} + X'^T P^T.$$

Выполнив транспонирование в обеих частях матричного равенства, получим

$$X = X^0 + P X',$$

а это искоемое матричное равенство (7.9).

Замечание. В современной литературе все операции с матрицами принято записывать в компактной матричной форме. Поэтому всюду ниже будем придерживаться такого способа записи матричных операций.

Вполне очевидно, что аналогичные (7.9) формулы будут связывать координаты точки M в различных базисах $B = \langle e_1, e_2, e_3 \rangle$ и $B' = \langle e'_1, e'_2, e'_3 \rangle$ и в пространстве $\mathbb{R}^3$. В этом случае: $X^T = (x_1 \ x_2 \ x_3)$, $X'^T = (x'_1 \ x'_2 \ x'_3)$,

$$P_{B \rightarrow B'} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{pmatrix}, \quad \begin{cases} x_1 = x_1^0 + p_{11}x'_1 + p_{12}x'_2 + p_{13}x'_3, \\ x_2 = x_2^0 + p_{21}x'_1 + p_{22}x'_2 + p_{23}x'_3, \\ x_3 = x_3^0 + p_{31}x'_1 + p_{32}x'_2 + p_{33}x'_3. \end{cases}$$

§ 53. Связь между координатами точки в различных прямоугольных системах координат

Сначала рассмотрим частный случай — новая декартова прямоугольная система координат $Ox'y'$ получается из старой системы Oxy поворотом последней вокруг общего начала O на некоторый угол α (рис. 7.2).

Пусть $B = \langle i, j \rangle$, $B' = \langle i', j' \rangle$ — базисы соответственно старой и новой систем координат. Найдем матрицу перехода из базиса B

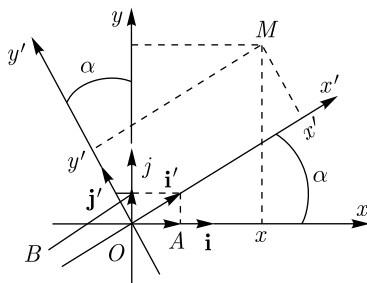


Рис. 7.2

в базис B' . Для этого разложим векторы $\mathbf{i}'$, $\mathbf{j}'$ нового базиса по старому (см. рис. 7.2):

$$\mathbf{i}' = \overline{OA} + \overline{OB} = \begin{cases} \overline{OA} = |\mathbf{i}'| \cdot \cos \alpha \cdot \mathbf{i} = \cos \alpha \cdot \mathbf{i}, \\ \overline{OB} = |\mathbf{j}'| \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \cdot \mathbf{j} = \sin \alpha \cdot \mathbf{j} \end{cases} = \cos \alpha \cdot \mathbf{i} + \sin \alpha \cdot \mathbf{j}.$$

Аналогично находим $\mathbf{j}' = -\sin \alpha \cdot \mathbf{i} + \cos \alpha \cdot \mathbf{j}$. Таким образом,

$$\mathbf{E}' = \begin{pmatrix} \mathbf{i}' \\ \mathbf{j}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{i} \\ \mathbf{j} \end{pmatrix},$$

т. е. $\mathbf{E}' = \mathbf{P}^\top \mathbf{E}$, где $\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$ — матрица перехода из базиса B в базис B' . Так как начала обеих систем координат Oxy и $Ox'y'$ в данном случае совпадают, то в формуле (7.9) $X^0 = O$ и потому

$$\mathbf{X} = \mathbf{P}\mathbf{X}', \quad (7.10)$$

или в координатной форме

$$\begin{cases} x = \cos \alpha \cdot x' - \sin \alpha \cdot y', \\ y = \sin \alpha \cdot x' + \cos \alpha \cdot y'. \end{cases} \quad (7.11)$$

Определитель матрицы $\mathbf{P}$ равен единице для любого значения угла α ($\det(\mathbf{P}) = \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha = 1$). Поскольку $\det(\mathbf{P}) \neq 0$, то существует обратная матрица $\mathbf{P}^{-1}$. Умножив обе части равенства (7.10) на $\mathbf{P}^{-1}$ слева, получим формулу обратного перехода от координат $(x; y)$ точки M в старом базисе к координатам $(x'; y')$ в новом базисе:

$$\mathbf{X}' = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{X}. \quad (7.12)$$

Легко установить, что $\mathbf{P}^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$, т. е. $\mathbf{P}^{-1} = \mathbf{P}^\top$.

Определение 7.1. Квадратная матрица $A_n, n \geq 2$, называется *ортогональной матрицей*, если транспонированная к ней матрица A_n^T совпадает с ее обратной, т. е. $A^{-1} = A^T$.

Значит, матрица перехода от ортонормированного базиса B к ортонормированному базису B' является ортогональной.

Если исходная система координат Oxy подвергается двум преобразованиям — повороту на некоторый угол α и параллельному переносу вдоль вектора $\vec{OO'}$ (рис. 7.3), то в соответствии с (7.9) в правой части каждой из двух формул (7.11) должно появиться еще одно слагаемое, соответственно x^0 или y^0 :

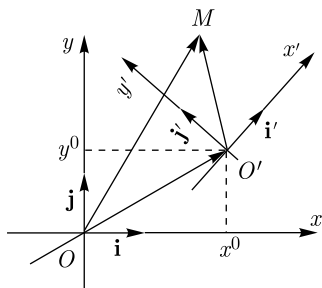


Рис. 7.3

$$\begin{cases} x = \cos \alpha \cdot x' - \sin \alpha \cdot y' + x^0, \\ y = \sin \alpha \cdot x' + \cos \alpha \cdot y' + y^0. \end{cases} \quad (7.13)$$

§ 54. Приведение общего уравнения кривой второго порядка к каноническому виду

54.1. Многообразие канонических уравнений

Мы уже знаем, что уравнения некоторых кривых второго порядка — эллипса, гиперболы и параболы — имеют лаконичную форму записи в выбранной должным образом, так называемой канонической, системе координат. Возникает несколько очевидных вопросов: можно ли с помощью стандартных преобразований системы координат на плоскости (параллельный перенос и поворот на заданный угол) добиться максимального упрощения записи общего уравнения (6.1) кривой второго порядка? Если да, то как найти эти преобразования, т. е. угол поворота α и координаты $(x^0; y^0)$ начала новой (канонической) системы координат? Другой вопрос: эллипс, гипербола и парабола исчерпывают всё множество алгебраических кривых второго порядка? Или существуют еще и другие линии, задаваемые общим уравнением (6.1)?

Ответы на эти вопросы начнем искать с анализа многообразия канонических уравнений кривых второго порядка. На следующем этапе мы выясним, что происходит с каноническим уравнением кривой при параллельном переносе канонической

системы координат и при ее повороте на некоторый угол α . Эти знания позволят нам затем сформулировать и доказать теоремы о таких преобразованиях системы координат Oxy , в которой записано общее уравнение кривой (6.1), чтобы в новой (преобразованной) системе координат уравнение этой кривой имело канонический вид.

Канонические уравнения эллипса (6.7) и гиперболы (6.14) получены из равносильных уравнений

$$b^2x^2 + a^2y^2 + (-a^2b^2) = 0 \quad \text{и} \quad b^2x^2 + (-a^2)y^2 + (-a^2b^2) = 0$$

соответственно. Эти уравнения можно объединить в одно:

$$\lambda_1x^2 + \lambda_2y^2 + \lambda_3 = 0. \quad (7.14)$$

Действительно, если $\lambda_1\lambda_2 > 0$, а $\lambda_3 < 0$, то легко видеть, что уравнение (7.14) определяет эллипс. Если же $\lambda_1\lambda_2 < 0$ и $\lambda_3 > 0$, то (7.14) — уравнение гиперболы. Если снять ограничение $\lambda_i \neq 0$, $i = 1, 2, 3$, на коэффициенты уравнения (7.14), но так, чтобы λ_1 и λ_2 не обращались одновременно в нуль, то уравнение (7.14) может определять и другие геометрические объекты. Так, например, при $\lambda_3 = 0$ и $\lambda_1\lambda_2 > 0$ получим уравнение

$$\lambda_1x^2 + \lambda_2y^2 = 0, \quad (7.15)$$

которое задает единственную точку $O(0;0)$. Если же $\lambda_1\lambda_2 > 0$ и при этом $\lambda_3 > 0$, то уравнение (7.14) задает пустое множество, которое, в связи с похожестью получающегося в этом случае уравнения

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = -1 \quad \left(a^2 = -\frac{\lambda_3}{\lambda_1}, b^2 = -\frac{\lambda_3}{\lambda_2} \right)$$

на уравнение эллипса, называют еще *мнимым эллипсом*.

Если в уравнении (7.15) $\lambda_1\lambda_2 < 0$, то оно определяет пару пересекающихся прямых:

$$a^2x^2 - b^2y^2 = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} ax - by = 0, \\ ax + by = 0. \end{cases} \quad (7.16)$$

Каноническое уравнение параболы не может быть получено из уравнения (7.14). Это означает, что общее уравнение кривой второго порядка может иметь в преобразованной должным образом системе координат не только форму (7.14), но и другие, например:

$$\lambda_1y^2 + \lambda_2x = 0, \quad \lambda_1x^2 + \lambda_2y = 0.$$

54.2. Приведение кривой второго порядка к каноническому виду

Сначала выясним, что происходит с общим уравнением кривой второго порядка при параллельном переносе системы координат. Это преобразование системы координат является наиболее простым. При параллельном переносе системы координат Oxy вдоль вектора $\overline{OO'}$ (рис. 7.4) координаты точки M в старой Oxy и новой $O'x'y'$ системах координат связаны соотношениями

$$\begin{cases} x = x_0 + x', \\ y = y_0 + y'. \end{cases}$$

Здесь $(x; y)$ и $(x'; y')$ — координаты точки M соответственно в старой системе координат Oxy и в новой $O'x'y'$.

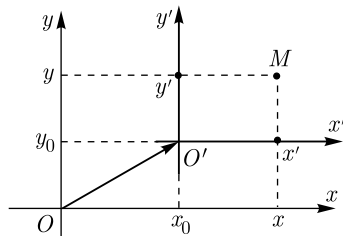


Рис. 7.4

Предположим, что новая система координат $O'x'y'$ является канонической для некоторой кривой, уравнение которой в этой системе координат имеет вид

$$\lambda_1 x'^2 + \lambda_2 y'^2 + \lambda_3 = 0. \quad (7.17)$$

Учитывая, что $x' = x - x_0$, $y' = y - y_0$, перейдем от уравнения (7.17) к уравнению в старых координатах x, y :

$$\lambda_1 (x - x_0)^2 + \lambda_2 (y - y_0)^2 + \lambda_3 = 0, \quad (7.18)$$

или

$$\lambda_1 x^2 + \lambda_2 y^2 - 2\lambda_1 x_0 x - 2\lambda_2 y_0 y + \lambda_1 x_0^2 + \lambda_2 y_0^2 + \lambda_3 = 0. \quad (7.19)$$

Отсюда следует, что если в общем уравнении кривой второго порядка (6.1) отсутствует слагаемое $2a_{12}xy$, то для приведения такого уравнения к каноническому виду достаточно осуществить параллельный перенос системы координат Oxy вдоль вектора $\overline{OO'}$ (рис. 7.4). С алгебраической точки зрения переход от уравнения (7.19) к (7.18) и затем к каноническому уравнению (7.17) осуществляется выделением полных квадратов по каждой переменной x и y . Проведенный анализ изменений уравнения кривой второго порядка при параллельном переносе системы координат позволяет сформулировать следующую теорему.

Теорема 7.1. *Неполное общее уравнение алгебраической кривой второго порядка*

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + 2a_{13}x + 2a_{23}y + a_{33} = 0, \quad a_{11}^2 + a_{22}^2 \neq 0, \quad (7.20)$$

не содержащее слагаемого с произведением $xу$, приводится к каноническому виду (7.17) параллельным переносом системы координат Oxy вдоль оси Ox на $x_0 = -\frac{a_{13}}{a_{11}}$ и вдоль оси Oy на $y_0 = -\frac{a_{23}}{a_{22}}$.

Доказательство. Для доказательства теоремы достаточно выделить полные квадраты по обоим переменным в уравнении (7.20):

$$a_{11} \left(x^2 + 2\frac{a_{13}}{a_{11}}x + \left(\frac{a_{13}}{a_{11}} \right)^2 \right) + a_{22} \left(y^2 + 2\frac{a_{23}}{a_{22}}y + \left(\frac{a_{23}}{a_{22}} \right)^2 \right) + a_{33} - \frac{a_{13}^2}{a_{11}} - \frac{a_{23}^2}{a_{22}} = 0,$$

или

$$a_{11} \left(x - \left(-\frac{a_{13}}{a_{11}} \right) \right)^2 + a_{22} \left(y - \left(-\frac{a_{23}}{a_{22}} \right) \right)^2 + \lambda_3 = 0,$$

где

$$\lambda_3 = a_{33} - \frac{a_{13}^2}{a_{11}} - \frac{a_{23}^2}{a_{22}}.$$

Обозначив

$$\lambda_1 = a_{11}, \quad \lambda_2 = a_{22}, \quad x_0 = -\frac{a_{13}}{a_{11}},$$

$$y_0 = -\frac{a_{23}}{a_{22}}, \quad x' = x - x_0, \quad y' = y - y_0,$$

получим каноническое уравнение (7.17):

$$\lambda_1 x'^2 + \lambda_2 y'^2 + \lambda_3 = 0. \quad \blacksquare$$

Замечание. При параллельном переносе системы координат коэффициенты при x^2 и y^2 не меняются. Действительно, в полученном в результате преобразований уравнении (7.17) $\lambda_1 = a_{11}$, $\lambda_2 = a_{22}$.

Допустим теперь, что уравнение (7.17) является каноническим в системе координат $Ox'y'$, полученной из старой системы Oxy поворотом последней вокруг O на угол α . В этом случае, как известно, связь между координатами $(x; y)$ и $(x'; y')$ произ-

вольной точки M , принадлежащей этой кривой, в новой и в старой системах координат устанавливается формулами (7.12):

$$\begin{cases} x' = \cos \alpha \cdot x + \sin \alpha \cdot y, \\ y' = -\sin \alpha \cdot x + \cos \alpha \cdot y. \end{cases}$$

Подставив правые части этих формул вместо x' и y' соответственно в уравнение (7.17), получим

$$\lambda_1(\cos \alpha \cdot x + \sin \alpha \cdot y)^2 + \lambda_2(-\sin \alpha \cdot x + \cos \alpha \cdot y)^2 + \lambda_3 = 0.$$

Легко видеть, что данное уравнение содержит только слагаемые со старшими (вторыми) степенями x^2 , xy , y^2 . Отсюда следует, что если общее уравнение (6.1) кривой второго порядка содержит слагаемое с произведением xy , то «избавиться» от него можно только с помощью поворота старой системы координат на некоторый угол α .

Пусть в системе координат Oxy уравнение кривой второго порядка имеет вид (6.1).

Теорема 7.2. *Для исключения из общего уравнения кривой второго порядка (6.1) слагаемого с произведением xy переменных достаточно повернуть систему координат Oxy вокруг начала координат на угол*

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctg \frac{2a_{12}}{a_{11} - a_{22}}. \quad (7.21)$$

Доказательство. Осуществим переход к новым координатам $(x'; y')$ в уравнении (6.1) по формулам (7.11):

$$\begin{aligned} & a_{11}(\cos \alpha \cdot x' - \sin \alpha \cdot y')^2 + 2a_{12}(\cos \alpha \cdot x' - \sin \alpha \cdot y') \times \\ & \quad \times (\sin \alpha \cdot x' + \cos \alpha \cdot y') + a_{22}(\sin \alpha \cdot x' + \cos \alpha \cdot y')^2 + \\ & + 2a_{13}(\cos \alpha \cdot x' - \sin \alpha \cdot y') + 2a_{23}(\sin \alpha \cdot x' + \cos \alpha \cdot y') + a_{33} = 0. \end{aligned}$$

Выполнив операции возведения в квадрат, умножения выражений в скобках и другие очевидные преобразования, получим в результате

$$\begin{aligned} & (a_{11} \cos^2 \alpha + a_{12} \cdot 2 \sin \alpha \cos \alpha + a_{22} \sin^2 \alpha) x'^2 + \\ & + (-a_{11} \cdot 2 \sin \alpha \cos \alpha + 2a_{12}(\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) + a_{22} \cdot 2 \sin \alpha \cos \alpha) x' y' + \\ & \quad + (a_{11} \sin^2 \alpha - a_{12} \cdot 2 \sin \alpha \cos \alpha + a_{22} \cos^2 \alpha) y'^2 + \\ & + 2(a_{13} \cos \alpha + a_{23} \sin \alpha) x' + 2(-a_{13} \sin \alpha + a_{23} \cos \alpha) y' + a_{33} = 0. \end{aligned} \quad (7.22)$$

Подберем угол α так, чтобы коэффициент при произведении $x'y'$ оказался равным нулю, т. е. из условия

$$(-a_{11} + a_{22}) \sin 2\alpha + 2a_{12} \cos 2\alpha = 0.$$

Отсюда $\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2a_{12}}{a_{11} - a_{22}}$ и соответственно

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2a_{12}}{a_{11} - a_{22}}.$$

Замечание. Формула (7.21) для угла α получена в результате решения уравнения

$$(a_{22} - a_{11}) \sin 2\alpha + 2a_{12} \cos 2\alpha = 0,$$

или, что то же самое,

$$2a_{12} \cos^2 \alpha - 2a_{12} \sin^2 \alpha + 2(a_{22} - a_{11}) \sin \alpha \cos \alpha = 0.$$

Это однородное относительно $\sin \alpha$ и $\cos \alpha$ уравнение второй степени. Его можно решать стандартным способом. Разделив обе части уравнения на $2 \cos^2 \alpha$, $\cos \alpha \neq 0$, получим квадратное уравнение относительно переменной $t = \operatorname{tg} \alpha$

$$a_{12}t^2 + (a_{22} - a_{11})t - a_{12} = 0.$$

Из двух возможных решений квадратного уравнения следует взять то, которое соответствует повороту на наименьший острый угол $\alpha \in \left(-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right)$.

Поворот системы координат Oxy на угол, вычисляемый по формуле (7.21), приведет к преобразованию уравнения (6.1) к виду

$$a'_{11}x'^2 + a'_{22}y'^2 + a'_{13}x' + a'_{23}y' + a'_{33} = 0, \quad (7.23)$$

где с учетом (7.22) имеем:

$$\begin{aligned} a'_{11} &= a_{11} \cos^2 \alpha + a_{12} \sin 2\alpha + a_{22} \sin^2 \alpha, \\ a'_{22} &= a_{11} \sin^2 \alpha - a_{12} \sin 2\alpha + a_{22} \cos^2 \alpha, \\ a'_{13} &= 2(a_{13} \cos \alpha + a_{23} \sin \alpha), \\ a'_{23} &= 2(-a_{13} \sin \alpha + a_{23} \cos \alpha), \\ a'_{33} &= a_{33}. \end{aligned}$$

Согласно теореме 7.1 уравнение (7.23) преобразуется к каноническому виду с помощью параллельного переноса системы координат.

Таким образом, в общем случае для приведения общего уравнения кривой второго порядка к каноническому виду следует выполнить последовательно два преобразования:

- *поворот системы координат Oxy на угол α , который находится по формуле (7.21) (переход к новой системе координат $Ox'y'$);*
- *параллельный перенос системы координат $Ox'y'$ (переход к новой системе координат $O'\tilde{x}\tilde{y}$).*

Рассмотрим несколько типовых примеров приведения уравнений кривых второго порядка, как неполных, так и полных, к каноническому виду.

Пример 7.1. Привести к каноническому виду и построить кривую, заданную уравнением

$$x^2 + 4y^2 - 8x + 24y + 36 = 0.$$

Решение. Это неполное уравнение кривой второго порядка (отсутствует слагаемое с xy). Поэтому для приведения данной кривой к каноническому виду достаточно осуществить параллельный перенос системы координат Oxy . Выделив полные квадраты по каждой переменной, получим

$$(x - 4)^2 + 4(y^2 + 6y + 9) + 36 - 16 - 36 = 0,$$

или

$$(x - 4)^2 + 4(y + 3)^2 - 16 = 0.$$

Это каноническое уравнение вида (7.17) с $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 4$, $\lambda_3 = -16$.

Обозначим

$$x' = x - 4, \quad y' = y + 3.$$

Тогда уравнение примет вид

$$x'^2 + 4y'^2 - 16 = 0,$$

или $\frac{x'^2}{16} + \frac{y'^2}{4} = 1$. Это каноническое уравнение эллипса с полуосями $a = 4$, $b = 2$, параметром $c = \sqrt{4^2 - 2^2} = 2\sqrt{3}$ и эксцентриситетом $e = \frac{2\sqrt{3}}{4} = \frac{\sqrt{3}}{2}$.

Начало новой системы координат $O'x'y'$ — точка $O'(4; -3)$. Искомый эллипс изображен на рис. 7.5. ■

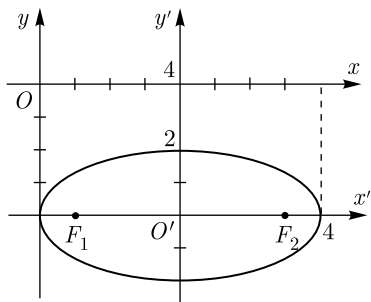


Рис. 7.5

Пример 7.2. Привести к каноническому виду и построить кривую, заданную уравнением

$$3x^2 + y^2 - 2\sqrt{3}xy + 12x + 12\sqrt{3}y = 0.$$

Решение. Исходное уравнение алгебраической кривой второго порядка содержит слагаемое $(-2\sqrt{3}xy)$ с произведением переменных x и y . В соответствии с теоремой 7.2 для приведения данного уравнения к каноническому виду достаточно повернуть систему координат Oxy на угол (формула (7.21))

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{-2\sqrt{3}}{3-1} = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} (-\sqrt{3}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3}\pi = \frac{\pi}{3}.$$

Осуществим, следуя формулам (7.11), переход к новым координатам x', y' :

$$\begin{cases} x = \cos \frac{\pi}{3} \cdot x' - \sin \frac{\pi}{3} \cdot y', \\ y = \sin \frac{\pi}{3} \cdot x' + \cos \frac{\pi}{3} \cdot y', \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} x = \frac{1}{2}x' - \frac{\sqrt{3}}{2}y', \\ y = \frac{\sqrt{3}}{2}x' + \frac{1}{2}y'. \end{cases} \quad (7.24)$$

Заменим в исходном уравнении переменные x и y по формулам (7.24):

$$\begin{aligned} & 3\left(\frac{1}{2}x' - \frac{\sqrt{3}}{2}y'\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}x' + \frac{1}{2}y'\right)^2 - 2\sqrt{3}\left(\frac{1}{2}x' - \frac{\sqrt{3}}{2}y'\right) \times \\ & \times \left(\frac{\sqrt{3}}{2}x' + \frac{1}{2}y'\right) + 12\left(\frac{1}{2}x' - \frac{\sqrt{3}}{2}y'\right) + 12\sqrt{3}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}x' + \frac{1}{2}y'\right) = 0, \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} & \frac{3}{4}(x'^2 - 2\sqrt{3}x'y' + 3y'^2) + \frac{1}{4}(3x'^2 + 2\sqrt{3}x'y' + y'^2) - \frac{\sqrt{3}}{3} \times \\ & \times (\sqrt{3}x'^2 - 2x'y' - \sqrt{3}y'^2) + 6x' - 6\sqrt{3}y' + 18x' + 6\sqrt{3}y' = 0. \end{aligned}$$

Выполнив очевидные тождественные преобразования, получим уравнение

$$y'^2 = -6x'.$$

Это каноническое уравнение параболы с параметром $p = 3$, фокусом в точке $F\left(-\frac{3}{2}; 0\right)$ и директрисой $D: x' = \frac{3}{2}$ (в системе координат $Ox'y'$) (рис. 7.6). Для нахождения координат фокуса

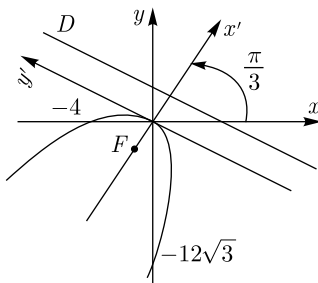


Рис. 7.6

и уравнения директрисы параболы в старой системе координат Oxy необходимо пересчитать их по формулам (7.24):

- координаты фокуса F :

$$x = \frac{1}{2} \left(-\frac{3}{2} \right) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 0 = -\frac{3}{4}, \quad y = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(-\frac{3}{2} \right) + \frac{1}{2} \cdot 0 = -\frac{3\sqrt{3}}{4};$$

- уравнение директрисы D : $y = -\frac{x}{\sqrt{3}} + \sqrt{3}$.

Координаты точек пересечения параболы с координатными осями найдем, приняв последовательно в исходном уравнении $x = 0$ и $y = 0$:

$$x = 0: y^2 + 12\sqrt{3}y = 0 \Leftrightarrow y = 0, \quad y = -12\sqrt{3};$$

$$y = 0: 3x^2 + 12x = 0 \Leftrightarrow x = 0, \quad x = -4. \quad \blacksquare$$

Пример 7.3. Исследовать кривую, заданную уравнением

$$7x^2 + 7y^2 - 50xy + 8\sqrt{2}x + 136\sqrt{2}y + 128 = 0.$$

Решение. Имеем полное уравнение алгебраической кривой второго порядка. Следуя общей схеме преобразования уравнения кривой второго порядка к каноническому виду, осуществим сначала поворот системы координат Oxy на угол α . В данном уравнении $a_{11} = a_{22} = 7$, $2a_{12} = -50$, поэтому по формуле (7.21) получаем $\alpha = \frac{1}{2} \arctg \frac{-50}{7-7}$, т. е. $\alpha = \frac{\pi}{4}$.

Теперь осуществим переход к новым координатам x' , y' по формулам (7.11):

$$\begin{cases} x = \frac{\sqrt{2}}{2}x' - \frac{\sqrt{2}}{2}y', \\ y = \frac{\sqrt{2}}{2}x' + \frac{\sqrt{2}}{2}y', \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} x = \frac{\sqrt{2}}{2}(x' - y'), \\ y = \frac{\sqrt{2}}{2}(x' + y'). \end{cases}$$

Подставив вместо x и y правые части этих соотношений в исходное уравнение, получим

$$\begin{aligned} \frac{7}{2}(x' - y')^2 + \frac{7}{2}(x' + y')^2 - 25(x' - y')(x' + y') + \\ + 8\sqrt{2}\frac{\sqrt{2}}{2}(x' - y') + 136\sqrt{2}\frac{\sqrt{2}}{2}(x' + y') + 128 = 0, \end{aligned}$$

или после очевидных преобразований

$$9x'^2 - 16y'^2 - 72x' - 64y' - 64 = 0.$$

Полученное в результате поворота системы координат Oxy на угол $\frac{\pi}{4}$ уравнение не содержит слагаемого с произведением $x'y'$.

Продолжим процесс упрощения уравнения. Теперь выделим полные квадраты по обоим переменным, что эквивалентно параллельному переносу системы координат $Ox'y'$ вдоль координатных осей Ox' и Oy' :

$$9(x'^2 - 8x' + 16) - 9 \cdot 16 - 16(y'^2 + 4y' + 4) + 64 - 64 = 0,$$

или

$$9(x' - 4)^2 - 16(y' + 2)^2 = 144.$$

Переобозначим $\tilde{x} = x' - 4$, $\tilde{y} = y' + 2$ и разделим обе части уравнения на 144. В итоге получим каноническое уравнение гиперболы

$$\frac{\tilde{x}^2}{16} - \frac{\tilde{y}^2}{9} = 1.$$

Исходное уравнение приведено к каноническому виду в результате пары последовательных преобразований системы координат Oxy . Сначала мы повернули эту систему координат на угол $\frac{\pi}{4}$. Затем выполнили параллельный перенос новой системы координат $Ox'y'$ на 4 вдоль оси Ox' и на 2 в направлении, противоположном направлению оси Oy' (рис. 7.7).

Параметры гиперболы: полуоси $a = 4$, $b = 3$; координаты фокусов (в системе координат $O'\tilde{x}\tilde{y}$) $F_1(-5; 0)$, $F_2(5; 0)$; эксцентриситет $e = 1,25$; уравнения директрис:

$$D_1: \tilde{x} = -3,2; \quad D_2: \tilde{x} = 3,2. \quad \blacksquare$$

Следующий пример отличается от рассмотренного примера 7.3 «нетабличным» значением угла, на который нужно повернуть исходную систему координат для приведения кривой к каноническому виду, и типом кривой, «скрывающейся» за общим уравнением.

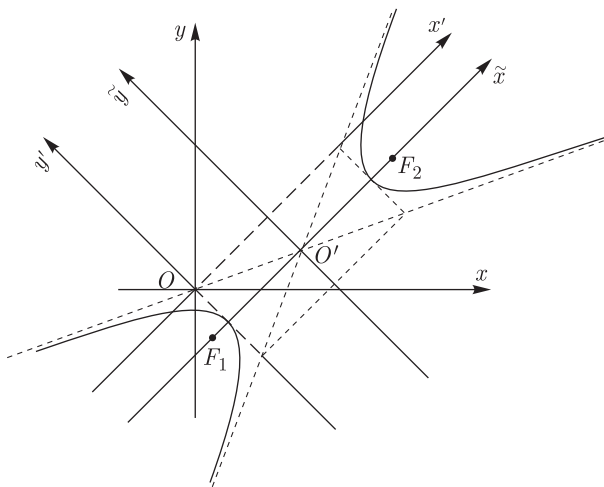


Рис. 7.7

Пример 7.4. Исследовать кривую, заданную уравнением

$$2x^2 + 23y^2 + 72xy - 240x - 70y - 25 = 0.$$

Решение. Как и в примере 7.3, имеем полное уравнение кривой второго порядка. Для приведения данного уравнения к каноническому виду необходимо выполнить последовательно поворот старой системы координат на соответствующий угол и затем параллельный перенос преобразованной системы координат.

Поворот системы координат Oxy необходимо осуществить по формуле (7.21) на угол (здесь $a_{11} = 2$, $a_{22} = 23$, $2a_{12} = 72$)

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{72}{2 - 23} = -\frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{24}{7}.$$

Очевидно, что угол $\alpha \in \left(-\frac{\pi}{2}; 0\right)$. Найдем значения $\cos \alpha$ и $\sin \alpha$, входящие в формулы (7.11) преобразования координат точки при повороте системы координат. Для этого воспользуемся формулами

$$\cos 2\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}, \quad \cos \alpha = \sqrt{\frac{1 + \cos 2\alpha}{2}},$$

$$\sin \alpha = -\sqrt{1 - \cos^2 \alpha}.$$

Поскольку в данном случае $2\alpha = -\operatorname{arctg} \frac{24}{7}$, то

$$\cos 2\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \left(\operatorname{arctg} \frac{24}{7} \right)}} = \frac{7}{25}, \quad \cos \alpha = \sqrt{\frac{1 + \frac{7}{25}}{2}} = \frac{4}{5},$$

$$\sin \alpha = -\sqrt{1 - \left(\frac{4}{5} \right)^2} = -\frac{3}{5}.$$

Здесь учтено, что в нашем случае $\sin \alpha < 0$.

Имея значения $\cos \alpha$ и $\sin \alpha$, перейдем к новым координатам x', y' по формулам (7.11):

$$\begin{cases} x = \frac{1}{5}(4x' + 3y'), \\ y = \frac{1}{5}(-3x' + 4y'). \end{cases}$$

Подставив правые части этих соотношений в исходное уравнение и выполнив несложные преобразования, получим уравнение кривой в системе координат $Ox'y'$

$$x'^2 - 2y'^2 + 6x' + 8y' + 1 = 0.$$

Выделим полные квадраты по обоим переменным:

$$(x' + 3)^2 - 2(y' - 2)^2 = 0, \quad \text{или} \quad \tilde{x}^2 - 2\tilde{y}^2 = 0.$$

Здесь $\tilde{x} = x' + 3$, $\tilde{y} = y' - 2$.

Полученное каноническое уравнение $\tilde{x}^2 - 2\tilde{y}^2 = 0$ (или, что то же самое, $(\tilde{x} - \sqrt{2}\tilde{y})(\tilde{x} + \sqrt{2}\tilde{y}) = 0$) является уравнением пары пересекающихся прямых:

$$L_1: \tilde{y} = \frac{\tilde{x}}{\sqrt{2}}, \quad L_2: \tilde{y} = -\frac{\tilde{x}}{\sqrt{2}}.$$

Подводя итог исследованию алгебраических кривых второго порядка, проведенному в рамках настоящей главы, и дополняя их некоторыми не рассмотренными частными случаями, можем сформулировать следующую теорему.

Теорема 7.3. Для любой алгебраической кривой второго порядка, заданной общим уравнением (6.1) в прямоугольной системе координат Oxy , существует прямоугольная каноническая система координат $O'\tilde{x}\tilde{y}$, в которой ее уравнение будет иметь один из следующих видов:

$$\lambda_1 \tilde{x}^2 + \lambda_2 \tilde{y}^2 + \lambda_3 = 0, \quad (7.25)$$

$$\lambda_1 \tilde{x}^2 + \lambda_2 \tilde{y} = 0 \quad (\lambda_1 \tilde{x} + \lambda_2 \tilde{y}^2 = 0), \quad (7.26)$$

$$\lambda_1 \tilde{x}^2 + \lambda_3 = 0 \quad (\lambda_2 \tilde{y}^2 + \lambda_3 = 0). \quad (7.27)$$

При этом тип кривой определяется следующим образом.

1) Уравнение (7.25) в зависимости от знаков и значений коэффициентов $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ будет определять:

а) кривые эллиптического вида, если $\lambda_1 \lambda_2 > 0$:

— эллипс ($\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 < 0$), $\frac{\tilde{x}^2}{a^2} + \frac{\tilde{y}^2}{b^2} = 1$;

— мнимый эллипс (пустое множество) ($\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 > 0$),

$$\frac{\tilde{x}^2}{a^2} + \frac{\tilde{y}^2}{b^2} = -1;$$

— точку ($\lambda_3 = 0$), $\lambda_1 \tilde{x}^2 + \lambda_2 \tilde{y}^2 = 0$;

б) кривые гиперболического вида, если $\lambda_1 \lambda_2 < 0$:

— гиперболу ($\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 > 0$), $\frac{\tilde{x}^2}{a^2} - \frac{\tilde{y}^2}{b^2} = 1$;

— пару пересекающихся прямых ($\lambda_3 = 0$), $\frac{\tilde{x}^2}{a^2} - \frac{\tilde{y}^2}{b^2} = 0$.

2) Уравнения (7.26) определяют кривые параболического типа $\tilde{y}^2 = 2p\tilde{x}$ или $\tilde{x}^2 = 2p\tilde{y}$.

3) Уравнения (7.27) определяют:

а) пару параллельных прямых, если $\lambda_1 \lambda_3 < 0$:

$$\tilde{x}^2 = a^2 \quad \text{или} \quad \tilde{y}^2 = b^2;$$

б) пустое множество (пару мнимых параллельных прямых), если $\lambda_1 \lambda_3 > 0$: $\tilde{x}^2 = -a^2$ или $\tilde{y}^2 = -b^2$.

в) прямую, если $\lambda_3 = 0$: $\tilde{x} = 0$ или $\tilde{y} = 0$.

Таким образом, общее уравнение алгебраической кривой второго порядка (6.1) может определять только одну из девяти названных в теореме 7.3 линий (реальных или мнимых): эллипс, мнимый эллипс, точку, гиперболу, пару пересекающихся прямых, параболу, пару параллельных прямых, пустое множество (пару мнимых параллельных прямых), прямую $\tilde{x} = 0$ или $\tilde{y} = 0$.

Вопросы для самоконтроля к гл. 7

1. Дайте определение матрицы перехода из одного базиса в другой. Каков содержательный смысл элементов p_{ij} матрицы перехода?

2. Какая матрица называется ортогональной матрицей? Является ли ортогональной матрица $\begin{pmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix}$ (см. пример 7.2)?

3. Для каких базисов B и B' матрица перехода $P_{B \rightarrow B'}$ является ортогональной?

4. Напишите в матричной и в координатной формах формулы, связывающие координаты $(x; y)$ и $(x'; y')$ точки M в различных, не обязательно ортогональных, базисах на плоскости.

5. Напишите матрицу перехода из базиса $B = \langle \mathbf{i}, \mathbf{j} \rangle$ в базис $B' = \langle \mathbf{i}', \mathbf{j}' \rangle$, который получен из базиса B поворотом последнего на угол α .

6. Перечислите все линии, которые могут задаваться в канонической системе координат уравнением $\lambda_1 x^2 + \lambda_2 y^2 + \lambda_3 = 0$. Напишите каноническое уравнение каждой такой линии.

7. Запишите формулу, позволяющую вычислить угол α , на который нужно повернуть систему координат для исключения из общего уравнения кривой второго порядка слагаемого с произведением $x \cdot y$ переменных. Найдите соответствующее значение α для уравнения $2x^2 + 23y^2 + 72xy - 6x + 9 = 0$.

Ответы и указания

3. Матрица перехода из одного ортонормированного базиса в другой ортонормированный базис является ортогональной.

4. Формулы (7.8), (7.9).

5. $P = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$.

6. См. теорему 7.3.

7. Формула (7.21).

Упражнения

Приведите уравнение к каноническому виду, постройте кривую и найдите ее основные параметры.

1. $x^2 + 2y^2 - 4x - 12y + 22 = 0$.

2. $x^2 - 9y^2 - 6x - 36y - 27 = 0$.

3. $x^2 - 6x - 6y - 15 = 0$.

4. $36x^2 + 9y^2 - 144x + 72y - 36 = 0$.
5. $x^2 - y^2 + 8x + 6y - 9 = 0$.
6. $2x^2 + y^2 + 12x + 4y + 38 = 0$.
7. $2x^2 + 2y^2 + 4xy - 6\sqrt{2}x + 10\sqrt{2}y - 8 = 0$.
8. $89x^2 + 116y^2 - 36xy - 92\sqrt{5}x - 296\sqrt{5}y - 780 = 0$.
9. $-7x^2 + 17y^2 + 18xy + 8\sqrt{10}x - 16\sqrt{10}y - 100 = 0$.

Ответы

1. $x'^2 + 2y'^2 = 0$, где $x' = x - 2$, $y' = y + 3$. Исходное уравнение определяет точку $M(2; -3)$.
2. $x'^2 - 9y'^2 = 0$, где $x' = x - 3$, $y' = y + 2$. Пара пересекающихся прямых: $x - 3y - 9 = 0$ и $x + 3y + 3 = 0$.
3. $x'^2 = 6y'$, где $x' = x - 3$, $y' = y + 4$. Парабола с параметром $p = 3$, вершиной в точке $A(3; -4)$, фокусом в точке $F(3; -1, 5)$ и директрисой $D: y = -5,5$ (значения всех параметров даны в системе координат Oxy).
4. $\frac{x'^2}{9} + \frac{y'^2}{36} = 1$, где $x' = x - 2$, $y' = y + 4$. Эллипс с полуосями $a = 3$, $b = 6$, параметром $c = 3\sqrt{3}$, эксцентриситетом $e = \frac{\sqrt{3}}{2}$, центром в точке $O'(2; -4)$.
5. $\frac{x'^2}{16} - \frac{y'^2}{16} = 1$, где $x' = x + 4$, $y' = y - 3$. Гипербола с равными действительной и мнимой полуосями $a = b = 4$, параметром $c = 4\sqrt{2}$, эксцентриситетом $e = \sqrt{2}$, центром в точке $O'(-4; 3)$, асимптотами $y = x + 7$ и $y = -x - 1$.
6. $\frac{x'^2}{8} + \frac{y'^2}{16} = -1$, где $x' = x + 3$, $y' = y + 2$. Мнимый эллипс.
7. $3\tilde{y} = -\tilde{x}^2$. Парабола с параметром $p = \frac{3}{2}$. Каноническим уравнение является в системе координат $O'\tilde{x}\tilde{y}$, которая получена из исходной Oxy в результате поворота ее на угол $\alpha = \frac{\pi}{4}$, затем новая система координат $Ox'y'$ перенесена параллельно оси Ox' на (-1) и параллельно оси Oy' — на 1 единицу, т. е. начало системы координат $O'\tilde{x}\tilde{y}$ находится в точке $O'(-1; 1)$.
8. $\frac{\tilde{x}^2}{25} + \frac{\tilde{y}^2}{16} = 1$, где $\tilde{x} = x' - 3$, $\tilde{y} = y' - 2$. Эллипс с полуосями $a = 5$, $b = 4$, параметром $c = 3$, эксцентриситетом $e = 0,6$. Каноническим уравнение данного эллипса является в системе координат $O'\tilde{x}\tilde{y}$, которая получена из исходной Oxy в результате

поворота ее на угол $\alpha = \operatorname{arctg} \frac{1}{2}$ и последующего переноса начала координат параллельно оси Ox' на 3 и параллельно оси Oy' на 2.

9. $\frac{\tilde{x}^2}{4} - \frac{\tilde{y}^2}{8} = 1$, где $\tilde{x} = x' - 1$, $\tilde{y} = y' + 2$. Гипербола с действительной полуосью $a = 2$, мнимой — $b = 2\sqrt{2}$, параметром $c = 2\sqrt{3}$, эксцентриситетом $e = \sqrt{3}$. Каноническим уравнение гиперболы является в системе координат $O'\tilde{x}\tilde{y}$, которая получена из исходной Oxy в результате поворота ее на угол $\alpha = \operatorname{arctg} 3$ и последующего переноса начала координат параллельно оси Ox' на 1 и параллельно оси Oy' на -2 .

Глава 8

АЛГЕБРАИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

§ 55. Общее и канонические уравнения поверхности

Определение 8.1. Алгебраической поверхностью второго порядка называется множество точек $\{M(x; y; z)\}$ пространства с координатами, удовлетворяющими уравнению (4.8):

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + 2Dxy + 2Exz + 2Fyz + 2Gx + 2Hy + 2Kz + L = 0,$$

коэффициенты которого удовлетворяют условию

$$A^2 + B^2 + C^2 + D^2 + E^2 + F^2 \neq 0.$$

Для целей анализа по аналогии с кривыми второго порядка данное общее уравнение поверхности целесообразно переписать в следующем виде (с индексированными коэффициентами):

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}xz + 2a_{23}yz + 2a_{14}x + 2a_{24}y + 2a_{34}z + a_{44} = 0. \quad (8.1)$$

Так же, как и для кривых второго порядка, левую часть уравнения (8.1) можно рассматривать как сумму квадратичной формы

$$h(x; y; z) = a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}xz + 2a_{23}yz \quad (8.2)$$

и линейной функции $g(x; y; z) = 2a_{14}x + 2a_{24}y + 2a_{34}z + a_{44}$.

Тип поверхности, задаваемой уравнением (8.1), определяется в первую очередь квадратичной формой (8.2).

Как уравнение (8.1), так и отвечающую ему квадратичную форму $h(x; y; z)$ можно записать в матричной форме:

- уравнение (8.1) в виде

$$X_1^\top A X_1 = 0,$$

$$\text{где } X_1^\top = (x \ y \ z \ 1), \ A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} & a_{34} \\ a_{14} & a_{24} & a_{34} & a_{44} \end{pmatrix};$$

- квадратичную форму

$$h(x; y; z) = X^\top A_0 X,$$

$$\text{где } X^\top = (x \ y \ z), \ A_0 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix}.$$

Алгебраические кривые второго порядка были изучены нами в два этапа. На первом этапе мы получили и затем исследовали канонические уравнения кривых (гл. 6). На втором этапе мы изучили способы приведения общего уравнения (6.1) кривой второго порядка к каноническому виду (гл. 7). При этом приведение уравнения (6.1) к каноническому виду выполнялось в общем случае с помощью двух последовательных преобразований системы координат на плоскости — поворота на некоторый угол и параллельного переноса системы координат вдоль вектора.

В классическом университетском курсе математики доказывается, что аналогичные преобразования декартовой прямоугольной системы координат $Oxyz$ в пространстве (параллельный перенос вдоль вектора и совокупность поворотов) позволяют максимально упростить уравнение (8.1) алгебраической поверхности. При этом сохраняется и общий вид формул для соответствующих преобразований.

Так, при параллельном переносе начала системы координат $Oxyz$ из точки $O(0; 0; 0)$ в точку $O'(x_0; y_0; z_0)$, старые $(x; y; z)$ и новые $(x'; y'; z')$ координаты точки M связаны соотношениями

$$\begin{cases} x = x' + x_0, \\ y = y' + y_0, \\ z = z' + z_0. \end{cases}$$

Для приведения к каноническому виду уравнения поверхности, содержащего слагаемые с произведениями xu , xz , yz переменных x , y , z , может потребоваться поворот системы координат $Oxyz$ относительно всех трех координатных осей на некоторые углы. В этом случае старые $(x; y; z)$ и новые $(x'; y'; z')$ координаты точки M связаны соотношениями

$$\begin{cases} x = \cos \alpha_1 x' + \cos \alpha_2 y' + \cos \alpha_3 z', \\ y = \cos \beta_1 x' + \cos \beta_2 y' + \cos \beta_3 z', \\ z = \cos \gamma_1 x' + \cos \gamma_2 y' + \cos \gamma_3 z'. \end{cases}$$

Здесь $\alpha_k, \beta_k, \gamma_k$ ($k = 1, 2, 3$) — углы, образованные координатными осями старой $Oxyz$ и новой $Ox'y'z'$ декартовых прямоугольных систем координат. Так,

$$\alpha_1 = (\widehat{Ox'}, \widehat{Ox}), \quad \beta_1 = (\widehat{Ox'}, \widehat{Oy}), \quad \gamma_1 = (\widehat{Ox'}, \widehat{Oz}).$$

Сформулируем без доказательства и в сокращенном виде теорему о множестве поверхностей, задаваемых уравнением (8.1).

Теорема 8.1. *Общее уравнение (8.1) в зависимости от значений коэффициентов a_{ij} в соответствующей канонической системе координат приводится к одному из следующих видов (8.3)–(8.11), причем каждое каноническое уравнение задает одну из следующих поверхностей:*

$$1) \text{ эллипсоид} \quad \boxed{\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1}; \quad (8.3)$$

$$2) \text{ однополостный гиперболоид} \quad \boxed{\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1}; \quad (8.4)$$

$$3) \text{ двуполостный гиперболоид} \quad \boxed{\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = -1}; \quad (8.5)$$

$$4) \text{ конус} \quad \boxed{\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 0}; \quad (8.6)$$

$$5) \text{ эллиптический параболоид} \quad \boxed{z = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}}; \quad (8.7)$$

$$6) \text{ гиперболический параболоид} \quad \boxed{z = \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}; \quad (8.8)$$

$$7) \text{ эллиптический цилиндр} \quad \boxed{\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1}; \quad (8.9)$$

$$8) \text{ гиперболический цилиндр} \quad \boxed{\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1}; \quad (8.10)$$

$$9) \text{ параболический цилиндр} \quad \boxed{y^2 = 2px}. \quad (8.11)$$

В этот список не включены случаи, когда поверхность является вырожденной. Уравнение (8.1) в таких случаях определяет мнимую поверхность, например: $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \left(-\frac{z^2}{c^2}\right) = -1$ — мнимый эллипсоид. Не включены в этот список и реальные поверхности в виде, например, пары пересекающихся плоскостей: $\left(\frac{x}{a} - \frac{y}{b}\right)\left(\frac{x}{a} + \frac{y}{b}\right) = 0$.

В прикладных задачах, в частности, в задачах математического анализа приходится по уравнению поверхности определять ее тип и основные параметры. Например, требуется определить: какая поверхность задается уравнениями

$$z = -1 - \frac{3}{2}\sqrt{x^2 + 4y^2 - 4x + 4}, \quad z = -5?$$

Ниже будет показано, что это конус с вершиной в точке $(2; 0; -1)$ и основанием в виде эллипса с полуосями $a = \frac{8}{3}$, $b = \frac{4}{3}$, лежащего в плоскости $z = -5$.

Одним из основных методов исследования уравнения поверхности, с целью восстановления задаваемой им геометрической фигуры, является *метод сечений*.

Суть метода сечений заключается в изучении линий, которые получаются в результате сечения исследуемой поверхности плоскостями, параллельными координатным плоскостям.

Применим этот метод к изучению поверхностей, перечисленных в теореме.

§ 56. Исследование поверхностей методом сечений

56.1. Эллипсоид

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$$

1. Непосредственно из канонического уравнения эллипсоида (8.3) следует, что $|x| \leq a$, $|y| \leq b$, $|z| \leq c$. Это означает, что эллипсоид является ограниченной поверхностью, расположенной в прямоугольном параллелепипеде G с ребрами $2a$, $2b$, $2c$, параллельными координатным осям Ox , Oy и Oz соответственно.

2. Эллипсоид симметричен относительно всех координатных плоскостей и, значит, центрально-симметричен.

3. Покажем, что сечения эллипсоида плоскостями $z = h$, $|h| < c$; $x = h$, $|h| < a$; $y = h$, $|h| < b$, являются эллипсами с полуосями, зависящими от значения h .

Исследуем сечения эллипсоида плоскостями $z = h$, $|h| \leq c$. Если $h = \pm c$, то из (8.3) имеем $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 - \frac{c^2}{c^2}$, или $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 0$ — это уравнение оси Oz , которое при $z = \pm h$ даст точки $(0; 0; \pm c)$. Отсюда следует, что эллипсоид касается граней $z = c$ и $z = -c$ параллелепипеда G в точках $(0; 0; c)$ и $(0; 0; -c)$ соответственно. Если $|h| < c$, то

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 - \frac{h^2}{c^2}, \quad (8.12)$$

где $1 - \frac{h^2}{c^2} > 0$. Обозначим $d^2 = 1 - \frac{h^2}{c^2}$, $0 < d \leq 1$. Тогда уравнение (8.12) можно записать так:

$$\frac{x^2}{(ad)^2} + \frac{y^2}{(bd)^2} = 1,$$

а это уравнение эллиптического цилиндра, которое в сечениях $z = \pm h$ даст уравнение эллипса с полуосями $a' = ad \leq a$ и $b' = bd \leq b$, лежащего в плоскости $z = h$.

В частности, если $h = 0$, т. е. сечение эллипсоида осуществляется плоскостью $z = 0$, то получаем уравнение эллипса $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$, лежащего в плоскости Oxy ($z = 0$).

Проекции части эллипсов из плоскостей $z = h$ ($0 \leq |h| < c$) на плоскость Oxy изображены на рис. 8.1. Аналогичные эллипсы получаются в сечениях эллипсоида плоскостями, параллельными плоскостям Oxz или Oyz .

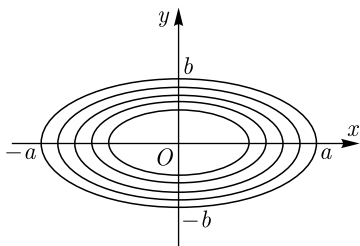


Рис. 8.1

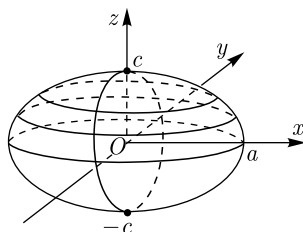


Рис. 8.2

Нетрудно восстановить поверхность эллипсоида по полученным сечениям (рис. 8.2).

Точки $(a; 0; 0)$, $(-a; 0; 0)$, $(0; -b; 0)$, $(0; b; 0)$, $(0; 0; -c)$, $(0; 0; c)$ называются *вершинами* эллипсоида.

56.2. Однополостный гиперболоид

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$$

1. Однополостный гиперболоид, так же как и эллипсоид, симметричен относительно всех координатных плоскостей и центрально-симметричен относительно начала координат. Ось Oz является осью симметрии.

2. Однополостный гиперболоид является неограниченной поверхностью.

3. В отличие от эллипсоида однополостный гиперболоид обладает большим разнообразием кривых, получающихся в сечениях гиперболоида плоскостями, параллельными координатным плоскостям.

Исследуем эти сечения подробнее.

а) В сечениях однополостного гиперболоида плоскостями $z = h$, $h \in \mathbb{R}$, получаются эллипсы

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 + \frac{h^2}{c^2}$$

с полуосями $a' = ad$, $b' = bd$, где $d = \sqrt{1 + \frac{h^2}{c^2}} \geq 1$. При изменении $|h|$ от 0 до $+\infty$ полуоси a' и b' изменяются соответственно от $a' = a$ и $b' = b$ до $+\infty$. При $h = 0$ в сечении получается так называемый *горловой эллипс* $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ однополостного гиперболоида.

б) Исследуем сечения однополостного гиперболоида плоскостями $x = h$ и $y = h$. Пусть $x = h$. Тогда уравнение (8.4) преобразуется к виду

$$\frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1 - \frac{h^2}{a^2}. \quad (8.13)$$

Далее:

— если $|h| < a$, то $1 - \frac{h^2}{a^2} > 0$; обозначив $1 - \frac{h^2}{a^2} = d^2$, преобразуем уравнение (8.13) к виду

$$\frac{y^2}{(bd)^2} - \frac{z^2}{(cd)^2} = 1, \quad (8.14)$$

а это (при фиксированном x) есть уравнение гиперболы с действительной полуосью $b' = bd \leq b$ и мнимой полуосью $c' = cd \leq c$;

— если $|h| = a$, то уравнение (8.13) будет определять пару пересекающихся прямых;

— если $|h| > a$, то $1 - \frac{h^2}{a^2} < 0$.

Обозначим $1 - \frac{h^2}{a^2} = -d^2$ и разделим обе части уравнения (8.13) на $-d^2$. Получим уравнение гиперболы

$$\frac{z^2}{(cd)^2} - \frac{y^2}{(bd)^2} = 1 \quad (8.15)$$

с действительной полуосью $c' = cd$ и мнимой $b' = bd$.

Гипербола (8.14) и (8.15) при равном значении d являются сопряженными друг другу. Прямые (асимптоты)

$$z = \frac{c}{b}y \quad \text{и} \quad z = -\frac{c}{b}y$$

отделяют гипербола одного семейства (8.14) от другого (8.15) (рис. 8.3).

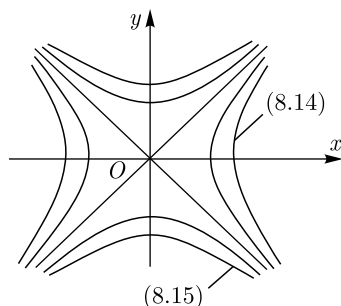


Рис. 8.3

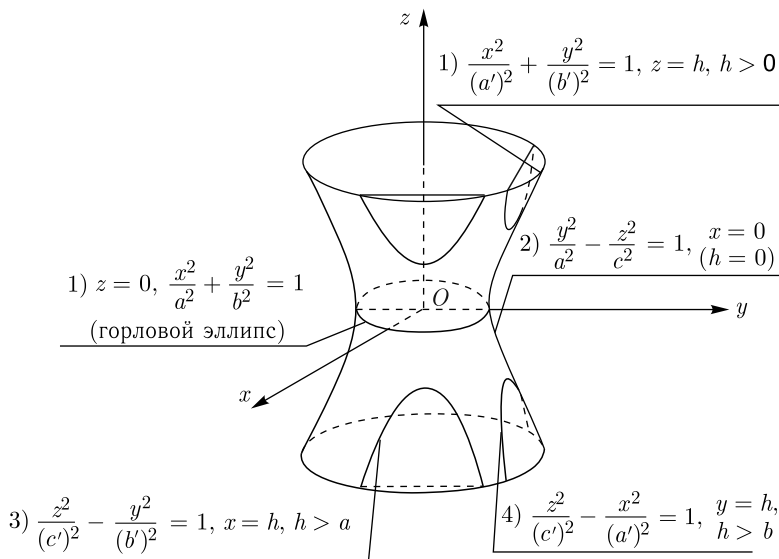


Рис. 8.4

Аналогичные гиперболы получаются и в сечении однополостного гиперboloида плоскостями $y = h$:

$$\frac{z^2}{(c')^2} - \frac{x^2}{(a')^2} = 1, \quad \text{где } c' = cd, \quad a' = ad, \quad d^2 = \left| 1 - \frac{h^2}{b^2} \right|.$$

На рис. 8.4 изображены сечения однополостного гиперboloида различными плоскостями: $x = 0$; $z = 0$; $z = h$; $y = h$; $x = h$.

Частными случаями однополостного гиперboloида являются однополостные гиперboloиды вращения. Если осуществить вращение ветви гиперболы $\frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$ вокруг оси Oz , то получится однополостный гиперboloид вращения

$$\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1.$$

56.3. Двуполостный гиперboloид

$$\boxed{\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = -1}$$

1. Двуполостный гиперboloид симметричен относительно всех координатных плоскостей и относительно начала координат. Ось Oz является осью симметрии.

2. Двуполостный гиперboloид является неограниченной поверхностью.

3. Двуполостный гиперboloид имеет две вершины $C_1(0; 0; -c)$ и $C_2(0; 0; c)$.

4. В слое $-c < z < c$, $x \in \mathbb{R}$, $y \in \mathbb{R}$, нет точек двуполостного гиперboloида, поскольку не имеет действительных решений система уравнений

$$\begin{cases} \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = -1 + \frac{z^2}{c^2}, \\ z = h, \quad |h| < c. \end{cases}$$

5. Двуполостный гиперboloид имеет две части поверхности, расположенные симметрично относительно плоскости Oxy .

Действительно, в сечениях двуполостного гиперboloида плоскостями $z = \pm h$, $h > c$, получаются эллипсы $\frac{x^2}{(ad)^2} + \frac{y^2}{(bd)^2} = 1$, где $d = \sqrt{\frac{h^2}{c^2} - 1}$. При изменении $|h|$ от c до $+\infty$ полуоси эллипса $a' = ad$ и $b' = bd$ изменяются соответственно от $a' = 0$ до $a' = +\infty$ и от $b' = 0$ до $b' = +\infty$ (при $a' = 0$,

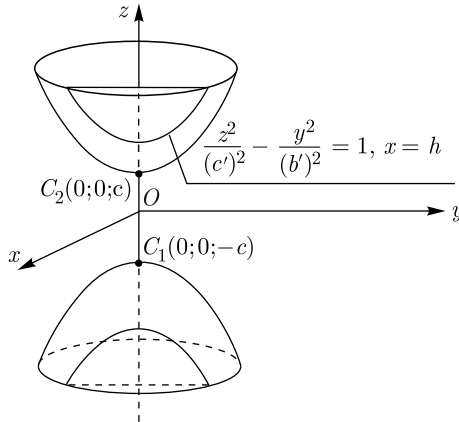


Рис. 8.5

$b' = 0$, т. е. при $h = \pm c$ эллипс вырождается в точку — вершину двуполостного гиперboloида).

В сечениях двуполостного гиперboloида плоскостями $x = h$ и $y = h$ получаются гиперболы. Так, если $x = h$, то уравнение (8.5) принимает следующий вид:

$$\frac{z^2}{c^2} - \frac{y^2}{b^2} = \frac{h^2}{a^2} + 1,$$

а это — уравнение гиперболы с действительной полуосью $c' = cd$, параллельной оси Oz , и мнимой полуосью $b' = bd$, параллельной оси Oy (рис. 8.5). Здесь $d = \sqrt{1 + \frac{h^2}{a^2}}$.

Двуполостный гиперboloид вращения

$$\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = -1$$

может быть получен в результате вращения ветви гиперболы

$$\frac{z^2}{c^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$$

вокруг оси Oz .

56.4. Конус (коническая поверхность)

$$\boxed{\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 0}$$

1. Конус симметричен относительно всех трех координатных плоскостей, начало координат является центром симметрии.

2. Конус является неограниченной поверхностью.
3. Конус имеет одну вершину — начало системы координат.
4. Поверхность конуса образована прямыми, проходящими через начало координат.

Действительно, если конусу принадлежит точка $M_0(x_0; y_0; z_0)$ и

$$L: \frac{x - x_0}{x_0 - 0} = \frac{y - y_0}{y_0 - 0} = \frac{z - z_0}{z_0 - 0}$$

— прямая, проходящая через начало координат и точку $M_0(x_0; y_0; z_0)$, то любая точка $M(x; y; z)$, где $x = x_0 + tx_0$, $y = y_0 + ty_0$, $z = z_0 + tz_0$, этой прямой также принадлежит конусу:

$$\begin{aligned} \frac{((1+t)x_0)^2}{a^2} + \frac{((1+t)y_0)^2}{b^2} - \frac{((1+t)z_0)^2}{c^2} &= \\ &= (1+t)^2 \left(\frac{x_0^2}{a^2} + \frac{y_0^2}{b^2} - \frac{z_0^2}{c^2} \right) = 0. \end{aligned}$$

5. В сечении конуса плоскостями $z = h$, параллельными плоскости Oxy , получаются эллипсы:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = \frac{h^2}{c^2} \Leftrightarrow \frac{x^2}{a'^2} + \frac{y^2}{b'^2} = 1,$$

где $a' = a \frac{h}{c}$; $b' = b \frac{h}{c}$. С увеличением h от 0 до $+\infty$ полуоси a' и b' также изменяются от 0 до $+\infty$.

В сечении конуса плоскостями $x = h$ и $y = h$, $h \neq 0$, получаются гиперболы.

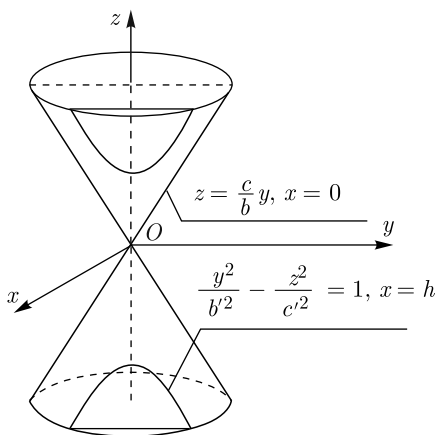


Рис. 8.6

Пусть $x = h$, $h \neq 0$, тогда $\frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = \frac{h^2}{a^2}$ — уравнение гиперболы, лежащей в плоскости $x = h$, с действительной полуосью $b' = b\frac{h}{a}$, параллельной оси Oy , и мнимой $c' = c\frac{h}{a}$, параллельной оси Oz (рис. 8.6).

56.5. Эллиптический параболоид

$$z = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}.$$

1. Эллиптический параболоид симметричен относительно плоскостей Oxz и Oyz . Начало координат является вершиной эллиптического параболоида.

2. Эллиптический параболоид расположен в полупространстве $z \geq 0$.

Действительно, $z = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} \geq 0$ для всех $(x; y) \in \mathbb{R}^2$.

3. Ось Oz — ось симметрии эллиптического параболоида.

4. Название поверхности (8.7) обусловлено тем, что в сечениях плоскостями $z = h$, $h > 0$, получаются эллипсы $\frac{x^2}{a'^2} + \frac{y^2}{b'^2} = 1$ с полуосями $a' = a\sqrt{h}$, $b' = b\sqrt{h}$, а в сечениях плоскостями $x = h$ и $y = h$ — параболы.

Если $x = h$, $h \geq 0$, то из (8.7) получаем $z = \frac{h^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}$, а это уравнение параболы, лежащей в плоскости $x = h$ и сдвинутой вдоль оси Oy на $\frac{h^2}{a^2}$ вверх (рис. 8.7).

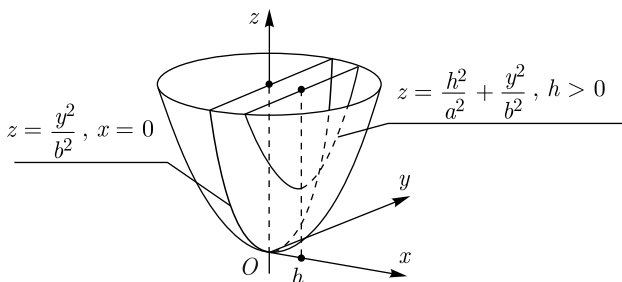


Рис. 8.7

Если в уравнении (8.7) $b = a$, то имеем круговой параболоид вращения $z = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2}$. Он может рассматриваться как результат вращения параболы $z = \frac{x^2}{a^2}$ или $z = \frac{y^2}{a^2}$ вокруг оси Oz .

56.6. Гиперболический параболоид

$$z = \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}.$$

Поверхность гиперболического параболоида обладает характеристиками, которые играют важную роль в теории экстремальных задач. Непосредственно из уравнения (8.8) получаются следующие результаты.

1. Гиперболический параболоид симметричен относительно плоскостей Oxz и Oyz . (Начало координат называется *вершиной* гиперболического параболоида.)

2. Гиперболический параболоид является неограниченной поверхностью.

3. Сечения гиперболического параболоида имеют более сложную структуру по сравнению с эллиптическим параболоидом. Исследуем их.

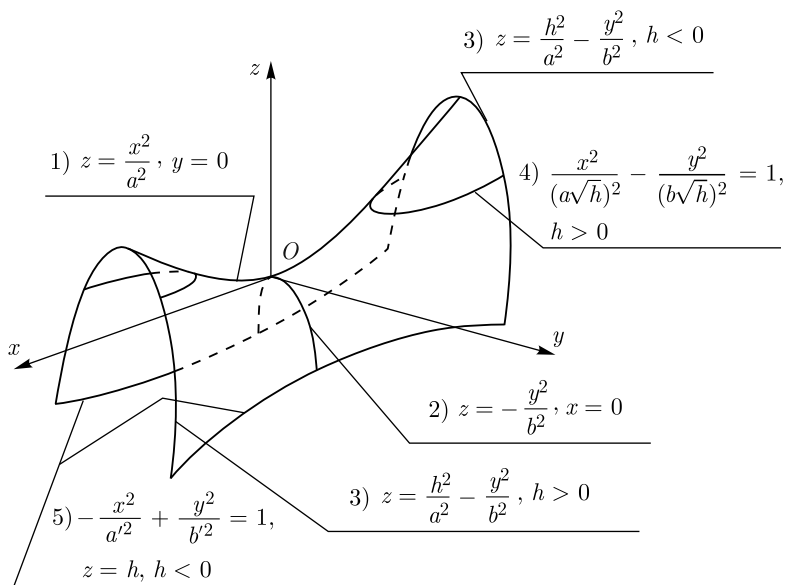


Рис. 8.8

Плоскость $y = 0$ пересекает поверхность гиперболического параболоида по параболе 1) $z = \frac{x^2}{a^2}$, ветви которой направлены вверх. В сечениях плоскостями $y = h$, $h \neq 0$, также получаются параболы $z = \frac{x^2}{a^2} - \frac{h^2}{b^2}$ с вершиной в точке $(0; h; -\frac{h^2}{b^2})$ и ветвями, направленными вверх.

В сечениях гиперболического параболоида плоскостями $x = h$ также получаются параболы: 2) $z = -\frac{y^2}{b^2}$ при $h = 0$ и 3) $z = \frac{x^2}{a^2} - \frac{h^2}{b^2}$ при $|h| \geq 0$. Вершины этих парабол лежат на параболе $z = -\frac{y^2}{b^2}$, а их ветви направлены вниз (рис. 8.8).

Сечения гиперболического параболоида плоскостями $z = h$ определяют два семейства гипербол при $h \neq 0$:

$$4) \frac{x^2}{(a\sqrt{h})^2} - \frac{y^2}{(b\sqrt{h})^2} = 1 \text{ при } h > 0;$$

5) $\frac{y^2}{(b\sqrt{-h})^2} - \frac{x^2}{(a\sqrt{-h})^2} = 1$ при $h < 0$. В сечении плоскостью $z = 0$ получаются две пересекающиеся прямые

$$\left(\frac{x}{a} - \frac{y}{b}\right) \left(\frac{x}{a} + \frac{y}{b}\right) = 0, \quad \text{или} \quad y = \frac{b}{a}x \quad \text{и} \quad y = -\frac{b}{a}x.$$

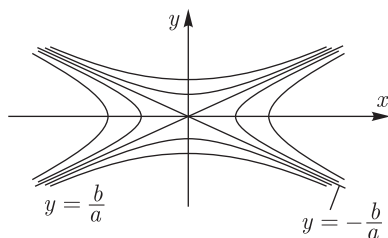


Рис. 8.9

Эти прямые разделяют два семейства гипербол (в проекции этих гипербол на плоскость Oxy) (рис. 8.9).

56.7. Цилиндрические поверхности

Пусть на плоскости Oxy задана некоторая кривая Γ : $f(x; y) = 0$, замкнутая или нет. Возьмем произвольную точку $M(x; y)$ на Γ и проведем через нее прямую L перпендикулярно плоскости Oxy . Будем перемещать прямую L по кривой Γ , сохраняя ее перпендикулярность плоскости Oxy . При перемещении

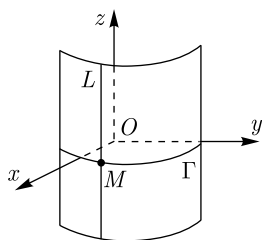


Рис. 8.10

прямой L вдоль кривой Γ образуется некоторая поверхность S . Она называется *цилиндрической поверхностью* (рис. 8.10). При этом кривая Γ называется *направляющей*, а прямая L — *образующей*.

Если в качестве направляющей (кривая Γ) на плоскости Oxy выступает одна из трех алгебраических кривых второго порядка: эллипс, гипербола или парабола, то и поверхность S называется соответственно эллиптическим, гиперболическим или параболическим цилиндром.

56.7.1. Эллиптический цилиндр $S: \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ (рис. 8.11). Если $b = a$, то получаем круговой цилиндр.

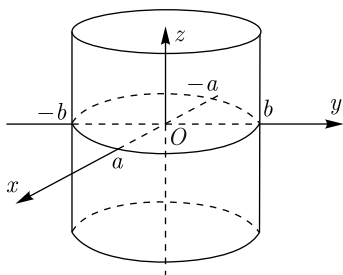


Рис. 8.11

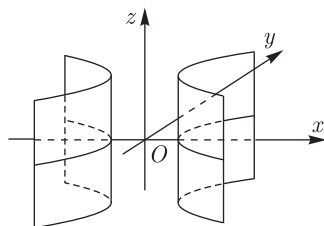


Рис. 8.12

56.7.2. Гиперболический цилиндр $S: \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$ (рис. 8.12).

56.7.3. Параболический цилиндр $S: y^2 = 2px, p > 0$ (рис. 8.13).

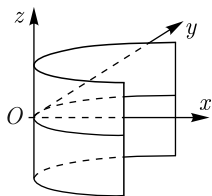


Рис. 8.13

Пример 8.1. Определить тип поверхности, задаваемой уравнением $9x^2 - 8y^2 + 9z^2 + 48y + 18z - 99 = 0$.

Решение. Уравнение не содержит произведений переменных, поэтому для приведения уравнения к каноническому виду достаточно выделить полные квадраты по каждой переменной. Имеем:

$$9x^2 - 8(y^2 - 6y + 9) + 72 + 9(z^2 + 2z + 1) - 9 - 99 = 0,$$

$$9x^2 - 8(y - 3)^2 + 9(z + 1)^2 - 36 = 0,$$

$$\frac{x^2}{4} - \frac{(y-3)^2}{\frac{9}{2}} + \frac{(z+1)^2}{4} = 1.$$

Обозначим $x' = x$, $y' = y - 3$, $z' = z + 1$. Тогда уравнение примет вид

$$\frac{x'^2}{4} - \frac{y'^2}{\frac{9}{2}} + \frac{z'^2}{4} = 1.$$

Это уравнение однополостного гиперболоида с осью симметрии $O'y'$, где $O'(0; 3; -1)$ — начало новой канонической системы координат $O'x'y'z'$ (рис. 8.14). ■

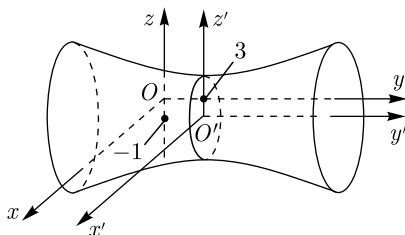


Рис. 8.14

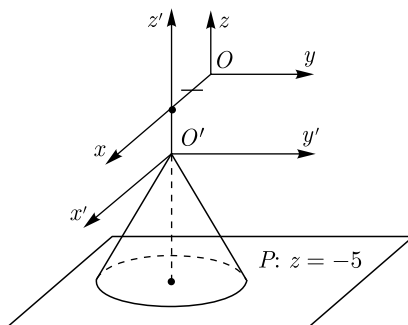


Рис. 8.15

Пример 8.2. Определить тип поверхности, задаваемой уравнениями

$$z = -1 - \frac{3}{2}\sqrt{x^2 + 4y^2 - 4x + 4}, \quad z = -5.$$

Решение. Из первого уравнения следует, что $z \leq -1$ для всех допустимых значений переменных x и y . Выполним следующие тождественные преобразования:

$$z + 1 = -\frac{3}{2}\sqrt{(x-2)^2 + 4y^2}.$$

Возведем обе части равенства в квадрат:

$$(z+1)^2 = \frac{9}{4}((x-2)^2 + 4y^2),$$

или

$$\frac{(x-2)^2}{\frac{4}{9}} + \frac{y^2}{\frac{1}{9}} - (z+1)^2 = 0.$$

Это уравнение определяет конус с вершиной в точке $(2; 0; -1)$ и осью симметрии L , где L — прямая $\frac{x-2}{0} = \frac{y}{0} = \frac{z+1}{1}$.

Исходные уравнения задают конус с вершиной в точке $O'(2; 0; -1)$, основанием которого служит эллипс с полуосями $a = \frac{8}{3}$, $b = \frac{4}{3}$, лежащий в плоскости $P: z = -5$ (рис. 8.15). ■

Упражнения

1. Напишите уравнение эллипсоида с полуосями $a = 5$, $b = 3$, $c = 4$ и с центром в точке $(3; 0; 4)$. Изобразите поверхность.

2. Напишите уравнение сферы с центром в точке $M_0(2; -1; 3)$ и радиусом 2. Изобразите поверхность.

3. Определите для каждого допустимого значения параметра λ тип поверхности:

а) $x^2 + \lambda y^2 + z^2 = 1$; в) $\lambda x^2 + y^2 + \lambda z = 0$;

б) $\lambda x^2 + y^2 + z^2 = \lambda$; г) $x^2 - y^2 + z^2 = \lambda$.

4. Напишите уравнения поверхностей, которые получаются при вращении гиперболы $9x^2 - 16y^2 - 144 = 0$: а) вокруг оси Ox ; б) вокруг оси Oy . Изобразите эти поверхности.

5. Определите тип поверхности

$$x^2 + y^2 + z^2 - 6x + 2y - 8z + 1 = 0,$$

координаты вершин и укажите ось симметрии. Изобразите поверхность в исходной системе координат.

6. Определите тип поверхности $9x^2 + 4z^2 + 36y - 72 = 0$, найдите координаты вершины и изобразите поверхность в исходной системе координат.

7. Определите тип поверхности

$$9z^2 - 4y^2 - 36x - 8y - 54z + 149 = 0,$$

найдите координаты вершины, укажите ось симметрии и изобразите поверхность в исходной системе координат.

8. Определите тип поверхности

$$9x^2 - 4y^2 + 18z^2 + 18x + 16y + 108z + 119 = 0,$$

найдите координаты центра, укажите ось симметрии и изобразите поверхность в исходной системе координат.

Ответы

1. $\frac{(x-3)^2}{25} + \frac{y^2}{9} + \frac{(z-4)^2}{16} = 1.$

2. $(x-2)^2 + (y+1)^2 + (z-3)^2 = 4.$

3. а) $\lambda = 0$ — цилиндр с осью симметрии Oy ;

$\lambda > 0, \lambda \neq 1$ — эллипсоид с полуосями $a = 1, b = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}, c = 1$;

$\lambda = 1$ — сфера с центром в начале координат и радиусом 1;

$\lambda < 0$ — однополостный гиперболоид с осью симметрии Oy ;

б) $\lambda = 0$ — прямая: $y = 0, z = 0$ (ось Ox);

$\lambda > 0$ — эллипсоид с полуосями $a = 1, b = \sqrt{\lambda}, c = \sqrt{\lambda}$;

$\lambda < 0$ — двуполостный гиперболоид

$\frac{y^2}{(-\lambda)} + \frac{z^2}{(-\lambda)} - x^2 = -1$ с осью симметрии Ox ;

в) $\lambda = 0$ — плоскость: $y = 0$;

$\lambda > 0$ — эллиптический параболоид $z = -x^2 - \frac{y^2}{\lambda}$ с осью симметрии Oz ;

$\lambda < 0$ — гиперболический параболоид $z = \frac{y^2}{(-\lambda)} - x^2$;

г) $\lambda = 0$ — конус с осью симметрии Oy ;

$\lambda > 0$ — однополостный гиперболоид с осью симметрии Oy ;

$\lambda < 0$ — двуполостный гиперболоид с осью симметрии Oy и вершинами в точках $(0; -\sqrt{-\lambda}; 0)$ и $(0; \sqrt{-\lambda}; 0)$.

4. а) $-\frac{x^2}{16} + \frac{y^2}{9} + \frac{z^2}{9} = -1$ — двуполостный гиперболоид вращения с осью симметрии Ox ;

б) $\frac{x^2}{16} - \frac{y^2}{9} + \frac{z^2}{9} = 1$ — однополостный гиперболоид вращения с осью симметрии Oy .

5. Сфера $(x-3)^2 + (y+1)^2 + (z-4)^2 = 25$ с центром в точке $(3; -1; 4)$ и радиусом 5.

6. Эллиптический параболоид $y - 2 = -\frac{x^2}{4} - \frac{z^2}{9}$ с осью симметрии Oy , вершиной в точке $(0; 2; 0)$, обращенный полостью в отрицательном направлении оси Oy .

7. Гиперболический параболоид $x - 2 = \frac{(z-3)^2}{4} - \frac{(y+1)^2}{9}$ с вершиной в точке $O'(2; -1; 3)$ и осью симметрии $O'x'$.

8. Однополостный гиперболоид $\frac{(x+1)^2}{4} - \frac{(y-2)^2}{9} + \frac{(z+3)^2}{2} = 1$ с осью симметрии $O'y'$ и центром в точке $O'(-1; 2; -3)$.

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ

Многие естественно-научные и технические задачи приводят к необходимости решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)

[illegible]

Как уже отмечалось в гл. 1, число m уравнений в СЛАУ и число n неизвестных в них могут исчисляться десятками и сотнями тысяч. Очевидно, что решение таких систем уравнений невозможно без применения ЭВМ. Но даже для современных специализированных ЭВМ задача решения СЛАУ с очень большими значениями m и n ($m, n \geq 10^5$) требует огромных затрат машинного времени. Проблема сокращения затрат машинного времени на решение систем уравнений большого размера является актуальной и в настоящее время, хотя в течение уже многих десятилетий усилия математиков всего мира направлены на разработку эффективных вычислительных алгоритмов решения таких систем уравнений.

Наша учебная задача заключается в знакомстве с кругом проблем, возникающих при использовании численных методов вообще и численных методов решения СЛАУ в частности, а также в изучении некоторых наиболее простых и широко применяемых в вычислительной практике методов решения систем уравнений.

Вопрос *быстродействия* является одним из основных вопросов, возникающих при тестировании любого нового численного алгоритма. Ответ на него получают, подсчитывая число арифметических операций, необходимых для реализации алгоритма. Например, для решения системы n уравнений с n неизвестными методом Гаусса необходимо выполнить приблизительно $\frac{n^3}{3}$ арифметических операций, а методом квадратных корней, как будет показано ниже, — в два раза меньше.

Учет особенностей основной матрицы СЛАУ (симметричность, ленточный вид, блочная структура матрицы и т. п.) позволяет создавать новые или модифицировать уже известные алгоритмы.

Методы решения систем уравнений делят на *точные*, или *конечные*, и *итерационные*. Точные методы позволяют находить решение $X^0 = (x_1^0 \ x_2^0 \ \dots \ x_n^0)^T$ СЛАУ за конечное число шагов, определяемое размерами ее основной матрицы и собственно алгоритмом. К ним относятся хорошо известные нам правило Крамера и метод Гаусса, а также метод квадратных корней, метод прогонки и другие, пока нам не известные.

Метод Гаусса является универсальным методом исследования линейных систем уравнений на совместность и решения совместных СЛАУ. Другие три, названные в числе точных методов, применимы к системам уравнений, основная матрица которых удовлетворяет для каждого метода своим определенным условиям. Для метода квадратных корней и метода прогонки эти условия обсуждаются ниже в соответствующих параграфах.

Итерационные методы являются циклическими алгоритмами с однотипными действиями (процедурами) в каждом цикле. Они позволяют находить *приближенное решение* СЛАУ с заданной точностью за конечное, но априори не известное число циклов. К итерационным методам относятся методы простой итерации, Зейделя, релаксации и др.

Термин «точный метод» требует пояснения. Метод Гаусса, равно как и другие конечные методы решения СЛАУ, является точным в том смысле, что если коэффициенты системы уравнений (9.1) *заданы точно* и все вычисления, предписываемые алгоритмом этого метода, *выполняются точно*, то и решение X^0 системы (если оно существует) будет *найденно точно*.

Однако в реальной ЭВМ числа записываются приближенно в соответствии с размером разрядной сетки; арифметические действия с ними организованы так, что в определенных ситуациях результаты вычислений могут отличаться от точных значений.

Таким образом, *все методы*, как приближенные по своей сути, так и точные, оказываются *приближенными* при реализации алгоритма решения системы уравнений на ЭВМ.

Есть еще одна проблема, обусловленная приближенной записью действительных чисел в ЭВМ. Конечные методы ведут себя по-разному в отношении ошибок округлений. В одних алгоритмах эти ошибки могут быстро расти и приводить к неприемлемым ошибкам в получаемом приближенном решении $\hat{X}^0$ системы уравнений и даже к прекращению вычислений, в других — ошибки округления не накапливаются. Алгоритмы первого типа (любые, не обязательно конечные) называют *неустойчивыми* к вычислительным ошибкам, а алгоритмы второго типа — *устойчивыми*.

Доказано, что метод Гаусса является *неустойчивым*, а метод квадратных корней устойчив к ошибкам округлений. Идеи метода Гаусса лежат в основе большого числа вычислительных алгоритмов линейной алгебры. Поэтому задача повышения устойчивости метода Гаусса к погрешностям округлений всегда была одной из важнейших в вычислительной математике.

Рассмотрим несколько примеров. Пусть требуется исследовать на совместность систему

$$\begin{cases} x - y + 2z = 1, \\ 2x + y - 3z = 1, \\ -3y + 6,999z = 1,01. \end{cases}$$

Прямой ход метода Гаусса приводит к расширенной матрице

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & -1 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & -3 & 1 \\ 0 & -3 & 6,999 & 1,01 \end{array} \right) \sim \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & -1 & 2 & 1 \\ 0 & 3 & -7 & -1 \\ 0 & 0 & -0,001 & 0,01 \end{array} \right),$$

которой отвечает треугольная СЛАУ

$$\begin{cases} x - y + 2z = 1, \\ 3y - 7z = -1, \\ -0,001z = 0,01. \end{cases}$$

Данная система имеет единственное решение $X = (-8/3 \ -71/3 \ -10)^T$.

Допустим теперь, что решение системы выполняется с помощью некоторой виртуальной ЭВМ, на которой вычисления

производятся с двумя знаками после запятой. В этом случае прямой ход метода Гаусса приводит к несовместной системе

$$\begin{cases} x - y + 2z = 1, \\ 3y - 7z = -1, \\ 0 \cdot z = 0,01. \end{cases}$$

Причина такого явления заключается в том, что в пределах объявленной машинной точности определитель основной матрицы системы уравнений равен нулю. Действительно, машинным нулем при такой точности считаются все действительные числа α такие, что $|\alpha| < 0,005$, а определитель основной матрицы A исходной СЛАУ равен $-0,001$.

Изменим незначительно исходную систему:

$$\begin{cases} x - y + 2z = 1, \\ 2x + y - 3z = 1, \\ -3y + 6,99z = 1,001. \end{cases}$$

Ее точное решение — вектор $X = (19/30 \ -17/30 \ -1/10)^T$. В виртуальную ЭВМ эта же система будет записана в следующем виде:

$$\begin{cases} x - y + 2z = 1, \\ 2x + y - 3z = 1, \\ -3y + 6,99z = 1. \end{cases}$$

Решением данной системы является вектор $X = (4/3 \ -1/3 \ 0)^T$, существенно отличающийся от точного решения. Определитель основной матрицы данной СЛАУ хотя и больше (по модулю) машинного нуля ($\det A = -0,03$), однако не настолько, чтобы не влиять на результаты решения.

Рассмотрим теперь систему уравнений

$$\begin{cases} x - y + 2z = 1, \\ 2x + y - 3z = 1, \\ -3y + 8z = 1,001, \end{cases}$$

у которой определитель основной матрицы равен 3. Это значительно больше машинного нуля «сконструированной» нами виртуальной машины. Поэтому точное решение данной системы уравнений $X = (0,667 \ -0,331 \ 0,001)^T$ незначительно отличается от приближенного решения $X = (0,(6) \ -0,(3) \ 0)^T$ системы

уравнений, которая будет записана в ЭВМ с учетом принятой точности округлений в следующем виде:

$$\begin{cases} x - y + 2z = 1, \\ 2x + y - 3z = 1, \\ -3y + 8z = 1. \end{cases}$$

Заметим, что деление на машинный ноль может возникнуть на любом шаге прямого хода метода Гаусса.

Простейший прием повышения устойчивости метода Гаусса заключается в выборе так называемого *ведущего элемента* данного шага прямого хода. Если модуль определителя основной матрицы СЛАУ больше машинного нуля, то на каждом шаге прямого хода можно с помощью дополнительной процедуры выбора ведущего элемента избежать деления на машинный ноль и в результате повысить точность решения. Поясним, как осуществляется выбор ведущего элемента.

Пусть

$$A^{(k-1)} = \left(\begin{array}{cccccccc|c} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1,k-1} & a_{1k} & \cdots & a_{1r} & \cdots & a_{1n} & b_1 \\ 0 & a_{12}^{(1)} & \cdots & a_{2,k-1}^{(1)} & a_{2k}^{(1)} & \cdots & a_{2r}^{(1)} & \cdots & a_{2n}^{(1)} & b_2^{(1)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & a_{k-1,k-1}^{(k-2)} & a_{k-1,k}^{(k-2)} & \cdots & a_{k-1,r}^{(k-2)} & \cdots & a_{k-1,n}^{(k-2)} & b_{k-1}^{(k-2)} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & a_{kk}^{(k-1)} & \cdots & a_{kr}^{(k-1)} & \cdots & a_{kn}^{(k-1)} & b_k^{(k-1)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & a_{sk}^{(k-1)} & \cdots & a_{sr}^{(k-1)} & \cdots & a_{sn}^{(k-1)} & b_s^{(k-1)} \end{array} \right)$$

— расширенная матрица после некоторого $(k-1)$ -го, $2 \leq k < r$, шага прямого хода метода Гаусса. Пунктирами в правом нижнем углу в ней отделена подматрица

$$A^{(k-1)} = (a_{ij}^{(k-1)}), \quad i = k, k+1, \dots, s; \quad j = k, k+1, \dots, n,$$

которая называется *активной подматрицей* следующего k -го шага. Первый столбец активной подматрицы называется *активным столбцом*.

Выделяют два основных способа выбора ведущего элемента k -го шага: по активному столбцу (частичный выбор) и по всей активной подматрице (полный выбор).

В первом случае в качестве ведущего элемента k -го шага выбирается наибольший по модулю элемент $a_{tk}^{(k-1)}$, $k \leq t \leq s$,

в активном столбце. Если $t \neq k$, то строки активной подматрицы с номерами t и k меняются местами, т. е. наибольший по модулю элемент $a_{tk}^{(k-1)}$ перемещается в ячейку с номером (k, k) . На него на k -м шаге прямого хода метода Гаусса будут делиться элементы k -й строки расширенной матрицы $A^{(k-1)}$.

Во втором случае в качестве ведущего элемента k -го шага выбирается наибольший по модулю элемент во всей активной подматрице.

§ 58. Метод квадратных корней

58.1. Идея метода

Пусть

$$AX = B \quad (9.1)$$

— система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с симметричной основной матрицей $A = (a_{ij})$ размером $n \times n$; $B = (b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n)^\top$ — вектор свободных членов СЛАУ и $X = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n)^\top$ — вектор неизвестных.

Предположим, что матрицу A можно представить в виде произведения двух треугольных матриц

$$A = R^\top R, \quad (9.2)$$

где R — верхняя треугольная матрица, а $R^\top$ — ее транспонированная, т. е.

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ 0 & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & r_{nn} \end{pmatrix}, \quad R^\top = \begin{pmatrix} r_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ r_{12} & r_{22} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{1n} & r_{2n} & \cdots & r_{nn} \end{pmatrix}.$$

Разложение (9.2) матрицы A в произведение $R^\top R$ матриц $R^\top$ и R называется *факторизацией* матрицы A . (Как будет показано ниже, это возможно, если $r_{ii} \neq 0$, $i = \overline{1, n}$.)

С учетом (9.2) СЛАУ (9.1) принимает следующий вид: $(R^\top R)X = B$. Используя свойство ассоциативности произведения матриц, можем записать $R^\top(RX) = B$. Введем обозначение $RX = Y$. В результате СЛАУ (9.1) будет эквивалентна двум СЛАУ с треугольными матрицами:

$$AX = B \Leftrightarrow \begin{cases} R^\top Y = B, \\ RX = Y. \end{cases}$$

Решая первую СЛАУ $R^T Y = B$, находим вспомогательный вектор Y — вектор свободных членов для СЛАУ $RX = Y$. Решая СЛАУ $RX = Y$, находим искомым вектор X .

Таким образом, для решения СЛАУ (9.1) с симметричной матрицей A следует:

- 1) осуществить факторизацию матрицы A : $A = R^T R$;
- 2) решить последовательно две СЛАУ с треугольными матрицами коэффициентов:

$$\text{а) } R^T Y = B \rightarrow Y, \quad \text{б) } RX = Y \rightarrow X.$$

58.2. Факторизация матрицы A

Поскольку

$$\begin{aligned} R^T R &= \begin{pmatrix} r_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ r_{12} & r_{22} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{1n} & r_{2n} & \cdots & r_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ 0 & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & r_{nn} \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} r_{11}^2 & r_{11}r_{12} & \cdots & r_{11}r_{1n} \\ r_{11}r_{12} & r_{12}^2 + r_{22}^2 & \cdots & r_{12}r_{1n} + r_{22}r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{11}r_{1n} & r_{12}r_{1n} + r_{22}r_{2n} & \cdots & r_{1n}^2 + r_{2n}^2 + r_{nn}^2 \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

то из равенства $R^T R = A$ получаем систему $\frac{n(n+1)}{2}$ уравнений для нахождения $\frac{n(n+1)}{2}$ элементов r_{ij} , $i = \overline{1, n}; j = \overline{i, n}$, матрицы R .

Запишем эти уравнения построчно:

- 1) $r_{11}^2 = a_{11}, r_{11}r_{12} = a_{12}, \dots, r_{11}r_{1n} = a_{1n};$
- 2) $r_{12}^2 + r_{22}^2 = a_{22}, r_{12}r_{13} + r_{22}r_{23} = a_{23}, \dots, r_{12}r_{1n} + r_{22}r_{2n} = a_{2n};$
.....
- k) $r_{1k}^2 + r_{2k}^2 + \cdots + r_{kk}^2 = a_{kk},$
 $r_{1k}r_{1j} + r_{2k}r_{2j} + \cdots + r_{kk}r_{kj} = a_{kj}, \quad j = \overline{k, n};$
.....
- n) $r_{1n}^2 + r_{2n}^2 + \cdots + r_{nn}^2 = a_{nn}.$

(9.3)

Из (9.3) последовательно находим:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{11} = \sqrt{a_{11}}; \quad r_{1j} = \frac{a_{1j}}{r_{11}}, \quad j = \overline{2, n}, \\ r_{22} = \sqrt{a_{22} - r_{12}^2}; \quad r_{2j} = \frac{a_{2j} - r_{12}r_{1j}}{r_{22}}, \quad j = \overline{3, n}, \\ \dots\dots\dots \\ r_{kk} = \sqrt{a_{kk} - (r_{1k}^2 + r_{2k}^2 + \dots + r_{k-1,k}^2)}, \\ r_{kj} = \frac{a_{kj} - (r_{1k}r_{1j} + r_{2k}r_{2j} + \dots + r_{k-1,k}r_{k-1,j})}{r_{kk}}, \\ \quad k = \overline{3, n-1}, \quad j > k, \\ r_{nn} = \sqrt{a_{nn} - (r_{1n}^2 + r_{2n}^2 + \dots + r_{n-1,n}^2)}. \end{array} \right. \quad (9.4)$$

Замечание. Следует отметить, что каждое из n уравнений $r_{11}^2 = a_{11}$ и $r_{kk}^2 = a_{kk} - \sum_{i=1}^{k-1} r_{ik}^2$, $k = \overline{2, n}$, в составе системы уравнений (9.3) имеет два решения. Одно из них имеет знак «+» перед радикалом: этот вариант приведен в формулах (9.4) — решении системы уравнений (9.3). Второй вариант — со знаком «-» перед радикалом. Если всюду в (9.4) изменить знак перед радикалом на «-», то одновременно знаки всех ненулевых элементов матрицы R изменятся на противоположные. Тогда будет получена матрица $R_1 = -R$. Соответственно изменится и транспонированная матрица $R_1^\top = (-R)^\top$, но при этом $R_1^\top R_1 = (-R)^\top (-R) = R^\top R$. Значит, и при таком выборе знаков перед радикалами система уравнений $(R_1^\top R_1)X = B$ будет совпадать с системой $(R^\top R)X = B$ и решение системы не изменится.

Из (9.4) следует, что система уравнений (9.3) однозначно разрешима, если $r_{kk} \neq 0$, $k = \overline{1, n-1}$. Это, в свою очередь, есть достаточное условие существования и единственности решения СЛАУ (9.1). Действительно,

$$\det A = \det (R^\top R) = \det R^\top \cdot \det R = r_{11}^2 \cdot r_{22}^2 \cdot \dots \cdot r_{nn}^2,$$

и если $r_{kk} \neq 0 \forall k \in \{1, 2, \dots, n\}$, то $\det A \neq 0$, $\text{rg } (A|B) = \text{rg } (A) = n$ и в соответствии с теоремой Кронекера–Капелли СЛАУ (9.1) совместна и имеет единственное решение.

Формулы (9.4) не очень удобны для запоминания. Целесообразно пользоваться векторной формой записи этих формул для произвольного $k \in \{2, 3, \dots, n\}$. Введем обозначения

$$\mathbf{r}_k = (r_{1k}, r_{2k}, \dots, r_{k-1,k}), \quad \mathbf{r}_j = (r_{1j}, r_{2j}, \dots, r_{k-1,j}). \quad (9.5)$$

Здесь $\mathbf{r}_k$ — вектор элементов k -го столбца матрицы R , расположенных в строках с номерами $1, 2, \dots, k-1$ (отделены пунктирами в матрице R). Аналогично определяется вектор $\mathbf{r}_j$ — вектор элементов j -го столбца ($j \in \{k+1, k+2, \dots, n\}$), расположенных в первых $(k-1)$ строках (также отделены пунктиром):

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & 1_k & \cdots & r_{1j} & \cdots & r_{1n} \\ 0 & r_{22} & \cdots & r_{2k} & \cdots & r_{2j} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & r_{k-1,k} & \cdots & r_{k-1,j} & \cdots & r_{k-1,n} \\ 0 & 0 & \cdots & r_{kk} & \cdots & r_{kj} & \cdots & r_{kn} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & r_{jj} & \cdots & r_{jn} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & r_{nn} \end{pmatrix}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} r_{kk} &= \sqrt{a_{kk} - (\mathbf{r}_k, \mathbf{r}_k)}, \quad k = \overline{2, n}, \\ r_{kj} &= \frac{a_{kj} - (\mathbf{r}_k, \mathbf{r}_j)}{r_{kk}}, \quad j = \overline{k+1, n}. \end{aligned} \quad (9.6)$$

Здесь $(\mathbf{r}_k, \mathbf{r}_k)$, $(\mathbf{r}_k, \mathbf{r}_j)$ — скалярные произведения арифметических векторов.

Выясним теперь, при каких дополнительных условиях действительная матрица A ($a_{ij} \in \mathbb{R}$) разлагается в произведение $R^\top R$ с действительной матрицей R . Из формул (9.4) следует, что комплексные элементы r_{ij} в матрице R могут появиться, если среди чисел

$$a_{11}; a_{kk} - (r_{1k}^2 + r_{2k}^2 + \cdots + r_{k-1,k}^2) = r_{kk}^2, \quad k = \overline{2, n},$$

есть хотя бы одно отрицательное число.

Определение 9.1. Матрица A называется *положительно определенной*, если $X^\top A X > 0$ для любого ненулевого вектора $X = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n)^\top$.

Известно, что для положительной определенности матрицы A необходимо и достаточно, чтобы положительными были

все ее угловые миноры (критерий Сильвестра): $\Delta_1 = a_{11}$,
 $\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}$, $\Delta_n = |A|$.

Теорема 9.1. Действительная матрица A разлагается в произведение $R^\top R$ с действительной матрицей R тогда и только тогда, когда матрица A положительно определена.

Доказательство. Введем обозначения

$$A_k = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1k} \\ a_{12} & a_{22} & \cdots & a_{2k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{1k} & a_{2k} & \cdots & a_{kk} \end{pmatrix}, \quad R_k = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1k} \\ 0 & r_{22} & \cdots & r_{2k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & r_{kk} \end{pmatrix}.$$

Матрицы A_k и R_k являются подматрицами порядка k матриц A и R соответственно, расположенными в левых верхних углах этих матриц. Легко установить, что если имеет место разложение $A = R^\top R$, то и $A_k = R_k^\top R_k$. При этом

$$|A| = |R^\top R| = |R^\top| |R| = \prod_{i=1}^n r_{ii}^2; \quad (9.7)$$

$$|A_k| = |R_k^\top R_k| = |R_k^\top| |R_k| = \prod_{i=1}^k r_{ii}^2,$$

где $|A|$, $|A_k|$ — определители матриц A и A_k соответственно. Обозначим $\Delta_k = |A_k|$ — угловые миноры матрицы A . Из (9.7) с учетом (9.3) последовательно получаем:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= |A_1| = a_{11} = r_{11}^2; \\ \Delta_2 &= |A_2| = |R_2^\top| \cdot |R_2| = r_{11}^2 r_{22}^2 = \Delta_1 r_{22}^2; \\ \Delta_3 &= |A_3| = |R_3^\top| \cdot |R_3| = r_{11}^2 r_{22}^2 r_{33}^2 = |r_{11}^2 r_{22}^2 = \Delta_2| = \Delta_2 r_{33}^2; \\ &\dots\dots\dots \\ \Delta_n &= |A_n| = |R_n^\top| \cdot |R_n| = r_{11}^2 r_{22}^2 \cdots r_{nn}^2 = \\ &= |r_{11}^2 r_{22}^2 \cdots r_{n-1, n-1}^2 = \Delta_{n-1}| = \Delta_{n-1} r_{nn}^2, \end{aligned}$$

откуда $r_{11}^2 = a_{11} = \Delta_1$; $r_{kk}^2 = \frac{\Delta_k}{\Delta_{k-1}}$, $k = \overline{2, n}$.

Последние равенства позволяют сделать искомый вывод: если числа r_{kk}^2 , $k = \overline{1, n}$, положительны, то и все угловые миноры Δ_k , $k = \overline{1, n}$, положительны, что равносильно положительной определенности матрицы A , и обратно: из положительности угловых миноров Δ_k , $k = \overline{1, n}$, следует положительность чисел r_{kk}^2 . ■

Таким образом, положительная определенность симметричной матрицы A обеспечивает существование действительных значений корней

$$\sqrt{a_{11}}, \quad \sqrt{a_{kk} - (r_{1k}^2 + r_{2k}^2 + \dots + r_{k-1,k}^2)}, \quad k = \overline{2, n}.$$

В противном случае матрица R будет комплексной ($r_{ij} \in \mathbb{C}$), даже если матрица A действительная.

58.3. Решение треугольных систем уравнений

СЛАУ $R^T Y = B$ и $RX = Y$ являются треугольными, и потому их решения находятся просто (обратный ход метода Гаусса):

$$\begin{cases} r_{11}y_1 = b_1, \\ r_{12}y_1 + r_{22}y_2 = b_2, \\ \dots\dots\dots \\ r_{1n}y_1 + r_{2n}y_2 + \dots + r_{nn}y_n = b_n, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} y_1 = \frac{b_1}{r_{11}}, \\ y_2 = \frac{b_2 - r_{12}y_1}{r_{22}}, \\ \dots\dots\dots \\ y_n = \frac{b_n - \sum_{i=1}^{n-1} r_{in}y_i}{r_{nn}}, \end{cases} \quad (9.8)$$

$$\begin{cases} r_{11}x_1 + r_{12}x_2 + \dots + r_{1n}x_n = y_1, \\ r_{12}x_2 + \dots + r_{2n}x_n = y_2, \\ \dots\dots\dots \\ r_{n-1,n-1}x_{n-1} + r_{n-1,n}x_n = y_{n-1}, \\ r_{nn}x_n = y_n \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_n = \frac{y_n}{r_{nn}}, \\ x_{n-1} = \frac{y_{n-1} - r_{n-1,n}x_n}{r_{n-1,n-1}}, \\ \dots\dots\dots \\ x_1 = \frac{y_1 - \sum_{j=2}^n r_{1j}x_j}{r_{11}}. \end{cases} \quad (9.9)$$

Решением двух треугольных СЛАУ завершается решение системы уравнений методом квадратных корней.

58.4. Требуемые ресурсы ЭВМ и число операций

Для хранения коэффициентов a_{ij} (верхнего или нижнего «треугольника», так как $a_{ij} = a_{ji} \forall i \neq j$) необходимо $n + (n-1) + (n-2) + \dots + 1 = \frac{n(n+1)}{2}$ ячеек памяти. В этих же ячейках после их «освобождения» можно поместить и элементы r_{ij} матрицы R . Еще n ячеек нужны для хранения коэффициентов b_i , $i = \overline{1, n}$, и в них же, после их «освобождения» — векторов Y и X . В результате необходимо $\frac{n(n+3)}{2}$ ячеек оперативной памяти ЭВМ.

Вычисление числа операций. Здесь и далее символами $N(\pm)$, $N(*)$, $N(/)$, $N(\sqrt{})$ обозначены соответственно количества операций сложения (вычитания), умножения, деления и извлечения квадратного корня.

Подсчитаем число арифметических операций на каждом этапе метода квадратных корней (факторизация матрицы A , решение треугольных СЛАУ).

I. Факторизация матрицы (формулы (9.4)).

I.1) Вычисление коэффициентов r_{kk} , $k = \overline{1, n}$:

$$N(\sqrt{}) = n, \quad N(/) = 0, \quad N(*) = 1 + 2 + \dots + (n-1) = \frac{(n-1)n}{2},$$

$$N(\pm) = \frac{(n-1)n}{2}. \quad (9.10)$$

I.2) Вычисление коэффициентов r_{kj} , $k = \overline{1, n-1}$, $j = \overline{k+1, n}$:

$$N(\sqrt{}) = 0, \quad N(/) = (n-1) + (n-2) + \dots + 1 = \frac{n(n-1)}{2},$$

$$N(*) = 1 \cdot (n-2) + 2(n-3) + \dots + (n-2) \cdot 1 = \frac{n(n-1)(n-2)}{6},$$

$$N(\pm) = N(*) = \frac{n(n-1)(n-2)}{6}. \quad (9.11)$$

В формуле (9.11): $1 \cdot (n-2)$ — число умножений, необходимое для вычисления коэффициентов r_{2j} , $j = \overline{3, n}$; $2(n-3)$ — число умножений, необходимое для вычисления коэффициентов r_{3j} , $j = \overline{4, n}$, ..., $(n-2) \cdot 1$ — число умножений, необходимое для вычисления коэффициента $r_{n-1, n}$.

Доказательство формулы (9.11):

$$\begin{aligned}
 & 1(n-2) + 2(n-3) + \dots + (n-2) \cdot 1 = \\
 & = n + 2n + \dots + (n-2)n - [1 \cdot 2 + 2 \cdot 3 + \dots + (n-2)(n-1)] = \\
 & = \frac{(n-2)(n-1)n}{2} - [1 \cdot (1+1) + 2(2+1) + \dots + (n-2)((n-1)+1)] = \\
 & = \frac{(n-2)(n-1)n}{2} - (1^2 + 2^2 + \dots + (n-2)^2) - (1 + 2 + \dots + (n-2)) = \\
 & = \frac{(n-2)(n-1)n}{2} - \frac{(n-2)(n-1)(2n-3)}{6} - \frac{(n-1)(n-2)}{2} = \\
 & = \frac{(n-2)(n-1)}{6} (3n - 2n + 3 - 3) = \frac{n(n-1)(n-2)}{6}. \blacksquare
 \end{aligned}$$

При выводе формулы (9.11) были использованы следующие очевидные соотношения: $(n-2) \cdot 1 = (n-2)(n - (n-1))$; $(n-3)2 = (n-3)(n - (n-2))$ и известная формула $\sum_{k=1}^n k^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}$.

Основные затраты времени ЭВМ при реализации вычислительных операций приходятся на медленные операции: умножение, деление и извлечение квадратного корня. Общее число таких операций на этапе факторизации матрицы A равно

$$\begin{aligned}
 N(\sqrt{}; *; /) &= n + \frac{n(n-1)}{2} + \frac{n(n-1)}{2} + \frac{n(n-1)(n-2)}{6} = \\
 &= \frac{n(n+1)(n+2)}{6} = \frac{n^3}{6} + O(n^2).
 \end{aligned}$$

Символ $O(n^2)$ заменяет слагаемое $\frac{3n^2 + 2n}{6}$. Такая запись говорит о том, что заменяемое им выражение имеет при больших значениях переменной n такой же порядок роста, что и n^2 . Иначе, $O(n^2) \approx kn^2$. В нашем случае $k = 0,5$.

II. Решение треугольных СЛАУ. Состав и число операций при решении каждой треугольной СЛАУ совпадают. Для одной СЛАУ имеем из (9.8)

$$N(/) = n, \quad N(*) = 1 + 2 + \dots + (n-1) = \frac{n(n-1)}{2},$$

$$N(\pm) = N(*) = \frac{n(n-1)}{2}.$$

III. Общее число вычислительных операций:**III.1) медленных**

$$\begin{aligned}
 N(\sqrt{}; *; /) &= \frac{n(n+1)(n-2)}{6} + 2 \left(n + \frac{n(n-1)}{2} \right) = \\
 &= \frac{n(n+1)(n+8)}{6} = \frac{n^3}{6} + O(n^2);
 \end{aligned}$$

III.2) быстрых

$$\begin{aligned}
 N(\sqrt{}; *; /) &= \underbrace{\frac{n(n-1)}{2} + \frac{n(n-1)(n-2)}{6}}_{\text{факторизация } A} + \\
 &\quad + 2 \underbrace{\frac{n(n-1)}{2}}_{\text{решение СЛАУ}} = \frac{n^3}{6} + O(n^2).
 \end{aligned}$$

58.5. Выводы

1. В методе Гаусса число медленных операций равно $\frac{n^3}{3} + O(n^2)$, а в методе квадратных корней $\frac{n^3}{6} + O(n^2)$, т. е. вдвое меньше.

2. Метод Гаусса применим для исследования совместности и решения произвольных СЛАУ. Метод квадратных корней применим для решения только СЛАУ с *симметричной* основной матрицей СЛАУ.

Естественно, требование симметричности основной матрицы системы уравнений существенно сужает область применения метода квадратных корней. Вместе с тем при решении некоторых, достаточно широко распространенных задач появляются СЛАУ вида

$$(K^T K)X = F, \quad (9.12)$$

с основной матрицей СЛАУ $A = K^T K$, где $\dim K = m \times n$ и $m \leq n$. Если матрица K является матрицей полного ранга, т. е. $\text{rg } K = m$, то матрица $A = K^T K$ будет *положительно определенной*. Кроме того, матрица A симметрична. Поэтому для решения СЛАУ (9.12) можно и целесообразно использовать метод квадратных корней.

Системы линейных уравнений вида (9.12) появляются, например, при нахождении коэффициентов уравнения регрессии методом наименьших квадратов и при решении интегральных уравнений Фредгольма первого рода численными методами.

58.6. Пример**Пример 9.1.** Решить методом квадратного корня СЛАУ

$$\begin{cases} 4x_1 + 2x_2 - 2x_3 = 4, \\ 2x_1 + 2x_2 + x_3 - 2x_4 = 3, \\ -2x_1 + x_2 + 6x_3 - 3x_4 = 2, \\ -2x_2 - 3x_3 + 6x_4 = 1. \end{cases}$$

Решение. Матрица СЛАУ является симметричной:

$$A = \begin{pmatrix} 4 & 2 & -2 & 0 \\ 2 & 2 & 1 & -2 \\ -2 & 1 & 6 & -3 \\ 0 & -2 & -3 & 6 \end{pmatrix}.$$

1. Проверка на знакоопределенность:

$$\Delta_1 = 4 > 0, \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} 4 & 2 \\ 2 & 2 \end{vmatrix} = 4 > 0, \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} 4 & 2 & -2 \\ 2 & 2 & 1 \\ -2 & 1 & 6 \end{vmatrix} = 4 > 0,$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} 4 & 2 & -2 & 0 \\ 2 & 2 & 1 & -2 \\ -2 & 1 & 6 & -3 \\ 0 & -2 & -3 & 6 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & -2 & -4 & 4 \\ 2 & 2 & 1 & -2 \\ 0 & 3 & 7 & -5 \\ 0 & -2 & -3 & -6 \end{vmatrix} = 4 > 0.$$

Поскольку все угловые миноры матрицы A положительны, то матрица A положительно определена и потому при ее факторизации должна получиться действительная матрица R .

2. Факторизация:

$$r_{11} = \sqrt{4} = 2, \quad r_{12} = \frac{2}{2} = 1, \quad r_{13} = \frac{-2}{2} = -1, \quad r_{14} = \frac{0}{2} = 0;$$

$$r_{22} = \sqrt{2 - 1^2} = 1, \quad r_{23} = (1 - 1 \cdot (-1)) / 1 = 2,$$

$$r_{24} = (-2 - 1 \cdot 0) / 1 = -2;$$

$$r_{33} = \sqrt{6 - (-1)^2 - (2)^2} = 1, \quad r_{34} = (-3 - (-1) \cdot 0 - 2(-2)) / 1 = 1;$$

$$r_{44} = \sqrt{6 - 0^2 - (-2)^2 - (1)^2} = 1.$$

$$R = \begin{pmatrix} 2 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & -2 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad R^T = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & -2 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

$$R^T Y = B: \begin{cases} 2y_1 = 4, \\ y_1 + y_2 = 3, \\ -y_1 + 2y_2 + y_3 = 2, \\ -2y_2 + y_3 + y_4 = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} y_1 = 2, \\ y_2 = 3 - 2 = 1, \\ y_3 = 2 + 2 - 2 = 2, \\ y_4 = 1 + 2 \cdot 1 - 2 = 1. \end{cases}$$

$$\text{RX} = \text{Y}: \begin{cases} 2x_1 + x_2 - x_3 = 2, \\ x_2 + 2x_3 - 2x_4 = 1, \\ x_3 + x_4 = 2, \\ x_4 = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_4 = 1, \\ x_3 = 2 - 1 = 1, \\ x_2 = 1 - 2 \cdot 1 + 2 \cdot 1 = 1, \\ x_1 = (2 - 1 + 1)/2 = 1. \end{cases}$$

Ответ: $X = (1 \ 1 \ 1 \ 1)^T$.

59.1. Алгоритм метода. Примеры

Пусть

$$AX = B \quad (9.13)$$

— квадратная СЛАУ порядка n , т. е.

[illegible]

Допустим, что $a_{ii} \neq 0, \forall i = \overline{1, n}$. Разделим обе части каждого i -го уравнения (9.14) на соответствующий диагональный коэффициент a_{ii} и преобразуем СЛАУ (9.14) к следующему виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = \frac{b_1}{a_{11}} + \mathbf{0} \cdot x_1 + \left(-\frac{a_{12}}{a_{11}} \right) x_2 + \cdots + \left(-\frac{a_{1n}}{a_{11}} \right) x_n, \\ x_2 = \frac{b_2}{a_{22}} + \left(-\frac{a_{21}}{a_{22}} \right) x_1 + \mathbf{0} \cdot x_2 + \cdots + \left(-\frac{a_{2n}}{a_{22}} \right) x_n, \\ \dots\dots\dots \\ x_n = \frac{b_n}{a_{nn}} + \left(-\frac{a_{n1}}{a_{nn}} \right) x_1 + \left(-\frac{a_{n2}}{a_{nn}} \right) x_2 + \cdots + \mathbf{0} \cdot x_n. \end{array} \right. \quad (9.15)$$

Введем обозначения:

$$t_i = \frac{b_i}{a_{ii}}, \quad i = \overline{1, n}; \quad \gamma_i = -\frac{a_{ij}}{a_{ii}}, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad i \neq j;$$

$$\gamma_{ii} = 0, \quad i = \overline{1, n}.$$

Решение. Решением данной СЛАУ является вектор $X^* = (3 \ 2 \ 1)^T$ (проверьте!). Организуем вычисление векторов $X^{(m)}$ по итерационному алгоритму (9.17).

1. Преобразование СЛАУ к виду (9.16):

$$\begin{cases} x_1 = \frac{15}{5} - \frac{1}{5}x_2 + \frac{2}{5}x_3, \\ x_2 = \frac{5}{5} + \frac{1}{5}x_1 + \frac{2}{5}x_3, \text{ или } X = \underbrace{\begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}}_T + \frac{1}{5} \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & -1 & 2 \\ 1 & 0 & 2 \\ -1 & -1 & 0 \end{pmatrix}}_A \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}. \\ x_3 = \frac{10}{5} - \frac{1}{5}x_1 - \frac{1}{5}x_2, \end{cases}$$

2. Положим $X^{(0)} = T = (3 \ 1 \ 2)^T$.

Имеем далее в соответствии с (9.17):

$$\begin{aligned} X^{(1)} &= \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} + \frac{1}{5} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 2 \\ 1 & 0 & 2 \\ -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} + \frac{1}{5} \begin{pmatrix} 3 \\ 7 \\ -4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{18}{5} \\ \frac{12}{5} \\ \frac{6}{5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,6 \\ 2,4 \\ 1,2 \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

$$\rho(X^{(1)}, X^*) = \sqrt{(3,6 - 3)^2 + (2,4 - 2)^2 + (1,2 - 1)^2} \approx 0,748;$$

$$\begin{aligned} X^{(2)} &= \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} + \frac{6}{25} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 2 \\ 1 & 0 & 2 \\ -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} + \frac{6}{25} \begin{pmatrix} 0 \\ 5 \\ -5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ \frac{11}{5} \\ \frac{4}{5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,0 \\ 2,2 \\ 0,8 \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

$$\rho(X^{(2)}, X^*) = \sqrt{(3 - 3)^2 + (2,2 - 2)^2 + (0,8 - 1)^2} \approx 0,283;$$

$$\begin{aligned} X^{(3)} &= \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} + \frac{1}{25} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 2 \\ 1 & 0 & 2 \\ -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 15 \\ 11 \\ 4 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} + \frac{1}{25} \begin{pmatrix} -3 \\ 23 \\ -26 \end{pmatrix} = \frac{1}{25} \begin{pmatrix} 72 \\ 48 \\ 24 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 2,88 \\ 1,92 \\ 0,96 \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

$$\rho(X^{(3)}, X^*) = \sqrt{(2,88 - 3)^2 + (1,92 - 2)^2 + (0,96 - 1)^2} \approx 0,150;$$

$$X^{(4)} = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} + \frac{24}{125} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 2 \\ 1 & 0 & 2 \\ -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ \frac{49}{25} \\ \frac{26}{25} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 1,96 \\ 1,04 \end{pmatrix},$$

$$\rho(X^{(4)}, X^*) = \sqrt{(3 - 3)^2 + (1,96 - 2)^2 + (1,04 - 1)^2} \approx 0,057.$$

Имеем: $\rho(X^{(1)}, X^*) > \rho(X^{(2)}, X^*) > \dots > \rho(X^{(4)}, X^*)$.

Выполненные четыре итерации позволяют предположить, что числовая последовательность $\{\rho(X^{(m)}, X^*)\}$ в данном примере является монотонно убывающей. Она ограничена снизу нулем, и потому должен существовать предел $\lim_{m \rightarrow \infty} X^{(m)} = X^*$. Это следует из теоремы математического анализа о существовании предела у монотонно убывающей и ограниченной снизу последовательности. Можно ожидать, что $X^* = (3 \ 2 \ 1)^T$. ■

Пример 9.3. Найти приближенное решение СЛАУ методом итераций:

$$\begin{cases} x_1 - x_2 + x_3 = 2, \\ 2x_1 + x_2 - x_3 = 1, \\ 2x_1 - x_2 + 4x_3 = 12. \end{cases}$$

Решение. Решением этой СЛАУ является вектор $X^* = (1 \ 2 \ 3)^T$ (проверьте!).

1. Преобразованная СЛАУ:

$$\begin{cases} x_1 = 2 + x_2 - x_3, \\ x_2 = 1 - 2x_1 + x_3, \\ x_3 = 3 - \frac{1}{2}x_1 + \frac{1}{4}x_3, \end{cases} \quad \text{или} \quad X = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -2 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}.$$

2. Пусть $X^{(0)} = (2 \ 1 \ 3)^\top$, тогда:

$$X^{(1)} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -2 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -2 \\ -1 \\ -\frac{3}{4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{9}{4} \end{pmatrix},$$

$$\rho(X^{(1)}, X^*) = \sqrt{(1-0)^2 + (2-0)^2 + (3-9/4)^2} \approx 2,358;$$

$$\begin{aligned} X^{(2)} &= \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -2 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{9}{4} \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{9}{4} \\ \frac{9}{4} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{4} \\ \frac{13}{4} \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,25 \\ 3,25 \\ 3 \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

$$\rho(X^{(2)}, X^*) = \sqrt{\left(1 + \frac{1}{4}\right)^2 + \left(2 - \frac{13}{4}\right)^2 + (3-3)^2} \approx 1,768;$$

$$\begin{aligned} X^{(3)} &= \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -2 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\frac{1}{4} \\ \frac{13}{4} \\ 3 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{4} \\ \frac{7}{2} \\ \frac{15}{16} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{9}{4} \\ \frac{9}{2} \\ \frac{63}{16} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 2,25 \\ 4,5 \\ 3,94 \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

$$\rho(X^{(3)}, X^*) \approx \sqrt{(1-2,25)^2 + (4,5-2)^2 + (3,94-3)^2} \approx 2,949;$$

$$X^{(4)} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -2 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{9}{4} \\ \frac{9}{2} \\ \frac{63}{16} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{41}{16} \\ \frac{7}{16} \\ 3 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 2,56 \\ 0,44 \\ 3,0 \end{pmatrix},$$

$$\rho(X^{(4)}, X^*) = \sqrt{(1 - 2,56)^2 + (2 - 0,44)^2 + (3 - 3)^2} \approx 2,206.$$

Говорить о сходимости данного итерационного процесса, по крайней мере по приведенным первым шагам, сложно. Вместе с тем отсутствие монотонного убывания последовательности $\rho(X^{(m)}, X^*)$ является основанием для предположения о расхождении итерационного процесса. ■

Приведенные примеры показывают, что вопросы, поставленные в п. 59.1, действительно требуют разрешения. Используя результаты общей теории СЛАУ, можно предположить, что ответ на них связан со свойствами основной матрицы СЛАУ (9.14) или матрицы приведенной СЛАУ (9.15). Решение всех вопросов, связанных со сходимостью итерационных методов решения СЛАУ, рассматривается в п. 59.2.

59.2. Исследование сходимости метода итераций

Для получения и практического применения достаточных условий сходимости итерационного процесса в методе итераций нам потребуются понятия *нормы матрицы*, *отображения* и *сжимающего отображения*.

Пусть $\{A\}$ — множество всех матриц одинакового размера $m \times n$. Это множество является линейным пространством, и его можно сделать нормированным пространством, если ввести должным образом правило, по которому будет вычисляться норма матрицы. Как известно, такое правило, по которому каждой матрице $A \in \{A\}$ будет поставлено в соответствие неотрицательное действительное число $\|A\|$, может вводиться произвольно, но должно удовлетворять следующим аксиомам:

1. $\|A\| > 0$, если $A \neq O$ и $\|O\| = 0$.
2. $\|\lambda A\| = |\lambda| \cdot \|A\| \quad \forall \lambda \in \mathbb{R}$.
3. $\|A + B\| \leq \|A\| + \|B\|$.
4. $\|A \cdot B\| \leq \|A\| \cdot \|B\|$.

Эти свойства должны выполняться для любых матриц $A, B \in \{A\}$.

Норма арифметического вектора (§ 8) является функцией координат вектора. По аналогии с ней норма матрицы, имеющая практическое значение, должна зависеть от значений элементов a_{ij} матрицы A . На практике чаще всего используются следующие три матричные нормы:

$$\|A\|_1 = \max_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^m |a_{ij}|, \quad (9.18)$$

$$\|A\|_2 = \max_{1 \leq i \leq m} \sum_{j=1}^n |a_{ij}|, \quad (9.19)$$

$$\|A\|_E = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij}^2 \right)^{1/2}. \quad (9.20)$$

Первая норма (9.18) называется *максимальной столбцовой*, норма (9.19) — *максимальной строковой*, а норма (9.20) — *евклидовой*.

Например, для матрицы $A = \begin{pmatrix} -2 & 5 & 4 \\ 0 & 3 & 1 \\ 7 & -1 & -5 \end{pmatrix}$ значения каждой из трех ее норм будут следующими:

$$\begin{aligned} \|A\|_1 &= \max \{ |-2| + 0 + 7; 5 + 3 + |-1|; 4 + 1 + |-5| \} = \\ &= \max \{ 9; 9; 10 \} = 10, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \|A\|_2 &= \max \{ |-2| + 5 + 4; 0 + 3 + 1; 7 + |-1| + |-5| \} = \\ &= \max \{ 11; 4; 13 \} = 13, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \|A\|_E &= \left((-2)^2 + 5^2 + 4^2 + 3^2 + 1^2 + 7^2 + (-1)^2 + (-5)^2 \right)^{1/2} = \\ &= 130^{1/2} \approx 11,4. \end{aligned}$$

Таким образом, норма ненулевой матрицы A — это положительное число, которое вычисляется по одной из формул (9.18)–(9.20).

Пусть A — матрица размера $m \times n$, а X — произвольный вектор-столбец размера $n \times 1$ ($X \in \mathbb{R}^n$). Тогда матричные операции AX , $T + GX$, где T — фиксированный вектор размера $m \times 1$, задают *отображение* арифметического пространства $\mathbb{R}^n$ в арифметическое пространство $\mathbb{R}^m$. В соответствии с этим отображением каждому вектору $X \in \mathbb{R}^n$ ставится в соответствие

некоторый вектор $Y \in \mathbb{R}^m$ ($Y = AX$ или $Y = T + AX$). Введем обозначения для отображений с участием матриц A и Γ в виде $\tilde{A}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, а также $\tilde{AX}$.

Определение 9.2. Отображение $\tilde{A}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ преобразованием пространства $\mathbb{R}^n$ в себя.

Например, отображение (9.16) $\tilde{AX} = T + \Gamma X$ является преобразованием пространства $\mathbb{R}^n$ в себя.

Определение 9.3. Отображение $\tilde{A}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ преобразованием сжатия, или сжимающим преобразованием, если существует $\alpha \in \mathbb{R}$, $0 < \alpha < 1$, такое, что

$$\forall X_1, X_2 \in \mathbb{R}^n \Rightarrow \|\tilde{AX}_2 - \tilde{AX}_1\| \leq \alpha \|X_2 - X_1\|. \quad (9.21)$$

Неравенство (9.21) означает, что при сжимающем отображении расстояние $\rho(\tilde{AX}_1, \tilde{AX}_2) = \|\tilde{AX}_2 - \tilde{AX}_1\|$ между образами $\tilde{AX}_1$ и $\tilde{AX}_2$ любых двух элементов пространства $\mathbb{R}^n$ меньше расстояния $\rho(X_1, X_2) = \|X_2 - X_1\|$ между их прообразами X_1 и X_2 .

Найдем условия, при которых преобразование $\tilde{AX} = T + \Gamma X$ будет сжимающим. Используя свойство 4 нормы матрицы, получаем

$$\begin{aligned} \|\tilde{AX}_2 - \tilde{AX}_1\| &= \|T + X_2 - (T + X_1)\| = \|\Gamma \cdot (X_2 - X_1)\| \leq \\ &\leq \|\Gamma\| \cdot \|X_2 - X_1\|. \end{aligned}$$

Сопоставив данное неравенство с неравенством (9.21), приходим к выводу, что рассматриваемое преобразование будет сжимающим, если норма матрицы Γ будет удовлетворять условию

$$0 < \|\Gamma\| < 1. \quad (9.22)$$

Покажем теперь, что приведенное уравнение (9.16), в котором матрица Γ удовлетворяет условию (9.22), имеет единственное решение. Справедлива следующая теорема.

Теорема 9.2. Уравнение $X = T + \Gamma X$ имеет единственное решение, если норма матрицы Γ удовлетворяет условию (9.22).

Доказательство. Возьмем произвольный вектор $X^{(0)} \in \mathbb{R}^n$ и построим последовательность точек (векторов) $\{X^{(k)}\}$ по правилу

$$X^{(k)} = T + \Gamma X^{(k-1)}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (9.23)$$

Это общая формула итерационного процесса (9.17). Сначала докажем сходимость данной последовательности к некоторому

вектору $X^* \in \mathbb{R}^n$. Затем докажем, что этот вектор является решением уравнения (9.16), т. е. $T + \Gamma X^* = X^*$.

В пространстве $\mathbb{R}^n$ всякая последовательность $\{X^{(k)}\}$, удовлетворяющая условию

$$\forall \varepsilon > 0 \exists K(\varepsilon) \in \mathbb{N} : \forall k > K(\varepsilon) \quad m \in \mathbb{N} \Rightarrow \|X^{(k+m)} - X^{(k)}\| < \varepsilon, \quad (9.24)$$

т. е. являющаяся фундаментальной последовательностью, сходится. Применив k раз неравенство треугольника для нормы, получим

$$\begin{aligned} \|X^{(k+m)} - X^{(k)}\| &\leq \|X^{(k+m)} - X^{(k+1)}\| + \|X^{(k+1)} - X^{(k)}\| \leq \\ &\leq \|X^{(k+m)} - X^{(k+2)}\| + \|X^{(k+2)} - X^{(k+1)}\| + \\ &+ \|X^{(k+1)} - X^{(k)}\| \leq \dots \leq \|X^{(k+1)} - X^{(k)}\| + \\ &+ \|X^{(k+2)} - X^{(k+1)}\| + \dots + \|X^{(k+m)} - X^{(k+m-1)}\|. \end{aligned} \quad (9.25)$$

Поскольку $X^{(k+s)} = \tilde{A}X^{(k+s-1)} = T + \Gamma X^{(k+s-1)}$ и норма матрицы Γ удовлетворяет условию (9.22), то преобразование $\tilde{A}X$ является преобразованием сжатия и потому для каждой нормы $\|X^{(k+s)} - X^{(k+s-1)}\|$ в (9.25) выполняется неравенство

$$\begin{aligned} \|X^{(k+s)} - X^{(k+s-1)}\| &\leq \|T + \Gamma X^{(k+s-1)} - (T + \Gamma X^{(k+s-2)})\| = \\ &= \|\Gamma(X^{(k+s-1)} - X^{(k+s-2)})\| \leq \alpha \|X^{(k+s-1)} - X^{(k+s-2)}\| = \\ &= \alpha \|T + \Gamma X^{(k+s-2)} - (T + \Gamma X^{(k+s-3)})\| \leq \\ &\leq \alpha^2 \|X^{(k+s-2)} - X^{(k+s-3)}\| \leq \dots \leq \alpha^{k+s} \|X^{(1)} - X^{(0)}\|. \end{aligned} \quad (9.26)$$

Здесь $\alpha = \|\Gamma\|$. Преобразуем оценку (9.25) с учетом неравенства (9.26):

$$\begin{aligned} \|X^{(k+m)} - X^{(k)}\| &\leq (\alpha^k + \alpha^k + \dots + \alpha^{k+m-1}) \|X^{(1)} - X^{(0)}\| = \\ &= \alpha^k \frac{1 - \alpha^m}{1 - \alpha} \|X^{(1)} - X^{(0)}\|. \end{aligned}$$

Поскольку $0 < \alpha < 1$ и $1 - \alpha^m < 1$, то получаем окончательную оценку

$$\|X^{(k+m)} - X^{(k)}\| \leq \frac{\alpha^k}{1 - \alpha} \|X^{(1)} - X^{(0)}\|. \quad (9.27)$$

Из (9.27) с учетом того, что $\alpha^k \rightarrow 0$ при $k \rightarrow \infty$, следует, что для любого сколь угодно малого $\varepsilon > 0$ найдется номер k , для которого будет выполняться неравенство (9.24). Значит, действительно

последовательность $\{X^{(k)}\}$ является фундаментальной и потому сходится к некоторому предельному вектору $X^* \in \mathbb{R}^n$.

Докажем теперь, что вектор X^* является решением уравнения (9.16). В соответствии с первой частью доказательства существует $\lim_{k \rightarrow \infty} X^{(k)} = X^*$. Одновременно для каждого $k \in \mathbb{N}$ справедливо равенство $X^{(k)} = T + GX^{(k-1)}$. Переходя к пределу в этом равенстве при $k \rightarrow \infty$, получаем искомое утверждение $T + GX^* = X^*$. ■

Таким образом, достаточным условием существования решения уравнения (9.16), отвечающего СЛАУ (9.13), является условие (9.22), т. е. $0 < \|\Gamma\| < 1$.

Заметим, что нарушение условия (9.22) может приводить к расходимости итерационного процесса в методе последовательных приближений. Однако это еще не означает, что СЛАУ (9.13) и равносильная ей система уравнений (9.16) являются несовместными (не имеют решений) или совместными, но неопределенными (имеют бесконечно много решений). Условие (9.22) является *достаточным* для существования *единственного* решения СЛАУ (9.13) и, в частности, гарантирует его нахождение с помощью итерационного процесса (9.21) с любой (практически важной) степенью точности.

С учетом формул (9.18)–(9.20) условие (9.22) можно конкретизировать:

$$0 < \max_i \sum_{j=1}^n |\gamma_{ij}| < 1, \quad \text{или} \quad 0 < \max_j \sum_{i=1}^n |\gamma_{ij}| < 1, \quad (9.28)$$

$$\text{или } 0 < \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \gamma_{ij}^2} < 1.$$

Выполним анализ рассмотренных примеров 9.2 и 9.3 с учетом полученных результатов, а именно, выполнимости достаточных условий (9.28) сходимости итерационного процесса.

$$\text{В примере 9.2: } \Gamma = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{5} & \frac{2}{5} \\ \frac{1}{5} & 0 & \frac{2}{5} \\ -\frac{1}{5} & -\frac{1}{5} & 0 \end{pmatrix},$$

$$\|\Gamma\|_1 = \max \left\{ \left| -\frac{1}{5} \right| + \frac{2}{5}; \frac{1}{5} + \frac{2}{5}; \left| -\frac{1}{5} \right| + \left| -\frac{1}{5} \right| \right\} = \frac{3}{5} < 1,$$

$$\|\Gamma\|_2 = \max \left\{ \frac{2}{5}; \frac{2}{5}; \frac{4}{5} \right\} = \frac{4}{5} < 1,$$

$$\|\Gamma\|_3 = \sqrt{\frac{1}{25} + \frac{4}{25} + \frac{1}{25} + \frac{4}{25} + \frac{1}{25} + \frac{1}{25}} = \frac{2}{5}\sqrt{3} < 1.$$

Таким образом, в примере 9.2 достаточное условие сходимости итерационного процесса выполняется. Заметим, что было достаточно вычислить лишь одну из трех матричных норм.

В примере 9.3: $\Gamma = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -2 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 0 \end{pmatrix},$

$$\|\Gamma\|_1 = \max \left\{ 2; 3; \frac{3}{4} \right\} = 3 > 1,$$

$$\|\Gamma\|_2 = \max \left\{ \frac{5}{2}; \frac{5}{4}; 2 \right\} = 2 > 1,$$

$$\|\Gamma\|_3 = \sqrt{1 + 1 + 4 + 1 + \frac{1}{4} + \frac{1}{16}} > 1.$$

Как видим, здесь достаточное условие сходимости итерационного процесса не выполняется.

В соответствии с теоремой 9.2 итерационный процесс $X^{(m)} = T + GX^{(m-1)}$ в примере 9.2 сходится к решению исходной СЛАУ, а в примере 9.3 он может расходиться.

Замечание. Приведенная система уравнений $X = T + GX$ получается из СЛАУ $AX = B$ умножением на коэффициент $1/a_{ii}$ и последующим выражением x_i через остальные переменные. Но тогда для первой нормы $\|A\|_1$ имеем

$$\begin{aligned} \max_i \sum_{j=1}^n |\gamma_{ij}| &= \\ &= \max_{i=1, n} \left\{ \left| \frac{a_{i1}}{a_{ii}} \right| + \left| \frac{a_{i2}}{a_{ii}} \right| + \cdots + \left| \frac{a_{i,i-1}}{a_{ii}} \right| + \left| \frac{a_{i,i+1}}{a_{ii}} \right| + \cdots + \left| \frac{a_{in}}{a_{ii}} \right| \right\} < 1. \end{aligned}$$

Полученное условие эквивалентно следующему:

$$\begin{aligned} \forall i = 1, 2, \dots, n \Rightarrow \\ \Rightarrow (|a_{i1}| + |a_{i2}| + \cdots + |a_{i,i-1}| + |a_{i,i+1}| + \cdots + |a_{in}|) < |a_{ii}|, \end{aligned}$$

т. е. модуль диагонального элемента a_{ii} каждой строки матрицы A должен быть больше суммы модулей остальных элементов этой строки (заметим, не преобразованной матрицы Γ , а исходной A). При этом говорят, что матрица A должна иметь *диагональное преобладание*.

Исследуем с учетом данного замечания основные матрицы СЛАУ в примерах 9.2 и 9.3. В примере 9.2: $A = \begin{pmatrix} 5 & 1 & -2 \\ -1 & 5 & -2 \\ 1 & 1 & 5 \end{pmatrix}$;

$$|a_{11}| = 5 > |a_{12}| + |a_{13}| = 3,$$

$$|a_{22}| = 5 > |a_{12}| + |a_{23}| = 3, \quad |a_{33}| = 5 > |a_{13}| + |a_{23}| = 2.$$

В данном примере матрица A имеет диагональное преобладание и это является достаточным условием сходимости итерационного процесса.

В примере 9.3: $A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 4 & 2 & -2 \\ 2 & -1 & 4 \end{pmatrix}$;

$$|a_{11}| = 1 < |-1| + 1 = 2,$$

$$|a_{22}| = 2 < 4 + |-2| = 6, \quad |a_{33}| = 4 > 2 + |-1| = 3.$$

Здесь матрица A не имеет диагонального преобладания и потому *итерационный процесс* (9.23) для приведенной системы уравнений *может расходиться*, хотя, как уже отмечалось, исходная система уравнений

$$\begin{cases} x_1 - x_2 + x_3 = 2, \\ 2x_1 + x_2 - x_3 = 1, \\ 2x_1 - x_2 + 4x_3 = 12 \end{cases}$$

имеет в данном случае единственное решение $X = (1; 2; 3)^T$.

59.3. Требуемые ресурсы ЭВМ и число операций

Затраты памяти ЭВМ:

- n^2 ячеек для хранения матрицы A и в ней же, по мере освобождения ячеек памяти, матрицы $\Gamma = (\gamma_{ij})_{n \times n}$;
- n ячеек для хранения вектора B и в них же вектора T ;
- n ячеек для вектора X .

Общий объем оперативной памяти ЭВМ, необходимой для реализации метода итераций, равен $(n^2 + 2n)$ ячеек.

Число вычислительных операций. Если исключить затраты на преобразование СЛАУ (9.13) к виду (9.16), то получим чистые затраты времени на реализацию метода итераций. Будем иметь:

- n^2 операций умножения (умножение матрицы Γ на вектор X) для получения одного приближения $X^{(m)}$;
- $n(n-1) + n = n^2$ операций сложения для получения оценки $X^{(m)}$ вектора X на m -й итерации.

Если общее число итераций будет равно k , то число операций умножения и сложения увеличивается в k раз, т. е. суммарное число операций в методе итераций будет равно $N(*) = N(+) = kn^2$.

Сравнение метода итераций с другими методами. Затраты памяти ЭВМ в методе итераций такие же, как и в методе Гаусса, и в два раза больше (для СЛАУ с симметричной основной матрицей A), чем в методе квадратных корней.

Напомним, что число медленных операций равно в методе Гаусса $\frac{n^3}{3} + O(n^2)$, в методе квадратного корня $\frac{n^3}{6} + O(n^2)$. В методе итераций число медленных операций (kn^2) зависит от скорости сходимости итерационного процесса (числа итераций k). Если $k \ll n$, то метод итераций существенно превосходит по скорости и метод Гаусса, и метод квадратного корня. Если же k имеет тот же порядок, что и n , то затраты времени на решение СЛАУ $AX = B$ методом итераций и методом Гаусса будут сопоставимы по величине. Так, если $n = 10^4$, $k = 50$, то число медленных операций будет равно в методе Гаусса $10^{12}/3$, а в методе итераций $5 \cdot 10^9$ медленных операций, или в 67 раз меньше. Такие СЛАУ — 10000 уравнений с 10000 неизвестных — возникают, например, при решении задач восстановления спектров поверхностей в электронике.

59.4. Модификации метода итераций

Одной из наиболее известных модификаций метода итераций является *метод Зейделя*. Смысл модификации заключается в том, что при вычислении компонент $x_i^{(k)}$ вектора $X^{(k)}$ на k -й итерации сразу же учитываются предыдущие оценки компонент $x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_{i-1}^{(k)}$ — векторы $X^{(k)}$, вычисленные на предыдущих шагах итерационного процесса. Если $X^{(k)} = T + \Gamma X^{(k-1)}$, то в методе Зейделя

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1^{(k)} = t_1 + \sum_{j=1}^n \gamma_{1j} x_j^{(k-1)}, \\ x_2^{(k)} = t_2 + \gamma_{21} x_1^{(k)} + \sum_{j=2}^n \gamma_{2j} x_j^{(k-1)}, \\ x_3^{(k)} = t_3 + \gamma_{31} x_1^{(k)} + \gamma_{32} x_2^{(k)} + \sum_{j=3}^n \gamma_{3j} x_j^{(k-1)}, \\ \dots\dots\dots \\ x_n^{(k)} = t_n + \sum_{j=1}^{n-1} \gamma_{nj} x_j^{(k)} + \gamma_{nn} x_n^{(k-1)}. \end{array} \right. \quad (9.29)$$

Во многих случаях метод Зейделя сходится быстрее метода итераций. Рассмотрим соответствующий пример.

Пример 9.4. Решить СЛАУ (из примера 9.2)

$$\begin{cases} 5x_1 + x_2 - 2x_3 = 15, \\ -x_1 + 5x_2 - 2x_3 = 5, \\ x_1 + x_2 + 5x_3 = 10 \end{cases}$$

методом Зейделя.

Решение. Приведенная СЛАУ:

$$X = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} + \frac{1}{5} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 2 \\ 1 & 0 & 2 \\ -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}.$$

Решением СЛАУ является вектор $X^* = (3 \ 2 \ 1)^\top$. Он необходим для сопоставления скорости сходимости итерационных процессов. Пусть $X^0 = (3 \ 1 \ 2)^\top$. В соответствии с алгоритмом метода Зейделя (9.29) имеем далее:

$$x_1^{(1)} = 3 + \frac{1}{5} (0 \ -1 \ 2) \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} = \frac{18}{5} = 3,6,$$

$$x_2^{(1)} = 1 + \frac{1}{5} (1 \ 0 \ 2) \begin{pmatrix} \frac{18}{5} \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} = \frac{63}{25} = 2,520,$$

$$x_3^{(1)} = 2 + \frac{1}{5} \begin{pmatrix} -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{18}{5} \\ \frac{63}{25} \\ \frac{2}{2} \end{pmatrix} = \frac{97}{125} = 0,7760,$$

$$\rho(X^{(1)}, X^*) = \sqrt{(3,6 - 3)^2 + (2,52 - 2)^2 + (0,776 - 1)^2} = 0,825,$$

$$x_1^{(2)} = 3 + \frac{1}{5} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3,600 \\ 2,520 \\ 0,776 \end{pmatrix} = 2,8064,$$

$$x_2^{(2)} = 1 + \frac{1}{5} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2,8064 \\ 2,5200 \\ 0,7760 \end{pmatrix} = 1,8717,$$

$$x_3^{(2)} = 2 + \frac{1}{5} \begin{pmatrix} -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2,8064 \\ 1,8717 \\ 0,7760 \end{pmatrix} = 1,0644,$$

$$\rho(X^{(2)}, X^*) = \sqrt{(2,8064 - 3)^2 + (1,8717 - 2)^2 + (1,0644 - 1)^2} = 0,241;$$

$$x_1^{(3)} = 3 + \frac{1}{5} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2,8064 \\ 1,8717 \\ 1,0644 \end{pmatrix} = 3,0514,$$

$$x_2^{(3)} = 1 + \frac{1}{5} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3,0514 \\ 1,8717 \\ 1,0644 \end{pmatrix} = 2,0360,$$

$$x_3^{(3)} = 2 + \frac{1}{5} \begin{pmatrix} -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3,0514 \\ 2,0360 \\ 1,0644 \end{pmatrix} = 0,9825,$$

$$\rho(X^{(3)}, X^*) = \sqrt{(3,0514 - 3,0)^2 + (2,036 - 2,0)^2 + (0,9825 - 1)^2} = 0,065;$$

$$x_1^{(4)} = 3 + \frac{1}{5} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3,0514 \\ 2,0360 \\ 0,9825 \end{pmatrix} = 2,9858,$$

$$x_2^{(4)} = 1 + \frac{1}{5} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2,9858 \\ 2,0360 \\ 0,9825 \end{pmatrix} = 1,9902,$$

$$x_3^{(4)} = 2 + \frac{1}{5} \begin{pmatrix} -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2,9858 \\ 1,9902 \\ 0,9825 \end{pmatrix} = 1,0048,$$

$$\rho(X^{(4)}, X^*) = \sqrt{(2,9858-3,0)^2 + (1,9902-2,0)^2 + (1,0048-1)^2} = 0,018. \blacksquare$$

Напомним, что решение этой же СЛАУ методом итераций дало следующие результаты (пример 9.2):

$$\rho(X^{(1)}, X^*) \approx 0,748; \quad \rho(X^{(2)}, X^*) \approx 0,283;$$

$$\rho(X^{(3)}, X^*) \approx 0,150; \quad \rho(X^{(4)}, X^*) \approx 0,057.$$

Как видим, решение методом Зейделя системы уравнений сходится к X^* быстрее, чем методом простой итерации.

§ 60. Нормальные СЛАУ

Определение 9.4. $AX = B$ и ее основная матрица A называются *нормальными*, если:

- 1) $A^\top = A$, т. е. матрица A симметричная;
- 2) A определена положительно, т. е.

$$\forall X \in \mathbb{R}^n, \quad X \neq 0: X^\top AX > 0.$$

Имеет место следующая теорема.

Теорема 9.3. Если обе части СЛАУ $AX = B$ с невырожденной матрицей A умножить слева на транспонированную матрицу $A^\top$, то полученная СЛАУ

$$(A^\top A)X = A^\top B \tag{9.30}$$

будет нормальной.

Доказательство. 1) Докажем, что матрица $A^\top A$ симметрична, т. е. $(A^\top A)^\top = A^\top A$. Имеем

$$(A^\top A)^\top = A^\top (A^\top)^\top = A^\top A.$$

2) Докажем теперь положительную определенность матрицы $A^\top A$, т. е. $\forall X \in \mathbb{R}^n: X \neq 0 \Rightarrow X^\top A^\top A X > 0$. Имеем

$$X^\top A^\top A X = (AX)^\top (AX) = Y^\top Y. \tag{9.31}$$

Здесь $Y = AX$. По условию теоремы матрица A является невырожденной: $X \neq 0$, поэтому $Y = AX \neq 0$ и, как следствие, $Y^T Y > 0$. Отсюда с учетом (9.31) следует, что $\forall X \in \mathbb{R}^n$, $X \neq 0$: $X^T A^T A X > 0$. ■

Выше уже отмечалось, что в практике решения прикладных математических задач часто встречаются СЛАУ с симметричной и положительно определенной основной матрицей СЛАУ, т. е. нормальные СЛАУ. Для их решения целесообразно использовать метод квадратных корней. Вместе с тем при определенных условиях, например большом порядке СЛАУ ($n > 10^3$), выгоднее, с точки зрения затрат машинного времени, использовать метод итераций.

Приведем без доказательства следующую теорему.

Теорема 9.4. *Если СЛАУ $AX = B$ является нормальной, то метод Зейделя для эквивалентной ей приведенной СЛАУ $X = T + GX$ сходится при любом выборе начального вектора X^0 .*

§ 61. Метод прогонки

61.1. Постановка задачи

Частный, но очень важный случай представляют СЛАУ $AX = B$, основная матрица A которых имеет вид

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{n,n-1} & a_{nn} \end{pmatrix}. \quad (9.32)$$

Матрицы A , у которых все или часть элементов на главной диагонали и на части диагоналей, примыкающих к ней и параллельных ей, так называемых *кодиагоналей*, отличны от нуля, а остальные элементы матрицы равны нулю, называются *ленточными*.

Общее число диагоналей с отличными от нуля элементами называется *шириной ленты*. Матрица (9.32) имеет ширину ленты $L = 3$ (трехдиагональная матрица).

Системы уравнений с ленточными матрицами возникают при решении многих прикладных задач. Для решения СЛАУ с ленточными матрицами можно использовать те же методы, что и в общем случае: метод Гаусса, метод квадратного корня (если A — симметричная и положительно определенная матрица),

метод итераций и т. п. Если при этом программная реализация алгоритма учитывает ленточность матрицы A , то при $L \ll n$ (n — порядок СЛАУ) достигается существенный выигрыш в количестве вычислительных операций.

Системы уравнений $AX = B$ с трехдиагональной матрицей A возникают при решении разностных уравнений, при разностной аппроксимации дифференциальных уравнений второго порядка и задач на собственные значения.

Пусть, например, решается задача Штурма–Лиувилля на собственные значения: найти значения λ и отвечающие им нетривиальные решения $y(x)$:

$$\begin{cases} y'' + \lambda y = 0, & a < x < b, \\ y(a) = y(b) = 0. \end{cases} \quad (9.33)$$

Введем на отрезке $[a, b]$ равномерную *сетку*

$$\begin{aligned} x_0, x_1, \dots, x_n: & x_i - x_{i-1} = h \quad \forall i = \overline{1, n}, \\ a = x_0 & < x_1 < x_2 < \dots < x_n = b, \\ \Delta x_i = \frac{b-a}{n} = h, & \quad x_i = x_0 + (i-1)h, \quad i = \overline{1, n}. \end{aligned}$$

Обозначим $y(x_i) = y_i$, $i = 1, 2, \dots, n-1$. При этом $y_0 = y_n = 0$ в силу краевых условий. Полагая $y''(x_i) = \frac{y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}}{h^2}$, $i = 1, 2, \dots, n-1$, получаем разностный аналог задачи (9.33)

$$\begin{cases} \frac{y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}}{h^2} + \lambda y_i = 0, & i = 1, 2, \dots, n-1, \\ y_0 = y_n = 0, \end{cases}$$

или в матричной форме

$$(A + \lambda h^2 E)Y = 0, \quad (9.34)$$

где

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad Y = \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}.$$

Система линейных алгебраических уравнений (9.34) — дискретный аналог задачи на собственные значения (9.33). Одновременно при известном λ — это однородная СЛАУ с трехдиагональной матрицей $A' = A + \lambda h^2 E$.

Рассмотрим еще один пример. Пусть

$$\begin{cases} y'' + p(x)y = f(x), & a < x < b, \\ y(a) = A, & y(b) = B \end{cases} \quad (9.35)$$

— краевая задача. Ее дискретным аналогом будет система уравнений

$$\begin{aligned} \frac{y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}}{h^2} + p_i y_i &= f_i, & i = \overline{1, n-1}, \\ y_0 &= A, & y_n &= B. \end{aligned} \quad (9.36)$$

Здесь $p_i = p(x_i)$, $f_i = f(x_i)$. В матричной форме система уравнений (9.36) будет иметь следующий вид:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & -2 + p_1 h^2 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 + p_2 h^2 & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -2 + p_{n-1} h^2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{n-1} \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \\ h^2 f_1 \\ h^2 f_2 \\ \vdots \\ h^2 f_{n-1} \\ B \end{pmatrix}.$$

В обоих примерах получились СЛАУ с трехдиагональными матрицами. Для решения таких систем уравнений используется эффективный алгоритм, называемый *методом прогонки* и являющийся частным случаем метода Гаусса.

61.2. Алгоритм метода

Пусть

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{n,n-1} & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} \quad (9.37)$$

— система линейных уравнений с трехдиагональной основной матрицей A .

Прямой ход метода прогонки. Для приведения расширенной матрицы такой СЛАУ к ступенчатой форме на каждом i -м шаге ($i = 1, 2, \dots, n - 1$) прямого хода метода Гаусса необходимо пересчитать лишь два элемента $(i + 1)$ -й строки расширенной матрицы $(A|B)$. Действительно, элементы нижней кодиагонали после прямого хода должны обратиться в нуль, и потому их можно не вычислять, а элементы верхней кодиагонали остаются без изменения. Пересчитать на i -м шаге необходимо лишь элемент $a_{i+1,i+1}$ главной диагонали основной матрицы СЛАУ и свободный член b_{i+1} .

Таким образом, на каждом шаге прямого хода метода прогонки вычисляем:

$$\begin{aligned} 1) \alpha_i &= \frac{a_{i+1,i}}{a'_{ii}} - \text{рабочий коэффициент } i\text{-го шага;} \\ 2) \quad a'_{i+1,i+1} &= a_{i+1,i+1} - \alpha_i a_{i,i+1}, \\ b'_{i+1} &= b_{i+1} - \alpha_i b'_i, \quad i = 1, 2, \dots, n - 1. \end{aligned} \quad (9.38)$$

При этом на первом шаге $a'_{11} = a_{11}$, $b'_1 = b_1$.

Обратный ход метода прогонки. После прямого хода метода Гаусса получим равносильную систему уравнений с двухдиагональной треугольной матрицей

$$\begin{pmatrix} a'_{11} & a_{12} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & a'_{22} & a_{23} & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a'_{33} & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & a'_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b'_1 \\ b'_2 \\ b'_3 \\ \vdots \\ b'_n \end{pmatrix}.$$

Двигаясь снизу вверх, находим последовательно решения системы уравнений

$$\begin{aligned} x_n &= \frac{b'_n}{a'_{nn}}, \\ x_i &= \frac{b'_i - a_{i,i+1}x_{i+1}}{a'_{ii}}, \quad i = n - 1, n - 2, \dots, 2, 1. \end{aligned} \quad (9.39)$$

61.3. Требуемые ресурсы ЭВМ и число операций

Для хранения элементов матрицы A порядка n необходимо $(3n - 2)$ ячеек. В них же, по мере освобождения ячеек, можно записать $(2n - 1)$ элементов a'_{ij} преобразованной матрицы A' . Для хранения элементов вектора-столбца B исходной системы

уравнений необходимо еще n ячеек. В итоге для решения на ЭВМ трехдиагональной СЛАУ (9.37) достаточно $(4n - 2)$ ячеек ее оперативной памяти.

Оценим число вычислительных операций в методе прогонки. Все вычисления проводятся по формулам (9.38), (9.39). Сохраняя принятые ранее обозначения для арифметических операций, получаем:

прямой ход: $N(*) = 2(n - 1)$, $N(/) = n - 1$, $N(\pm) = 2(n - 1)$;

обратный ход: $N(*) = n - 1$, $N(/) = n$, $N(\pm) = n - 1$.

В результате общее количество медленных операций будет равно $5n - 4$, а быстрых $3(n - 1)$.

Пример 9.5. Решить методом прогонки систему уравнений

$$\begin{cases} 2x_1 + x_2 = 1, \\ 4x_1 - 2x_2 + 2x_3 = 10, \\ 2x_2 + 3x_3 + x_4 = 2, \\ -2x_3 + x_4 + 2x_5 = 0, \\ 3x_4 + x_5 = -3. \end{cases}$$

Решение. Запишем систему уравнений в матричной форме

$$\begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & -2 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 10 \\ 2 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix}.$$

Прямой ход. Исходная система уравнений имеет 5-й порядок, поэтому прямой ход метода Гаусса в данном примере будет состоять из 4 шагов. В соответствии с формулами (9.35) на каждом шаге вычисляем:

$$1. \alpha_1 = \frac{4}{2} = 2, \quad a'_{22} = -2 - 2 \cdot 1 = -4, \quad b'_2 = 10 - 2 \cdot 1 = 8;$$

$$2. \alpha_2 = \frac{2}{-4} = -0,5, \quad a'_{33} = 3 + 0,5 \cdot 2 = 4, \quad b'_3 = 2 + 0,5 \cdot 8 = 6;$$

$$3. \alpha_3 = \frac{-2}{4} = -0,5, \quad a'_{44} = 1 + 0,5 \cdot 1 = 1,5, \quad b'_4 = 0 + 0,5 \cdot 6 = 3;$$

$$4. \alpha_4 = \frac{3}{1,5} = 2, \quad a'_{55} = 1 - 2 \cdot 2 = -3, \quad b'_5 = -3 - 2 \cdot 3 = -9.$$

После прямого хода система уравнений, равносильная исходной СЛАУ, будет иметь следующий вид:

$$\begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -4 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,5 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 8 \\ 6 \\ 3 \\ -9 \end{pmatrix}.$$

Это верхняя треугольная матрица с двумя ненулевыми диагоналями. Решение такой СЛАУ легко находится в результате обратного хода метода Гаусса.

Обратный ход. Двигаясь снизу вверх, последовательно находим решение полученной треугольной системы уравнений по формулам (9.39):

$$x_5 = -\frac{9}{(-3)} = 3, \quad x_4 = \frac{(3 - 2 \cdot 3)}{1,5} = 2, \quad x_3 = \frac{(6 - 1 \cdot (-2))}{4} = 2, \\ x_2 = \frac{(8 - 2 \cdot 2)}{(-4)} = -1, \quad x_1 = \frac{(1 - 1 \cdot (-1))}{2} = 1.$$

Ответ: $X = (1 \ -1 \ 2 \ -2 \ 3)^\top$.

Заключение к главе 9

При решении реальных естественно-научных и технических задач, сводящихся к задачам линейной алгебры и, в частности, к системам линейных алгебраических уравнений, удобно пользоваться специальными системами компьютерной математики такими, как MathCad, MATLAB и Maple. Эти математические пакеты имеют специальные возможности для исследования и решения СЛАУ. Естественно, они (возможности) не ограничиваются только этим. Например, в пакете MATLAB имеется обширная библиотека программ для обработки изображений различной природы (телевизионных, тепловизионных, радиолокационных и др.).

Значительная часть алгоритмов компьютерной обработки изображений основывается на операциях с матрицами, а пакет MATLAB разрабатывался как раз для выполнения матричных операций. Визуально изображение представляет собой фотографию участка местности или какого-то объекта и состоит из большого числа пикселей различной яркости. С позиций компьютерной математики изображение — это матрица размера $m \times n$,

в ячейки которой записаны целые числа — значения яркости соответствующих пикселей на изображении.

В каждом пакете MathCad, MATLAB и Maple имеется свой набор функций (программ), позволяющих реализовывать операции с матрицами. Приведем пример решения СЛАУ методом Гаусса в системе MathCad (пример 1.14).

Для этого требуется:

1) ввести основную матрицу A размером $m \times n$ и столбец свободных членов B размером $m \times 1$ (в нашем случае 4×3 и 4×1):

$$A := \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 2 & 1 & -3 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & -2 & -3 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix};$$

2) получить расширенную матрицу системы $A1$, объединив матрицы A и B в одну с помощью функции **augment** ($\text{augment}(A, B)$ возвращает матрицу, полученную в результате приписывания к матрице A справа столбца B):

$$A1 := \text{augment}(A, B), \quad A1 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 & -1 \\ 2 & 1 & -3 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & -2 & -3 & -1 \end{pmatrix};$$

3) проверить совместность СЛАУ, вычислив и сравнив ранги матриц A и $A1$ с помощью функции **rank** ($\text{rank}(A)$ возвращает ранг матрицы A)

$$\text{rank}(A) = 3, \quad \text{rank}(A1) = 3.$$

Поскольку $\text{rank}(A) = \text{rank}(A1)$, то в соответствии с теоремой Кронекера–Капелли СЛАУ имеет решение и при этом единственное, так как ранг матриц равен числу неизвестных системы;

4) привести расширенную матрицу к ступенчатому виду с помощью функции **rref** ($\text{rref}(A1)$ возвращает ступенчатую матрицу C , полученную из матрицы $A1$ с помощью элементарных преобразований):

$$C := \text{rref}(A1), \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

5) из полученной ступенчатой матрицы выделить последний столбец, первые n элементов которого являются искомым решением СЛАУ. Для этого с помощью функции **cols** ($\text{cols}(A)$ возвращает число столбцов в матрице A) определяем число неизвестных в СЛАУ. Затем с помощью функции **submatrix** ($\text{submatrix}(A, i_1, i_2, j_1, j_2)$ возвращает подматрицу матрицы A , состоящую из элементов строк от i_1 до i_2 и столбцов от j_1 до j_2) получаем решение системы:

$$n = \text{cols}(A),$$

$$x := \text{submatrix}(C, 1, n, n + 1, n + 1), \quad x = \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Список дополнительной литературы

1. *Ильин В. А., Позняк Э. Г.* Линейная алгебра. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 280 с.
2. *Ильин В. А., Позняк Э. Г.* Аналитическая геометрия. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. — 224 с.
3. *Фаддеев Д. К.* Лекции по алгебре. — М.: Наука, 1984. — 415 с.
4. *Головина Л. И.* Линейная алгебра и некоторые ее приложения. — М.: Наука, 1984. — 392 с.
5. *Беклемишев Д. В.* Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 312 с.
6. *Канатников А. Н., Крищенко А. П.* Аналитическая геометрия. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. — 388 с.
7. *Моденов П. С.* Аналитическая геометрия. — М.: Изд-во Московского университета, 1969. — 698 с.
8. *Александров П. С.* Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. — М.: Наука, 1979. — 512 с.
9. *Демидович Б. П., Марон И. А.* Основы вычислительной математики. — М.: Наука, 1966. — 664 с.
10. *Алексеев Е. Р., Чеснокова О. В.* Решение задач вычислительной математики в пакетах MathCad 12, MATLAB 7, Maple 9. — М.: НТ Пресс, 2006. — 496 с.

Сборники задач

11. Сборник задач по математике для втузов. В 4 ч. Ч. 1: Учебное пособие для втузов / Под общ. ред. А. В. Ефимова и А. С. Пospelова. — 4-е изд. — М.: Издательство физико-математической литературы, 2003. — 288 с.
12. *Кузнецов Л. А.* Сборник заданий по высшей математике. — М.: Высшая школа, 2005. — 175 с.

Учебное издание

НОВИКОВ Анатолий Иванович

**НАЧАЛА ЛИНЕЙНОЙ АЛГЕБРЫ
И АНАЛИТИЧЕСКАЯ ГЕОМЕТРИЯ**

Редактор *В.С. Аролович*

Оригинал-макет: *Е.В. Сабеева*

Оформление переплета: *Д.Б. Белуха*

Подписано в печать 19.03.2015. Формат 60×90/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 23,5.
Уч.-изд. л. 25,9. Тираж 300 экз. Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература»
МАИК «Наука/Интерпериодика»
117342, Москва, ул. Бутлерова, 17 Б
E-mail: fizmat@maik.ru, fmale@maik.ru;
<http://www.fml.ru>

Отпечатано с электронных носителей издательства
в «ОАО «ИПК «Чувашия»,
428019 г. Чебоксары, пр-т И. Яковлева, 13

ISBN 978-5-9221-1618-3



9 785922 116183