

ЛЕКЦИЯ 1

Определение 1. Пусть G – некоторое множество. n -арной операцией на множестве G называется отображение

$$G \times \dots \times G \rightarrow G$$

из n -ой декартовой степени множества G в множество G .

Рассмотрим бинарную операцию $*$ на множестве G :

$$G \times G \rightarrow G, \quad (g_1, g_2) \rightarrow g_1 * g_2.$$

Определение 2. Непустое множество G с фиксированной бинарной операцией $*$ называется *группоидом*.

Рассмотрим следующие условия (аксиомы) на операцию $*$.

A1. Ассоциативность. Для любых элементов $a, b, c \in G$ выполнено $(a*b)*c = a*(b*c)$.

A2. Существование нейтрального элемента. Существует такой элемент $e \in G$, что для любого $g \in G$ выполняется $eg = ge = g$.

A3. Существование обратного элемента. Для каждого элемента $g \in G$ существует элемент $g^{-1} \in G$ такой, что $g * g^{-1} = g^{-1} * g = e$.

A4. Коммутативность. Для любых элементов $a, b \in G$ выполнено $a * b = b * a$.

Накладывая на операцию $*$ различные множества условий, мы будем получать различные алгебраические структуры.

Определение 3. Если $*$ удовлетворяет условию A1, то G называется *полугруппой*.

Если $*$ удовлетворяет условиям A1 и A2, то G называется *моноидом*.

Если $*$ удовлетворяет условиям A1 и A2 и A3, то G называется *группой*.

Условие A4 добавляет к названию структуры слово абелев (или, что то же самое, коммутативный). Так условия A1 и A4 задают *абелеву (коммутативную) полугруппу*, условия A1, A2 и A4 задают *абелев (коммутативный) моноид*, условия A1, A2, A3 и A4 задают *абелеву (коммутативную) группу*.

Обозначение 1. Если не очевидно, какая операция на множестве G имеется в виду, то будем использовать обозначение $(G, *)$ для множества G с операцией $*$.

Упражнение 1. Рассмотрим аксиому, являющуюся "половиной" аксиомы A2.

A2': Существует такой элемент $e \in G$, что для любого $g \in G$ выполняется $eg = g$. Докажите, что если структура $(G, *)$ удовлетворяет условиям A1, A2' и A3, то G является группой.

Задача 1. Рассмотрим аксиому, являющуюся "половиной" аксиомы A3.

A3': Для каждого элемента $g \in G$ существует элемент $g^{\vee} \in G$ такой, что $g * g^{\vee} = e$.

Существует ли структура $(G, *)$, удовлетворяющая условиям A1, A2 и A3', но не являющаяся группой.

Рассмотрим некоторые элементарные следствия из аксиом.

Лемма 1. Простые следствия из аксиом.

1) (Обобщенная ассоциативность) Пусть $(G, *)$ – полугруппа. И пусть $g_1, \dots, g_k \in G$. Тогда как бы ни были расставлены скобки в выражении $g_1 * g_2 * \dots * g_k$ результат будет одинаковым.

2) В моноиде есть единственная единица.

3) В группе для каждого элемента есть единственный обратный.

4) Пусть $(G, *)$ – группа. Пусть $a, b \in G$. Тогда если $a * b = e$, то $b = a^{-1}$. Аналогично если $b * a = e$, то $b = a^{-1}$.

5) Пусть $(G, *)$ – группа, $a, b \in G$. Тогда $(a * b)^{-1} = b^{-1} * a^{-1}$.

6) Пусть $(G, *)$ – группа, $g \in G$. Тогда $(g^{-1})^{-1} = g$.

Доказательство. 1) Докажем это утверждение индукцией по k .

База индукции $k = 3$. В этом случае обобщенная ассоциативность совпадает с ассоциативностью, то есть с аксиомой A1.

Шаг индукции. Предположим, что для $k < n$ данное утверждение уже доказано. Докажем его для $k = n$. Среди всех расстановок скобок есть стандартная (при ней действия выполняются справа-налево):

$$(\dots (g_1 * g_2) * g_3) * \dots * g_{n-1} * g_n = g.$$

Достаточно доказать, что результат, который получается при произвольной расстановке скобок, совпадает с g . Фиксируем некоторую расстановку скобок. Для этой расстановки скобок есть последнее действие, которое даст операцию от двух скобок. Длинной скобки назовем количество g_i , входящих в нее. Докажем, что результат совпадает с g индукцией по длине правой скобки (обозначим эту длину s).

База второй индукции $s = 1$. Наша расстановка скобок имеет вид $(\dots) * g_n$. По предположению первой индукции в левой скобке можно расставить скобки произвольным образом. В том числе стандартным образом. Но тогда в целом мы получим стандартную расстановку скобок. Значит, результат при нашей расстановке скобок совпадает с результатом при стандартной расстановке скобок.

Шаг второй индукции. Пусть при $s < t$ утверждение доказано ($t \geq 2$). Докажем при $s = t$. Последнее действие при нашей фиксированной расстановке скобок имеет вид $(a) * (b)$. Поскольку длина скобки (b) равна $t \geq 2$, то $b = (c) * (d)$. Тогда $(a) * (b) = (a) * ((c) * (d))$. Применяя аксиому A1, получаем

$$(a) * ((c) * (d)) = ((a) * (c)) * (d).$$

Но длина скобки (d) строго меньше, чем длина скобки $(b) = ((c) * (d))$. Значит, по предположению второй индукции результат получающийся при расстановке скобок $((a) * (c)) * (d)$ совпадает с g .

2) Предположим, что в моноиде $(G, *)$ есть две единицы: e и s . Рассмотрим $e * s$. Поскольку e – единица, получаем $e * s = s$. С другой стороны так как s – единица, то $e * s = e$. Таким образом, $e = s$.

3) Пусть $(G, *)$ – группа. Предположим, что $g \in G$ – элемент, у которого есть хотя бы два обратных: f и h . Тогда $f = f * (g * h) = (f * g) * h = h$.

4) Пусть $a * b = e$. Рассмотрим операцию элемента a^{-1} и левой части и приравняем к операции элемента a^{-1} и правой части. (Домножим на a^{-1} слева.) Получим $a^{-1} * a * b = a^{-1} * e$. То есть $b = a^{-1}$.

Если $b * a = e$, то аналогично домножая слева на a^{-1} , получаем $b = a^{-1}$.

5) Обозначим $b^{-1} * a^{-1} = c$. Рассмотрим $(a * b) * c = (a * b) * (b^{-1} * a^{-1}) = a * (b * b^{-1}) * a^{-1} = a * e * a^{-1} = e$. Значит, $c = (a * b)^{-1}$.

6) $g^{-1} * g = e$, значит $g = (g^{-1})^{-1}$. □

Определение 4. Подмножество H группы $(G, *)$ называется *подгруппой*, если $(H, *)$ является группой.

Подмножество S группы $(G, *)$ называется *замкнутым относительно операции $*$* , если для любых $a, b \in S$ выполнено $a * b \in S$. Подмножество S группы $(G, *)$ называется

замкнутым относительно взятия обратного, если для любого $s \in S$ элемент s^{-1} также принадлежит S .

Предложение 1. *Непустое подмножество H группы $(G, *)$ является подгруппой тогда и только тогда, когда оно замкнуто относительно операции и замкнуто относительно взятия обратного.*

Доказательство. Если $(H, *)$ – группа, то операция $*$ корректно определена на H . Значит, H замкнуто относительно операции $*$. Пусть e – нейтральный элемент группы G , а s – нейтральный элемент группы H . Получаем $s*s = s$. В группе G есть обратный к s элемент s^{-1} . Умножая на него слева предыдущее равенство, получаем $s = e$. То есть единицы у групп G и H совпадают. Для каждого $g \in H$ есть обратный элемент g^{-1} в группе G и есть обратный элемент $g^\vee$ в группе H . Тогда $g * g^{-1} = e = g * g^\vee$. Умножив слева на g^{-1} , получаем $g^{-1} = g^\vee$. Поскольку для группы $(H, *)$ выполнена аксиома АЗ, то H замкнуто относительно взятия обратного.

Пусть теперь подмножество H замкнуто относительно операции и взятия обратного. Так как H замкнуто относительно операции, $(H, *)$ – группоид. Поскольку ассоциативность выполнена в G , то она выполнена и в H . Подмножество не пусто. Возьмем элемент $h \in H$. Так как H замкнуто относительно взятия обратного, $h^{-1} \in H$. Пользуясь замкнутостью H относительно операции, получаем $h * h^{-1} = e \in H$. Таким образом, в H выполнена аксиома А2. Поскольку H замкнуто относительно взятия обратного, в H выполнена и аксиома АЗ. $\square$

Зачастую вместо слова "операция" используют слово "умножение". Суть от этого не меняется и имеется в виду некоторая операция в группе. При этом на письме так же как и в случае обычного умножения чисел знак умножения можно опускать. Нейтральный элемент группы в этом случае зачастую называют "единицей группы". Такие обозначения называются *мультипликативными*.

Если заранее известно, что группа абелева, то часто используют *аддитивные* обозначения. Операция называется сложением и обозначается знаком "+" нейтральный элемент называется нулем, а обратный элемент называется "противоположным элементом".

Соберем эти обозначения в таблице.

общие обозначения	мультипликативные обозначения	аддитивные обозначения
произвольная группа	произвольная группа	абелева группа
операция $*$	умножение $\cdot$	сложение $+$
нейтральный элемент e	единица e	ноль 0
обратный элемент g^{-1}	обратный элемент g^{-1}	противоположный элемент $-g$

Определение 5. Порядок группы G – это количество элементов в этой группе. (То есть мощность множества G .) Порядок группы G обозначается $|G|$.

Определение 6. Пусть g – элемент группы G , а n – целое число. Определим n -ю степень элемента g следующим образом. Если n положительное, то $g^n = g \cdot \dots \cdot g$ – произведение n элементов g . Если n отрицательное, то $g^n = (g^{-1})^n$. Нулевая степень любого элемента равна нейтральному элементу e .

Упражнение 2. Выполнены следующие свойства степеней элемента группы:

- 1) $g^m g^n = g^{m+n}$,
- 2) $(g^m)^n = g^{mn}$

Указание. Рассмотреть все случаи знаков m и n .

Определение 7. Пусть g – элемент группы G . Порядок g – это минимальное натуральное число n такое, что $g^n = e$. Если такого числа не существует, то порядок элемента g равен бесконечности. Порядок элемента g обозначается $\text{ord}g$.

Лемма 2. Пусть g – элемент группы G такой, что $\text{ord}g = n$, а m – целое число. Тогда

$$\text{ord}g^m = \frac{n}{\text{НОД}(m, n)}.$$

Доказательство. По свойству степеней $(g^m)^k = g^{mk}$. Следовательно порядок g^m – это минимальное натуральное k такое, что mk делится на n .

Рассмотрим разложения на простые множители чисел n и m . Можем считать, что простые множители входящие в m и n одинаковы, но при этом степени вхождения могут быть равны нулю.

$$n = p_1^{\alpha_1} \dots p_l^{\alpha_l}, \quad m = p_1^{\beta_1} \dots p_l^{\beta_l}.$$

Имеем: $\text{НОД}(m, n) = p_1^{\min\{\alpha_1, \beta_1\}} \dots p_l^{\min\{\alpha_l, \beta_l\}}$.

Отсюда

$$\begin{aligned} \frac{n}{\text{НОД}(m, n)} &= p_1^{\alpha_1 - \min\{\alpha_1, \beta_1\}} \dots p_l^{\alpha_l - \min\{\alpha_l, \beta_l\}} = \\ &= p_1^{\max\{\alpha_1 - \beta_1, 0\}} \dots p_l^{\max\{\alpha_l - \beta_l, 0\}} \end{aligned}$$

Легко видеть, что это минимальное число k такое, что km делится на $p_i^{\alpha_i}$ для каждого i . $\square$

Конечную группу можно задавать с помощью таблицы умножения. Таблица умножения – это квадратная таблица, строки и столбцы которой соответствуют элементам группы. А на пересечении строки и столбца стоит произведение элемента, соответствующего строки и элемента, соответствующего столбцу.

Пример 1. Построим таблицу сложения для группы $(\mathbb{Z}_2, +) = \{0, 1\}$

$+$	0	1
0	0	1
1	1	0

Примеры групп.

1) Числовые аддитивные группы:

$$(\mathbb{Z}, +), (\mathbb{Q}, +), (\mathbb{R}, +), (\mathbb{C}, +).$$

Нейтральный элемент 0 , обратный к элементу x – это $-x$. Выполнение аксиом следуют из свойств сложения чисел. Все данные группы бесконечны и коммутативны.

2) Группа вычетов (остатков) по модулю n : $(\mathbb{Z}_n, +)$. Сложение происходит по модулю n . Нейтральный элемент 0 , обратный к элементу x – это $n - x$. Выполнение аксиом следуют из свойств остатков. Данная группа коммутативна и имеет порядок n .

3) Числовые мультипликативные группы:

$$\mathbb{Q}^\times = (\mathbb{Q} \setminus \{0\}, \cdot), \mathbb{R}^\times = (\mathbb{R} \setminus \{0\}, \cdot), \mathbb{C}^\times = (\mathbb{C} \setminus \{0\}, \cdot).$$

Нейтральный элемент 1, обратный к элементу x – это $\frac{1}{x}$. Выполнение аксиом следуют из свойств умножения чисел. Данные группы бесконечны и коммутативны.

4) (Обобщение примера 3) Пусть R – кольцо с единицей. Обозначим множество обратимых элементов через $R^\times$. Рассмотрим группу обратимых элементов $(R^\times, \cdot)$. Нейтральный элемент – единица кольца. Обратные элементы существуют так как $R^\times$ состоит из обратимых элементов. Если R – коммутативное кольцо, то $R^\times$ – коммутативная группа.

Задача 2. Приведите пример некоммутативного кольца R такого, что $R^\times$ – коммутативная группа порядка больше 1.

5) Группа комплексных корней из единицы n -ой степени. Пусть $\mathcal{C}_n$ – множество всех комплексных корней степени n из 1. Тогда $(\mathcal{C}_n, \cdot)$ – абелева группа порядка n . Докажем это. Для того, чтобы доказать, что $\mathcal{C}_n$ – группа мы воспользуемся, тем, что это подмножество в известной нам группе $\mathbb{C}^\times$. Нам надо лишь проверить, что $\mathcal{C}_n$ замкнуто относительно умножения и взятия обратного. Пусть $a, b \in \mathcal{C}_n$, то есть $a^n = b^n = 1$. Тогда $(ab)^n = a^n b^n = 1$, значит, $ab \in \mathcal{C}_n$. Мы доказали, что $\mathcal{C}_n$ замкнуто относительно умножения. С другой стороны $(a^{-1})^n = (a^n)^{-1} = 1^{-1} = 1$, следовательно, $\mathcal{C}_n$ замкнуто относительно взятия обратного. То, что группа $\mathcal{C}_n$ абелева следует из того, что она является подгруппой в абелевой группе $\mathbb{C}^\times$.

Единица этой группы – это 1, обратный к элементу x – это $\frac{1}{x}$.

6) Группы перестановок.

а) Множество S_n всех перестановок n элементов с операцией композиции $\circ$ является группой. Докажем это. Нейтральный элемент этой группы – это тождественная перестановка, обратный элемент – обратная перестановка. Ассоциативность следует из следующей важной леммы.

Лемма 3. Пусть есть четыре множества: X, Y, Z и T . И пусть фиксированы отображения между этими множествами $\varphi: X \rightarrow Y, \psi: Y \rightarrow Z$ и $\zeta: Z \rightarrow T$. Тогда $(\zeta \circ \psi) \circ \varphi = \zeta \circ (\psi \circ \varphi)$.

Доказательство. Возьмем элемент $x \in X$. Тогда

$$(\zeta \circ \psi) \circ \varphi(x) = (\zeta \circ \psi)(\varphi(x)) = (\zeta(\psi(\varphi(x)))).$$

С другой стороны

$$\zeta \circ (\psi \circ \varphi)(x) = \zeta(\psi \circ \varphi)(x) = (\zeta(\psi(\varphi(x)))).$$

□

Применяя данную лемму к случаю $X = Y = Z = T = \{1, 2, \dots, n\}$ получаем ассоциативность S_n . Порядок группы S_n равен $n!$. При $n > 3$ группа S_n не коммутативна.

б) Множество A_n четных перестановок из S_n с операцией композиции образует *группу четных перестановок*. Докажем, что A_n – подгруппа S_n . Это следует из того, что произведение четных перестановок – четная перестановка и обратная к четной перестановке четная. Группа A_n не коммутативна при $n \geq 4$.

в) Группа клейна. Рассмотрим множество перестановок (в виде произведения независимых циклов) $\{\text{id}, (1, 2)(3, 4), (1, 3)(2, 4), (1, 4)(2, 3)\}$. Несложно проверить, что это множество замкнуто относительно композиции и что каждая перестановка из этого множества обратна самой себе. Получаем, что данные перестановки образуют подгруппу в S_4 , которая обозначается V_4 . Эта группа коммутативна.

6') (Обобщение примера 6а) Пусть X – некоторое множество (возможно бесконечное). Рассмотрим множество $S(X)$ биекций $X \rightarrow X$ с операцией композиции. Если $|X| < \infty$, то получаем группу перестановок. В общем случае получаем *группу симметрий множества X* . Нейтральный элемент – тождественное преобразование. Обратный – обратное преобразование. Ассоциативность следует из леммы 3.

7) Матричные группы. Пусть $\mathbb{K}$ – поле.

а) $GL_n(\mathbb{K})$ – множество невырожденных матриц $n \times n$ с элементами из $\mathbb{K}$. Легко видеть, что это множество замкнуто относительно умножения матриц. Умножение матриц ассоциативно, единичная матрица – нейтральный элемент и все невырожденные матрицы обратимы (обратная также невырождена). Следовательно, $(GL(\mathbb{K}), \cdot)$ – группа.

б) $SL_n(\mathbb{K})$ – множество $n \times n$ матриц с определителем 1 с элементами из $\mathbb{K}$. Это подмножество замкнуто относительно умножения и взятия обратного.

Эти группы конечны тогда и только тогда, когда поле $\mathbb{K}$ конечно.

8) Группы преобразований векторного пространства. (Подгруппы в группе $S(V)$, где V – векторное пространство.)

а) Группа обратимых линейных преобразований V .

б) Группа ортогональных линейных преобразований V .

в) Группа обратимых аффинных преобразований V .

г) Группа движений V .

Во всех этих группах нейтральный элемент – тождественное преобразование, а обратный элемент – обратное преобразование. Эти группы конечны тогда и только тогда, когда поле, над которым V – векторное пространство конечно и размерность V конечна.

ЛЕКЦИЯ 2

Определение 8. Пусть $(G, *)$ и $(H, \circ)$ – две группы. Отображение $\varphi: G \rightarrow H$ называется *гомоморфизмом*, если $\varphi(g_1 * g_2) = \varphi(g_1) \circ \varphi(g_2)$.

Докажем следующие элементарные свойства гомоморфизма.

Лемма 4. Пусть $\varphi: (G, *) \rightarrow (H, \circ)$ – гомоморфизм. Обозначим через e_G и e_H единицы группы G и H соответственно. Тогда

1) $\varphi(e_G) = e_H$,

2) $\varphi(g^{-1}) = \varphi(g)^{-1}$. (В левой части обратный берется в группе G , а в правой – в H .)

Доказательство. 1) Поскольку e_G – единица группы G . Тогда $e_G * e_G = e_G$, а значит,

$$\varphi(e_G) \circ \varphi(e_G) = \varphi(e_G * e_G) = \varphi(e_G).$$

В группе H есть обратный к $\varphi(e_G)$ элемент. Умножим на него обе части. Получим

$$\varphi(e_G) = e_H.$$

2) $e_H = \varphi(e_G) = \varphi(g * g^{-1}) = \varphi(g) \circ \varphi(g^{-1})$. Следовательно, $\varphi(g^{-1}) = \varphi(g)^{-1}$. $\square$

Задача 3. Пусть $(G, *)$ и $(H, \circ)$ – моноиды с единицами e_G и e_H соответственно. И пусть $\psi: G \rightarrow H$ – отображение такое, что $\psi(g_1 * g_2) = \psi(g_1) \circ \psi(g_2)$. Может ли так быть, что $\psi(e_G) \neq \psi(e_H)$?

Определение 9. Биективный гомоморфизм $\varphi: G \rightarrow H$ называется *изоморфизмом*, а группы G и H при наличии изоморфизма между ними называются *изоморфными*.

Легко видеть, что если φ – изоморфизм, то обратное отображение φ^{-1} также является изоморфизмом. Кроме того композиция двух изоморфизмов – изоморфизм. Из этого следует, что классы изоморфности групп – это классы эквивалентности.

Пример 2. Рассмотрим две группы: $(\mathbb{R}, +)$ и $(\mathbb{R}_{>0}, \cdot)$. Вторая группа состоит из всех положительных вещественных чисел с операцией умножения. Рассмотрим отображение $\varphi: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_{>0}$, $\varphi(x) = 2^x$. Легко видеть, что φ – изоморфизм.

Пример 3. Группа $\mathbb{Z}_n$ изоморфна группе C_n . Один из возможных автоморфизмов переводит $k \in \mathbb{Z}_n$ в $\cos \frac{2\pi k}{n} + i \sin \frac{2\pi k}{n}$. То, что φ – гомоморфизм обеспечивается тем, что при умножении комплексных чисел их аргументы складываются.

Пример 4. Группа $GL_n(\mathbb{C})$ изоморфна группе невырожденных линейных преобразований векторного пространства $\mathbb{C}^n$ с операцией композиции. Чтобы получить изоморфизм между этими группами нужно выбрать некоторый базис в $\mathbb{C}^n$ и отобразить линейное преобразование в его матрицу в этом базисе.

Изоморфные группы имеют одинаковую алгебраическую структуру. Более строго любой алгебраический факт (то есть формулирующийся только в терминах операции) верный в одной из них, верен и в другой. Поэтому в дальнейшем мы будем отождествлять изоморфные группы и будем изучать группы с точностью до изоморфизма.

На самом деле изоморфизм (биективное соответствие, переводящее умножение одной группы в умножение другой) можно задать в случае, когда про одну из структур не известно, группа это или нет. Тогда вторая структура будет автоматически группой. Воспользуемся этой идеей в следующем примере.

Группа кватернионов Q_8 . Рассмотрим множество из 8 элементов:

$$\{1, -1, i, -i, j, -j, k, -k\}.$$

Умножение устроено следующим образом: знаки умножаются отдельно,

$$i^2 = j^2 = k^2 = -1,$$

$$ij = k, ji = -k, ik = -j, ki = j, jk = i, kj = -i.$$

Легко видеть, что 1 – нейтральный элемент, и каждый элемент обратим. Для того, чтобы утверждать, что Q_8 – группа, необходимо проверить ассоциативность. Сделаем это опосредованно.

Рассмотрим следующее множество из 8 комплексных матриц, которое мы обозначим $\overline{Q}_8$.

$$\left\{ \pm \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \pm \begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix}, \pm \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, \pm \begin{pmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{pmatrix} \right\}.$$

Здесь i – это мнимая единица (комплексное число).

Рассмотрим биекцию φ между Q_8 и $\overline{Q}_8$.

$$\pm 1 \mapsto \pm \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, i \mapsto \pm \begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix}, j \mapsto \pm \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, k \mapsto \pm \begin{pmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{pmatrix}.$$

Легко убедиться, что φ переводит умножение в Q_8 в матричное умножение. Следовательно, $(\overline{Q}_8, \cdot)$ – это замкнутое относительно умножения и взятия обратной матрицы подмножество в $GL_2(\mathbb{C})$. Значит, $\overline{Q}_8$ – подгруппа. Тогда Q_8 – группа, изоморфная $\overline{Q}_8$.

Еще один важный пример группы дадут следующая конструкция.

Группа диэдра D_n . Рассмотрим правильный n -угольник. Группа диэдра D_n – это группа всех движений плоскости, сохраняющих этот n -угольник.

Упражнение 3. а) Докажите, что в группе D_n ровно $2n$ элементов. Среди них n поворотов и n осевых симметрий. Все оси симметрий проходят через центр n -угольника. Если n чётно, то половина симметрий проходит через 2 вершины, а половина – через две середины противоположных сторон. Если же n нечётно, то все симметрии проходят через одну вершину и середину противоположной стороны.

б) Найдите, как устроена операция в группе D_n , то есть чему равна композиция двух поворотов, двух симметрий и поворота с симметрией.

Можно конструировать группу из уже известных с помощью следующей конструкции.

Определение 10. Пусть G и H – две группы. *Прямым произведением* n_b групп называется группа $G \times H$, состоящая из пар (g, h) , где $g \in G$, $h \in H$. Операция устроена следующим образом: $(g_1, h_1) \cdot (g_2, h_2) = (g_1 g_2, h_1 h_2)$. Ассоциативность следует из ассоциативности операций в G и H . Нейтральный элемент – это (e_G, e_H) , обратный элемент к элементу (g, h) – это (g^{-1}, h^{-1}) . Порядок прямого произведения групп – это произведение их порядков.

Особый интерес представляют гомоморфизмы и изоморфизмы из группы в себя.

Определение 11. Гомоморфизм $\varphi: G \rightarrow G$ называется *эндоморфизмом*. Изоморфизм $\varphi: G \rightarrow G$ называется *автоморфизмом*.

Легко видеть, что композиция двух эндоморфизмов – это эндоморфизм, а композиция двух автоморфизмов – автоморфизм. Множество эндоморфизмов группы G с операцией композиции образует моноид $\text{End}(G)$ с нейтральным элементом id . Множество автоморфизмов группы G с операцией композиции образует группу $\text{Aut}(G)$.

Пусть g – элемент группы G . Рассмотрим отображение $\varphi_g: G \rightarrow G$, определённое по правилу $\varphi_g(h) = ghg^{-1}$.

Лемма 5. *Отображение φ_g является автоморфизмом группы G .*

Доказательство. Проверим, что φ_g – гомоморфизм:

$$\varphi_g(hf) = ghfg^{-1} = ghg^{-1}gfg^{-1} = \varphi_g(h)\varphi_g(f).$$

То, что φ_g – биекция следует из того, что существует обратное отображение. А именно, обратное к φ_g отображение – это $\varphi_{g^{-1}}$. $\square$

Автоморфизмы называются *внутренними*, если он имеет вид φ_g для некоторого $g \in G$.

Предложение 2. а) *Множество внутренних автоморфизмов с операцией композиции образует подгруппу $\text{Inn}(G)$ в $\text{Aut}(G)$.*

б) *Отображение $g \rightarrow \varphi_g$ – это гомоморфизм из G в $\text{Inn}(G)$.*

Доказательство. Докажем равенство $\varphi_g \circ \varphi_h = \varphi_{gh}$. Для этого применим этот гомоморфизм к элементу $s \in G$:

$$\varphi_g \circ \varphi_h(s) = \varphi_g(\varphi_h(s)) = \varphi_g(hsh^{-1}) = ghsh^{-1}g^{-1} = (gh)s(gh)^{-1} = \varphi_{gh}(s).$$

Из доказанного равенства следует пункт б) и замкнутость $\text{Inn}(G)$ относительно композиции. Осталось проверить, что $\text{Inn}(G)$ замкнуто относительно взятия обратного. Для этого заметим, что $\varphi_g \circ \varphi_{g^{-1}} = \varphi_e = \text{id}$. $\square$

Определение 12. Группа G называется *циклической*, если найдется элемент $g \in G$ такой, что каждый элемент G имеет вид g^k для некоторого целого числа k .

Элемент g называется *порождающим элементом группы G* , при этом группа G обозначается $\langle g \rangle$.

Замечание 1. В предыдущем определении не требуется, чтобы все степени g были различны.

Пример 5. а) Группа $\mathbb{Z}$ является циклической. В самом деле, $\mathbb{Z} = \langle 1 \rangle$.

б) Аналогично $\mathbb{Z}_n = \langle 1 \rangle$.

Упражнение 4. Проверьте, что группы $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$, $(Q, +)$ и $\mathbb{Q}^\times$ не являются циклическими.

Лемма 6. Пусть $\text{ord}(g) = n$. Тогда порядок группы $\langle g \rangle$ также равен n .

Доказательство. Рассмотрим множество элементов $S = \{g^0 = e, g, g^2, \dots, g^{n-1}\}$. Докажем, что все элементы группы $\langle g \rangle$ лежат в S и что все элементы S различны.

В самом деле, пусть g^k – некоторый элемент $\langle g \rangle$. Разделим k на n с остатком: $k = nt + r$, где $0 \leq r < n$. Тогда $g^k = (g^n)^t g^r = g^r \in S$.

С другой стороны. Пусть $0 \leq a < b < n$ и $g^a = g^b$. Умножая последнее равенство на g^{-a} , получаем $e = g^{b-a}$. Поскольку $0 < b - a < n$, это противоречит тому, что $\text{ord}(g) = n$. $\square$

Если известно, что порядок g равен n , то группу $\langle g \rangle$ обозначают $\langle g \rangle_n$.

Замечание 2. Для каждого элемента g некоторой группы G можно рассмотреть циклическую подгруппу, порожденную этим элементом: $\langle g \rangle \subset G$.

Теорема 1. а) Любая циклическая группа бесконечного порядка изоморфна $\mathbb{Z}$.

б) Любая циклическая группа порядка n изоморфна $\mathbb{Z}_n$.

Доказательство. а) Пусть $G = \langle g \rangle$ и $|G| = \infty$. Тогда $\text{ord}(g) = \infty$. Из этого следует, что при $k \neq t$ выполнено $g^k \neq g^t$. Рассмотрим отображение

$$\psi: \mathbb{Z} \rightarrow G, \quad k \mapsto g^k.$$

Легко видеть, что ψ – гомоморфизм. Так как все элементы G имеют вид g^k , ψ – сюръекция, а так как при $k \neq t$ выполнено $g^k \neq g^t$, ψ – инъекция. Итак, ψ – изоморфизм.

б) В предыдущей лемме мы доказали, что $G = \{g^0, \dots, g^{n-1}\}$. Рассмотрим отображение

$$\psi: \mathbb{Z}_n \rightarrow G, \quad k \mapsto g^k, \quad k \in \{0, 1, \dots, n-1\}.$$

Легко видеть, что ψ – изоморфизм. $\square$

Теорема 2. 1) Подгруппа циклической группы циклическая.

2) Все подгруппы в $\mathbb{Z}$ имеют вид $k\mathbb{Z}$.

3) Все подгруппы в $\mathbb{Z}_n$ имеют вид $\langle d \rangle = d\mathbb{Z}_n \cong \mathbb{Z}_{\frac{n}{d}}$, где d делитель числа n . В частности, для каждого делителя q числа n есть ровно одна подгруппа в $\mathbb{Z}_n$, изоморфная $\mathbb{Z}_q$, а именно, $\langle \frac{n}{q} \rangle$.

4) Пусть $m \in \mathbb{Z}_n$, тогда $\langle m \rangle = \langle \text{НОД}(m, n) \rangle$.

Доказательство. 1) Пусть $G = \langle g \rangle$ и пусть H – некоторая подгруппа в G . Если $H = \{e\}$, то утверждение доказано. Пусть $H \neq \{e\}$. Если $g^k \in H$, то $g^{-k} \in H$. Значит существует положительное число k такое, что $g^k \in H$. Пусть l – наименьшее положительное число такое, что $g^l \in H$. Рассмотрим некоторое m такое, что $g^m \in H$. Разделим

m на l с остатком: $m = ls + r$, где $0 \leq r < l$. Получаем $g^r = g^m(g^l)^{-s} \in H$. Поскольку l минимальное положительное число такое, что $g^l \in H$, получаем $r = 0$. То есть в G все элементы имеют вид $(g^l)^s$, значит $G = \langle g^l \rangle$.

2) По пункту 1 любая подгруппа в циклической группе $\mathbb{Z}$ имеет вид $\langle k \rangle = k\mathbb{Z}$.

3) По доказательству пункта 1 подгруппа $H \subset \langle g \rangle$ циклическая и порождается элементом g^l для минимального положительного l такого, что $g^l \in H$. Значит если H – подгруппа $\mathbb{Z}_n$, то $H = \langle d \rangle$, где d – минимальное положительное число такое, что его вычет лежит в H . Допустим, что n не делится на d . Тогда $n = dq + r$, где $0 < r < d$. Однако тогда r – положительное число меньше d такое, что его вычет лежит в H . Это противоречие с выбором d . Значит, n делится на d . Легко видеть, что $\langle d \rangle = d\mathbb{Z}_n \cong \mathbb{Z}_{\frac{n}{d}}$.

4) По лемме 2 порядок элемента $m \in \mathbb{Z}_n$ равен $\frac{n}{\text{НОД}(m,n)}$. А значит,

$$\langle m \rangle \cong \mathbb{Z}_{\frac{n}{\text{НОД}(m,n)}}.$$

Но по пункту 3 есть ровно одна подгруппа в $\mathbb{Z}_n$, изоморфная $\mathbb{Z}_{\frac{n}{\text{НОД}(m,n)}}$ и это $\langle \text{НОД}(m,n) \rangle$. Следовательно, $\langle m \rangle = \langle \text{НОД}(m,n) \rangle$. $\square$

ЛЕКЦИЯ 3

Теорема 3. 1) $\text{Aut}(\mathbb{Z}) \cong \mathbb{Z}_2$,

2) $\text{Aut}(\mathbb{Z}_n) \cong \mathbb{Z}_n^\times$.

Замечание 3. Напомним, что $\mathbb{Z}_n^\times$ – это группа обратимых по умножению элементов кольца вычетов $\mathbb{Z}_n$. Группа $\mathbb{Z}_n^\times$ состоит из вычетов взаимно простых с n . В частности, $|\mathbb{Z}_n^\times| = \varphi(n)$, где $\varphi(\cdot)$ – функция Эйлера.

Доказательство теоремы 3. 1) Пусть ψ – автоморфизм $\mathbb{Z}$. Тогда $\psi(0) = 0$. Пусть $\psi(1) = k$. Тогда

$$\psi(2) = \psi(1+1) = \psi(1) + \psi(1) = 2k,$$

$$\psi(3) = \psi(1+1+1) = \psi(1) + \psi(1) + \psi(1) = 3k,$$

и т.д. Аналогично $\psi(-1) = -k$, $\psi(-2) = \psi((-1) + (-1)) = -2k$. Получаем

$$\psi(m) = mk.$$

Однако при $k \neq \pm 1$ гомоморфизм ψ не будет сюръективен. При $k = 1$ и $k = -1$ получаем тождественное отображение и отображение $\{x \mapsto -x\}$. Легко видеть, что эти два автоморфизма с операцией композиции образуют группу, изоморфную $\mathbb{Z}_2$.

2) Аналогично случаю 1 любой гомоморфизм $\psi: \mathbb{Z}_n \rightarrow \mathbb{Z}_n$ имеет вид

$$\psi_k: m \mapsto km.$$

Если k не обратим, то в образе ψ_k не лежит 1, а значит, ψ_k не сюръективно. Если же k обратим, то для любого вычета l имеем $\psi_k(k^{-1}l) = l$. Следовательно, ψ_k сюръективно, а значит, так как множество $\mathbb{Z}_n$ конечно, гомоморфизм ψ_k – биекция.

Итак, $\text{Aut}(\mathbb{Z}_n)$ состоит из ψ_k для $k \in \mathbb{Z}_n^\times$. Докажем, что отображение

$$\zeta: \text{Aut}(\mathbb{Z}_n) \rightarrow \mathbb{Z}_n^\times, \quad \zeta(\psi_k) = k$$

является изоморфизмом. Это очевидно биекция, осталось проверить, что ζ – гомоморфизм. Это следует из равенства $\psi_k \circ \psi_m = \psi_{km}$, которое легко проверить. $\square$

Определение 13. Пусть H – подгруппа группы G . Рассмотрим элемент $g \in G$. *Левым смежным классом элемента g по подгруппе H* называется множество

$$gH = \{gh \mid h \in H\}.$$

Правым смежным классом элемента g по подгруппе H называется множество

$$Hg = \{hg \mid h \in H\}.$$

Лемма 7. 1) $g \in fH$ тогда и только тогда, когда $f^{-1}g \in H$,

1') $g \in Hf$ тогда и только тогда, когда $gf^{-1} \in H$,

2) Левые (правые) смежные классы – это классы эквивалентности. (Более точно, отношение $g \sim f$, если $g \in fH$ является отношением эквивалентности.)

3) Следующие мощности одинаковы $|gH| = |Hg| = |H|$.

Доказательство. 1) $g \in fH \iff g = fh \iff f^{-1}g = h$.

1') $g \in Hf \iff g = hf \iff gf^{-1} = h$.

2) Докажем только для левых смежных классов. Для правых аналогично.

Рефлексивность: $g \in gH$ так как $e \in H$,

Симметричность:

$$g \in fH \iff f^{-1}g \in H \iff (f^{-1}g)^{-1} = g^{-1}f \in H \iff f \in gH.$$

Транзитивность:

$$g \in fH, f \in sH \implies f^{-1}g \in H, s^{-1}f \in H \implies s^{-1}ff^{-1}g = s^{-1}g \in H.$$

3) Следует из того, что $gh_1 = gh_2$ тогда и только тогда, когда $h_1 = h_2$. $\square$

Замечание 4. Из пункта 2 следует, что левые (правые) смежные классы либо не пересекаются, либо совпадают.

Определение 14. Индекс подгруппы H группы G – это мощность множества левых смежных классов. Обозначается индекс $[G : H]$

Задача 4. Докажите, что $gH \leftrightarrow Hg^{-1}$ – биекция между левыми и правыми смежными классами, и следовательно мощность правых смежных классов также равна индексу подгруппы.

Теорема 4. (Лагранж) Пусть G – конечная группа и H – подгруппа G . Тогда

$$|G| = |H| \cdot [G : H].$$

Доказательство. Поскольку каждый элемент группы G лежит в некотором левом смежном классе и левые смежные классы либо совпадают, либо не пересекаются, вся группа G разбивается на непересекающиеся левые смежные классы. Так как мощность каждого смежного класса равна $|H|$, мощность всей группы равна $|H|$ умножить на количество смежных классов. $\square$

Следствие 1. (Следствия из теоремы Лагранжа)

1) Порядок конечной группы делится на порядок ее подгруппы.

2) Порядок конечной группы делится на порядок ее элемента.

3) Для любого элемента g конечной группы G выполнено $g^{|G|} = e$.

4) Группа простого порядка циклическая.

5) (Теорема Эйлера) Пусть m и n – взаимно простые натуральные числа. Тогда $n^{\varphi(m)}$ имеет остаток 1 при делении на m .

Доказательство. 1) Очевидно следует из теоремы Лагранжа.

2) Пусть g – элемент конечной группы G . Рассмотрим циклическую подгруппу $H = \langle g \rangle$. Поскольку $\text{ord}(g) = |H|$, порядок G делится на $\text{ord}(g)$.

3) Пусть $|G| = \text{ord}(g) \cdot k$. Тогда $g^{|G|} = (g^{\text{ord}(g)})^k = e^k = e$.

4) Пусть $|G| = p$ – простое число. Рассмотрим $g \neq e \in G$. Поскольку порядок g делит p и не равен 1, получаем $\text{ord}(g) = p$. А значит, $G = \langle g \rangle$.

5) Применим пункт 3 к группе $\mathbb{Z}_m^\times$ и ее элементу n . Получаем

$$n^{|\mathbb{Z}_m^\times|} = n^{\varphi(m)} = 1.$$

□

Задача 5. Приведите пример конечной группы и делителя ее порядка такого, что в группе нет подгруппы такого порядка.

Теорема 5. (Коши) Пусть p – простой делитель порядка конечной группы G . Тогда в G есть элемент g порядка p .

Доказательство. Рассмотрим множество

$$S = \{(g_1, \dots, g_p) \mid g_i \in G, g_1 \cdot \dots \cdot g_p = e\}.$$

Найдем мощность S . Элементы $g_1, \dots, g_{p-1}$ можно выбрать любыми, а элемент g_p равен $(g_1 \cdot \dots \cdot g_{p-1})^{-1}$. Таким образом $|S| = |G|^{p-1}$. Так как $|G|$ делится на p , то и $|S|$ делится на p . Множество S есть объединение двух непересекающихся множеств: $U = \{g, \dots, g \mid g^p = e\}$ и

$$T = \{(g_1, \dots, g_p) \mid \exists g_i \neq g_j\}.$$

Рассмотрим $(g_1, \dots, g_p) \in T$. Так как $g_1 \cdot \dots \cdot g_p = e$, получаем $g_1 \cdot \dots \cdot g_{p-1} = g_p^{-1}$. Умножая на g_p слева, имеем $g_p \cdot g_1 \cdot \dots \cdot g_{p-1} = e$. Аналогично

$$(g_1, \dots, g_p) \in T, (g_p, g_1, \dots, g_{p-1}) \in T, \dots, (g_2, \dots, g_p, g_1) \in T.$$

Докажем, что все эти элементы T , получающиеся друг из друга циклическими сдвигами, различны. Допустим, что совершив $k < p$ сдвигов мы получим тот же элемент. Так как $\text{НОД}(k, p) = 1$, существуют целые u и v такие, что $uk + vp = 1$. Сделав u раз по k циклических сдвигов получим тот же элемент. (Если u меньше нуля, то циклические сдвиги делаем в другую сторону.) Затем сделаем v раз по p сдвигов. Снова получим тот же элемент. Но в итоге мы сделали ровно один циклический сдвиг. Значит, все элементы g_i одинаковы. Это противоречит определению T .

Итак, мы доказали, что все p элементов, полученных из элемента T циклическими сдвигами, различны. А значит, $|T|$ делится на p . Но тогда $|U| = |S| - |T|$ также делится на p . Очевидно, что $(e, e, \dots, e) \in U$. Так как $|U|$ не равно 1, есть другой элемент $(g, \dots, g) \in U$. Тогда $g^p = e$, а значит (так как p – простое число) $\text{ord}(g) = p$. □

Определение 15. Подгруппа H группы G называется нормальной, если для любого $g \in G$ выполнено $gH = Hg$. То, что H – нормальная подгруппа G обозначается так: $G \triangleright H$.

Обозначим через gHg^{-1} множество $\{ghg^{-1} \mid h \in H\}$.

Лемма 8. Следующие условия равносильны:

- 1) $G \triangleright H$,
- 2) для каждого $g \in G$ выполнено $gHg^{-1} = H$,
- 3) для каждого $g \in G$ выполнено $gHg^{-1} \subset H$,

Доказательство. $1 \implies 2$ В множестве $gH = Hg$ каждый элемент имеет вид $gh_1 = h_2g$. При этом и h_1 и h_2 пробегают всю группу H . Домножим каждый элемент справа на g^{-1} , получим $gh_1g^{-1} = h_2$. То есть $gHg^{-1} = H$.

$2 \implies 3$ Очевидно.

$3 \implies 1$. Для каждого $g \in G$ и $h \in H$ выполнено $ghg^{-1} = \tilde{h} \in H$. Тогда $gh = ghg^{-1}g = \tilde{h}g$. Отсюда $gH \subset Hg$. Аналогично $hg = gg^{-1}hg = g\hat{h}$ для $\hat{h} = g^{-1}hg \in H$. Значит, $gH \supset Hg$. В итоге $gH = Hg$. $\square$

ЛЕКЦИЯ 4

Определение 16. Пусть H – нормальная подгруппа в группе G . Факторгруппа G/H – это множество (левых, они же правые) смежных классов по подгруппе H с операцией

$$(g_1H) \cdot (g_2H) = (g_1g_2)H.$$

Определение умножения в факторгруппе требует проверки корректности, то есть проверки того, что результат умножения не зависит от выбора представителей в смежных классах. Потенциальная проблема содержится в том, что $g_1H = g'_1H$, $g_2H = g'_2H$, но при этом смежный класс g_1g_2H может не совпадать с $g'_1g'_2H$. Тогда умножение называется некорректным.

Предложение 3. Пусть G – группа, H – подгруппа. Тогда умножение на множестве левых смежных классов корректно тогда и только тогда, когда H нормальна.

Доказательство. Пусть H нормальна и $g_1H = g'_1H$, $g_2H = g'_2H$. Получаем, что $g_1^{-1}g'_1 \in H$ и $g_2^{-1}g'_2 \in H$. Обозначим $g_1^{-1}g'_1$ через h . Имеем

$$(g'_1g'_2)^{-1}(g_1g_2) = g_2'^{-1}g_1'^{-1}g_1g_2 = g_2'^{-1}hg_2 \in H$$

Это означает, что g_1g_2H совпадает с $g'_1g'_2H$. Значит, умножение корректно.

Пусть теперь H не нормальна. Тогда найдутся $g \in G$ и $h \in H$ такие, что $ghg^{-1} \notin H$. Тогда $gH = (gh)H$. Рассмотрим следующие смежные классы: $gH = (gh)H$ и $g^{-1}H$. Имеем $gH \cdot g^{-1}H = H$, но $(gh)H \cdot g^{-1}H = (ghg^{-1})H \neq H$. Значит, умножение не корректно. $\square$

Легко видеть, что G/H действительно группа. Ассоциативность произведения следует из ассоциативности произведения в G , единичный элемент – это $eH = H$, обратный к gH элемент – это $g^{-1}H$. Из теоремы Лагранжа следует, что если G – конечная группа, то $|G/H| = \frac{|G|}{|H|}$.

Пусть $\varphi: G \rightarrow G'$ – гомоморфизм групп.

Определение 17. Ядро гомоморфизма φ – это полный прообраз единицы $\{g \in G \mid \varphi(g) = e\}$. Обозначается ядро через $\text{Ker } \varphi$.

Образ гомоморфизма φ – это множество $\text{Im } \varphi = \{\varphi(g) \mid g \in G\}$.

Лемма 9. 1) Ядро $\text{Ker } \varphi$ – нормальная подгруппа в группе G .

2) Образ $\text{Im } \varphi$ – подгруппа в группе G' .

Доказательство. 1) Пусть $g_1, g_2 \in \text{Ker } \varphi$, тогда $\varphi(g_1g_2) = \varphi(g_1)\varphi(g_2) = e$. Значит, $g_1g_2 \in \text{Ker } \varphi$. То есть $\text{Ker } \varphi$ замкнуто относительно произведения. Аналогично, если $g \in G$, то $\varphi(g^{-1}) = \varphi(g)^{-1} = e$. То есть $\text{Ker } \varphi$ замкнуто относительно взятия обратного. Поскольку $e \in \text{Ker } \varphi$, ядро не пусто. По предложению 1 ядро является подгруппой.

Пусть $g \in G$, $h \in \text{Ker } \varphi$. Тогда

$$\varphi(ghg^{-1}) = \varphi(g)\varphi(h)\varphi(g)^{-1} = \varphi(g)\varphi(g)^{-1} = e.$$

Значит, $ghg^{-1} \in \text{Ker } \varphi$, то есть $\text{Ker } \varphi$ – нормальная подгруппа.

2) Пусть $\varphi(g)$ и $\varphi(h)$ – два элемента из $\text{Im } \varphi$. Тогда $\varphi(g)\varphi(h) = \varphi(gh) \in \text{Im } \varphi$. Значит, $\text{Im } \varphi$ замкнуто относительно умножения. Кроме того $\varphi(g)^{-1} = \varphi(g^{-1})$, то есть $\text{Im } \varphi$ замкнуто относительно взятия обратного. Поскольку $\text{Im } \varphi$ не пусто, это подгруппа. $\square$

Определение 18. Рассмотрим следующее отображение $\pi_H: G \rightarrow G/H$, $g \mapsto gH$. Из определения операции в факторгруппе следует, что π_H – гомоморфизм. Легко видеть, что он сюръективен. Гомоморфизм π_H называется *каноническим гомоморфизмом*.

Для канонического гомоморфизма ядро – это нормальная подгруппа H , а образ – факторгруппа G/H . Следующая теорема показывает, что ситуация аналогична для любого гомоморфизма.

Теорема 6. (Теорема о гомоморфизме) Пусть $\varphi: G \rightarrow G'$ – гомоморфизм групп. Тогда $G/\text{Ker } \varphi \cong \text{Im } \varphi$.

Доказательство. Рассмотрим отображение

$$\Psi: G/\text{Ker } \varphi \rightarrow \text{Im } \varphi, \quad \Psi(g\text{Ker } \varphi) = \varphi(g).$$

Сперва нам надо проверить корректность отображения Ψ , то есть то, что оно не зависит от выбора представителя g из смежного класса. Для этого заметим, что если $g\text{Ker } \varphi = g'\text{Ker } \varphi$, то $g'^{-1}g = h \in \text{Ker } \varphi$. Тогда $g = g'h$. Получаем $\varphi(g) = \varphi(g'h) = \varphi(g')\varphi(h) = \varphi(g')e = \varphi(g')$. Таким образом, отображение Ψ определено корректно.

Докажем, что Ψ – изоморфизм. То, что Ψ – гомоморфизм следует из равенства:

$$\Psi((g\text{Ker } \varphi)(f\text{Ker } \varphi)) = \Psi(gf\text{Ker } \varphi) = \varphi(gf) = \varphi(g)\varphi(f) = \Psi(g\text{Ker } \varphi)\Psi(f\text{Ker } \varphi).$$

Инъективность Ψ следует из того, что если $\varphi(g) = \varphi(f)$, то $\varphi(f^{-1}g) = e$, то есть $f^{-1}g \in \text{Ker } \varphi$, а значит, $g\text{Ker } \varphi = f\text{Ker } \varphi$. Сюръективность Ψ очевидна, так как для любого элемента $\varphi(g)$ в $\text{Im } \varphi$ в него отображается смежный класс $g\text{Ker } \varphi$. $\square$

Следствие 2. Если $|G| < \infty$ и $\varphi: G \rightarrow G'$ – гомоморфизм, то

$$|\text{Ker } \varphi| \cdot |\text{Im } \varphi| = |G|.$$

Пример 6. Найдём, чему изоморфна факторгруппа $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$. Для того, чтобы применить теорему о гомоморфизме, нам нужно построить гомоморфизм $\varphi: \mathbb{Z} \rightarrow G'$ для некоторой группы G' такой, что $\text{Ker } \varphi = n\mathbb{Z}$. Легко видеть, что подходит следующий гомоморфизм

$$\varphi: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}_n, \quad k \mapsto k \pmod{n}$$

Действительно, φ – гомоморфизм, $\text{Ker } \varphi = n\mathbb{Z}$ и φ – сюръекция, то есть $\text{Im } \varphi = \mathbb{Z}_n$. По теореме о гомоморфизме $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \cong \mathbb{Z}_n$.

Определение 19. Пусть группа G содержит подмножество S . Подгруппой, порождённой подмножеством S , называется минимальная подгруппа, содержащая S . Обозначается эта подгруппа $\langle S \rangle$. Если $G = \langle S \rangle$, то S называется *множеством порождающих* группы G .

Лемма 10. Пусть $G = \langle S \rangle$, тогда G совпадает с множеством конечных произведений элементов из S и обратных к ним, то есть

$$\{s_1^{\pm 1} \dots s_n^{\pm 1} \mid s_i \in S, n \in \mathbb{N}\}.$$

Доказательство. Легко видеть, что множество конечных произведений элементов из S и обратных к ним замкнуто относительно произведения и взятия обратного. Кроме того в нчм лежит $ss^{-1} = e$. Значит, это подгруппа, содержащая S , и следовательно, совпадает с G . $\square$

Упражнение 5. Докажите, что

- а) $\mathbb{Z} = \langle 1 \rangle$,
- б) $S_n = \langle (1, 2), (2, 3), \dots, (n-1, n) \rangle = \langle (1, 2), (1, 2, \dots, n) \rangle$,
- в) $A_n = \langle (1, 2, 3), (1, 2, 4), \dots, (1, 2, n) \rangle$.

Пример 7. Напомним конструкцию сюръективного гомоморфизма $S_4 \rightarrow S_3$. Рассмотрим 4 переменные x_1, x_2, x_3, x_4 и три многочлена от этих переменных:

$$f_1 = x_1x_2 + x_3x_4, \quad f_2 = x_1x_3 + x_2x_4, \quad f_3 = x_1x_4 + x_2x_3.$$

Если применить к x_1, x_2, x_3, x_4 перестановку σ , то f_i переставятся между собой по перестановке $\tau(\sigma)$. Ясно, что $\tau(\sigma \circ \delta) = \tau(\sigma) \circ \tau(\delta)$, то есть τ – гомоморфизм $S_4 \rightarrow S_3$.

Заметим, что $\tau(2, 3) = (1, 2)$, значит, $(1, 2) \in \text{Im } \tau$. Аналогично можно проверить, что все транспозиции лежат в образе τ . Поскольку S_3 порождается транспозициями, гомоморфизм τ сюръективен. Легко видеть, что $V_4 \subset \text{Ker } \varphi$. С другой стороны $|\text{Ker } \varphi| = \frac{|S_4|}{|S_3|} = 4$. Следовательно, $\text{Ker } \varphi = V_4$.

По теореме о гомоморфизме получаем следующий изоморфизм:

$$S_4/V_4 \cong S_3.$$

Лемма 11. Пусть G – группа, $H \triangleleft G$ – нормальная подгруппа, $K \subset G$ – подгруппа. Тогда $\langle K \cup H \rangle = KH = \{kh \mid k \in K, h \in H\}$.

Доказательство. Докажем, что KH замкнуто относительно умножения. Действительно,

$$(k_1h_1)(k_2h_2) = k_1k_2k_2^{-1}h_1k_2h_2 = k_1k_2(k_2^{-1}h_1k_2)h_2 = k_1k_2\widehat{h}h_2 \in KH.$$

Теперь докажем, что KH замкнуто относительно взятия обратного:

$$(kh)^{-1} = h^{-1}k^{-1} = k^{-1}kh^{-1}k^{-1} = k^{-1}(kh^{-1}k^{-1}) = k^{-1}\widetilde{h} \in KH.$$

Поскольку KH не пусто, это группа. Очевидно, что KH – наименьшая подгруппа, содержащая K и H . $\square$

Теорема 7. (Вторая теорема о гомоморфизме) Пусть G – группа, $H \triangleleft G$ – нормальная подгруппа, $K \subset G$ – подгруппа.

- 1) $H \cap K$ – нормальная подгруппа в K и H – нормальная подгруппа в KH ,
- 2) $KH/H \cong K/(H \cap K)$.

Доказательство. 1) Пусть $a \in H \cap K$, $k \in K$. Тогда $a \in H \Rightarrow kak^{-1} \in H$. С другой стороны $a \in K \Rightarrow kak^{-1} \in K$. То есть $kak^{-1} \in H \cap K$. То есть $(H \cap K) \triangleleft K$.

Пусть $h \in H, g \in KH$, тогда, так как $g \in G$, $ghg^{-1} \in H$. Значит, $H \triangleleft KH$.

2) Рассмотрим $\Psi: K \rightarrow (KH)/H$, $k \mapsto kH$. Докажем, что Ψ – сюръекция. Действительно, пусть $khH \in (KH)/H$. Тогда $khH = kH = \Psi(k)$. Легко видеть, что Ψ – гомоморфизм. Найдем ядро Ψ . Пусть $k \in \text{Ker } \Psi$, тогда $kH = H$. Это значит, что $k \in H$. С другой стороны $k \in K$. То есть $k \in (H \cap K)$. Итак, $\text{Ker } \Psi = H \cap K$. По теореме о гомоморфизме $K/(H \cap K) \cong KH/H$. $\square$

Теорема 8. (Третья теорема о гомоморфизме) Пусть $\varphi: G \rightarrow G'$ – сюръективный гомоморфизм, $K = \text{Ker } \varphi$, $H' \subset G'$ – подгруппа. Пусть $H = \varphi^{-1}(H')$ – полный прообраз. Тогда

- 1) $H' \leftrightarrow H$ – биекция между подгруппами в G' и подгруппами в G , содержащими K .
- 2) Подгруппа H нормальна в G тогда и только тогда, когда H' нормальна в G' .
- 3) Если H и H' нормальны, то $G/H \cong G'/H'$.

Доказательство. 1) Для подгруппы $H' \subset G'$ обозначим через $\Omega(H') = H$ подгруппу $\varphi^{-1}(H') \subset G$. Легко видеть, что $\Omega(H')$ содержит $K = \varphi^{-1}(e)$. Пусть H – подгруппа G , содержащая K , обозначим через $\Theta(H)$ образ $\varphi(H)$, это подгруппа в G' . Докажем, что Ω и Θ – взаимно обратные отображения. Для этого надо проверить, что $\Omega \circ \Theta = \text{id}$ и $\Theta \circ \Omega = \text{id}$. Действительно, $\Theta \circ \Omega(H')$ – это образ от полного прообраза H' , то есть H' . Теперь рассмотрим $\Omega \circ \Theta(H)$ – полный прообраз от образа H . Очевидно, что $H \subset \Omega \circ \Theta(H)$. Пусть $g \in \Omega \circ \Theta(H)$, тогда $\varphi(g) \in \Theta(H)$. Следовательно, есть $h \in H$ такое, что $\varphi(h) = \varphi(g)$. Тогда $\varphi(h^{-1}g) = e$, то есть $h^{-1}g \in K$. Значит $g = hk \in H$. Итак, $\Omega \circ \Theta(H) = H$.

2) Пусть $G \triangleright H$. Рассмотрим $h' \in H'$, $g' \in G'$. Так как гомоморфизм φ сюръективный, найдутся $h \in H$ и $g \in G$ такие, что $\varphi(h) = h'$, $\varphi(g) = g'$. Тогда $ghg^{-1} \in H$, а значит, $g'h'g'^{-1} = \varphi(ghg^{-1}) \in H'$. Таким образом, $H' \triangleleft G'$.

Пусть теперь $H' \triangleleft G'$. Рассмотрим $g \in G$, $h \in H$. Тогда $\varphi(g) \in G'$, $\varphi(h) \in H'$, а значит, $\varphi(ghg^{-1}) = \varphi(g)\varphi(h)\varphi(g)^{-1} \in H'$. Тогда $ghg^{-1} \in H$, то есть $G \triangleright H$.

3) Рассмотрим композицию гомоморфизмов $\Psi = \pi_{H'} \circ \varphi: G \rightarrow G'/H'$. Так как φ и $\pi_{H'}$ – сюръекции, Ψ – также сюръекция. Заметим, что $\Psi(g) = eH'$ тогда и только тогда, когда $\varphi(g) \in H'$, то есть $g \in H$. Получаем, что $\text{Ker } \Psi = H$. По теореме о гомоморфизме получаем $G/H \cong G'/H'$. $\square$

ЛЕКЦИЯ 5

Следствие 3 (Следствие из третьей теоремы о гомоморфизме). Пусть H и N – две нормальные подгруппы группы G , причем $N \subset H$. Пусть $\pi_N: G \rightarrow G/N$ – канонический гомоморфизм. Тогда $\pi_N(H) \cong H/N$ – нормальная подгруппа в G/N и

$$(G/N)/(\pi_N(H)) \cong G/H.$$

Доказательство. Гомоморфизм $\pi_N: G \rightarrow G/N = G'$ сюръективен. Значит, мы находимся в условиях третьей теоремы о гомоморфизме. Поскольку H – нормальная подгруппа в G , $\pi_N(H)$ – также нормальная подгруппа в G/N . Так как $\text{Ker } \pi_N = N$, $\pi_N(H) \cong H/N$. По пункту 3) третьей теоремы о гомоморфизме

$$G/H \cong (G/N)/\pi_N(H).$$

$\square$

Пример 8. Рассмотрим нормальные подгруппы $V_4 \subset A_4$ в S_4 . По предыдущему следствию получаем $S_4/A_4 \cong (S_4/V_4)(A_4/V_4)$. В самом деле, $S_4/A_4 \cong \mathbb{Z}_2$, $S_4/V_4 \cong S_3$ (см. пример 7), $|A_4/V_4| = 3$, а значит, $A_4/V_4 \cong \mathbb{Z}_3$. При этом $\pi_{V_4}(A_4) \cong \mathbb{Z}_3$ – подгруппа в S_3 , следовательно, $\pi_{V_4}(A_4) = A_3$. И мы получаем, что $(S_4/V_4)(A_4/V_4) \cong S_3/A_3 \cong \mathbb{Z}_2$.

Определение 20. Центр группы G – это множество $Z(G)$ элементов, коммутирующих со всеми элементами группы. $Z(G) = \{z \in G \mid \forall g \in G : gz = zg\}$.

Лемма 12. Центр – это нормальная подгруппа G .

Доказательство. Пусть $z_1, z_2 \in Z(G)$. Тогда для любого $g \in G$ выполнено

$$z_1 z_2 g = z_1 g z_2 = g z_1 z_2.$$

Значит, $Z(G)$ – замкнутое относительно операции подмножество. Для доказательства замкнутости относительно взятия обратного заметим, что если $z \in Z(G)$, то для любого $g \in G$ выполнено $zg^{-1} = g^{-1}z$. Тогда

$$z^{-1}g = (g^{-1}z)^{-1} = (zg^{-1})^{-1} = gz^{-1}.$$

Кроме того $Z(G) \neq \emptyset$, так как $e \in Z(G)$.

То, что подгруппа $Z(G)$ нормальна следует из равенства $gzg^{-1} = z \in Z(G)$. $\square$

Предложение 4. Факторгруппа группы G по центру изоморфна группе внутренних автоморфизмов $\text{Inn}(G)$.

Доказательство. По предложению 2(б) отображение $\Psi: G \rightarrow \text{Inn}(G)$, $g \mapsto \varphi_g$ является гомоморфизмом. По определению внутренних автоморфизмов гомоморфизм Ψ сюръективен. Ядро Ψ состоит из тех элементов $g \in G$, для которых $\varphi_g = \text{id}$, то есть $\forall h \in G$ выполнено $ghg^{-1} = h$. Это означает $g \in Z(G)$. Итак, $\text{Ker } \varphi = Z(G)$, $\text{Im } \varphi = \text{Inn}(G)$. По теореме о гомоморфизме $G/Z(G) \cong \text{Inn}(G)$. $\square$

Предложение 5. Если группа G не коммутативна, то группа $G/Z(G)$ не является циклической.

Доказательство. Предположим, что $G/Z(G) = \langle aZ(G) \rangle$, $a \in G$. Тогда для любого $g \in G$ выполнено $g \in a^k Z(G)$, то есть $g = a^k z$, где $z \in Z(G)$. Возьмем $g_1, g_2 \in G$, тогда $g_1 = a^k z_1$, $g_2 = a^m z_2$. Имеем

$$g_1 g_2 = a^k z_1 a^m z_2 = a^{k+m} z_1 z_2 = a^{k+m} z_2 z_1 = a^m z_2 a^k z_1 = g_2 g_1.$$

Таким образом, G коммутативна. (И следовательно, $G/Z(G) \cong \{e\}$.) $\square$

Пусть S – некоторое множество. Рассмотрим множество конечных слов от букв $s \in S$ и s^{-1} , где $s \in S$. (Так как на множестве S нет никакой операции, то s^{-1} – некий формальный символ.) Также мы рассматриваем пустое слово $\emptyset$. Два слова назовем *эквивалентными*, если одно переводится в другое некой конечной цепочкой следующих элементарных преобразований:

1) Если в некотором месте есть пара подряд идущих букв ss^{-1} или $s^{-1}s$, то их можно убрать.

2) В любое место можно вписать пару ss^{-1} или $s^{-1}s$.

Конкатенацией двух слов называется операция приписывания одного слова к другому. Например, $(xux^{-1})(xzzx) = xux^{-1}xzzx$.

Лемма 13. Класс эквивалентности конкатенации слов из двух классов эквивалентности не зависит от выбора представителей в этих классах.

Доказательство. Пусть слово A эквивалентно слову B , а слово C эквивалентно слову D . Наша задача доказать, что слова AC и BD эквивалентны. Заметим, что мы можем делать с левой частью слова AC те же элементарные преобразования, что и со словом A и получим слово BC . Затем будем делать с правой частью BC те же элементарные преобразования, что и с C . Получим CD . $\square$

Определение 21. Свободной группой с множеством порождающих S называется множество классов эквивалентности конечных слов от букв $s \in S$ и s^{-1} , где $s \in S$ с операцией конкатенации. Обозначать эту группу мы будем $\langle S \rangle$.

Если множество S конечно, то $|S|$ называется *рангом* свободной группы $\langle S \rangle$.

Замечание 5. Легко видеть, что свободная группа действительно является группой. Ассоциативность конкатенации очевидна. Нейтральный элемент – класс пустого слова. Обратный элемент к каждому слову легко выписать.

Теорема 9. Пусть G группа с порождающими $g_1, \dots, g_k$. Существует единственный гомоморфизм из свободной группы $\langle x_1, \dots, x_k \rangle$ ранга k в группу G такой, что $\varphi(x_i) = g_i$. Гомоморфизм φ сюръективен.

Доказательство. Пусть φ переводит класс слова $x_{i_1}^{\varepsilon_1} x_{i_2}^{\varepsilon_2} \dots x_{i_m}^{\varepsilon_m}$, $\varepsilon_j = \pm 1$, в

$$g = g_{i_1}^{\varepsilon_1} g_{i_2}^{\varepsilon_2} \dots g_{i_m}^{\varepsilon_m} \in G.$$

Чтобы проверить корректность определения, нужно доказать, что g не зависит от выбора представителя в классе. Если два слова отличаются элементарным преобразованием, то в одном из них есть "дополнительное" $x_i x_i^{-1}$, которое переходит в $g_i g_i^{-1} = e$. Это не меняет образ. То, что φ – гомоморфизм и $\varphi(x_i) = g_i$ очевидно. Сюръективность следует из того, что G порождается $g_1, \dots, g_k$. $\square$

Определение 22. Пусть M – некоторое подмножество группы G . Нормальное замыкание M – это наименьшая по включению нормальная $N(M)$ в G подгруппа, содержащая M .

Легко видеть, что пересечение нормальных подгрупп – это нормальная подгруппа. Из этого следует, что наименьшая нормальная подгруппа, содержащая M существует.

Лемма 14. Подгруппа $N(M)$ совпадает с подгруппой, порожденной элементами gtg^{-1} для всех $t \in M, g \in G$.

Доказательство. Поскольку $N(M)$ – нормальная подгруппа и $M \subset N(M)$, получаем $gtg^{-1} \in N(M)$, а значит, $\langle gtg^{-1} \mid g \in G, t \in M \rangle \subset N(M)$. С другой стороны $\langle gtg^{-1} \mid g \in G, t \in M \rangle$ – это нормальная подгруппа. В самом деле, $(gtg^{-1})^{-1} = gt^{-1}g^{-1}$. А значит, любой элемент $\langle gtg^{-1} \mid g \in G, t \in M \rangle$ имеет вид

$$(g_1 m_1^{\varepsilon_1} g_1^{-1}) \dots (g_k m_k^{\varepsilon_k} g_k^{-1}) \quad \varepsilon_j = \pm 1.$$

При этом

$$\begin{aligned} & g(g_1 m_1^{\varepsilon_1} g_1^{-1}) \dots (g_k m_k^{\varepsilon_k} g_k^{-1}) g^{-1} = \\ & = (gg_1 m_1^{\varepsilon_1} g_1^{-1} g^{-1})(gg_2 m_2^{\varepsilon_2} g_2^{-1} g^{-1}) \dots (gg_k m_k^{\varepsilon_k} g_k^{-1} g^{-1}) \in \langle gtg^{-1} \mid g \in G, t \in M \rangle. \end{aligned}$$

$\square$

Определение 23. Говорят, что группа G задана образующими $g_1, \dots, g_k$ и соотношениями $g_1^{\alpha_1} \dots g_k^{\alpha_k}, \dots, g_1^{\beta_1} \dots g_k^{\beta_k}$, если для гомоморфизма $\varphi: \langle x_1, \dots, x_k \rangle \rightarrow G$, $x_i \mapsto g_i$ ядро совпадает с $N(x_1^{\alpha_1} \dots x_k^{\alpha_k}, \dots, x_1^{\beta_1} \dots x_k^{\beta_k})$. Тогда

$$G \cong \langle x_1, \dots, x_k \rangle / N(x_1^{\alpha_1} \dots x_k^{\alpha_k}, \dots, x_1^{\beta_1} \dots x_k^{\beta_k}).$$

В таком случае пишут

$$G = \langle g_1, \dots, g_k \mid g_1^{\alpha_1} \dots g_k^{\alpha_k}, \dots, g_1^{\beta_1} \dots g_k^{\beta_k} \rangle.$$

Пример 9. Докажем, что $D_n = \langle a, b \mid a^2, b^2, (ab)^n \rangle$.

Ясно, что D_n порождается двумя симметриями с минимальным углом между ними. Их композиция – это поворот на $\frac{2\pi}{n}$. Если обозначить эти симметрии a и b , то ясно, что $a^2 = b^2 = (ab)^n = e$. То есть для $\varphi: \langle x_1, x_2 \rangle \rightarrow D_n$, $x_1 \mapsto a, x_2 \mapsto b$ ядро

содержит $N(x_1^2, x_2^2, (x_1x_2)^n)$. Наша цель – доказать, что $\text{Ker } \varphi = N(x_1^2, x_2^2, (x_1x_2)^n)$. Если это не так, то по следствию 3 имеем:

$$G \cong \langle x_1, x_2 \rangle / \text{Ker } \varphi \cong (\langle x_1, x_2 \rangle / N(x_1^2, x_2^2, (x_1x_2)^n)) / (\text{Ker } \varphi / N(x_1^2, x_2^2, (x_1x_2)^n)).$$

Тогда порядок группы G будет строго меньше, чем $H = \langle a, b \mid a^2, b^2, (ab)^n \rangle = \langle x_1, x_2 \rangle / N(x_1^2, x_2^2, (x_1x_2)^n)$. Докажем, что в H не более $2n$ элементов. Легко видеть, что любой элемент H может быть записан либо в виде конечного слова $abab \dots$, либо в виде $ba \dots$. Действительно, $a^{-1} = a$, $b^{-1} = b$, значит, любое слово от a, b, a^{-1}, b^{-1} – это слово от a и b . При этом если есть сочетание aa или bb , то его можно сократить. Поскольку $(ab)^n = e$, среди слов $abab \dots$ различными являются слова длины $0, 1, 2, \dots, 2n - 1$. С другой стороны $ba = b^{-1}a^{-1} = (ab)^{-1}$. Значит, $(ba)^n = e$ и среди слов $ba \dots$ также различными являются слова длины $0, 1, 2, \dots, 2n - 1$. Осталось заметить, что

$$\begin{aligned} b &= (ab)^n b = (ab)^{n-1} a; \\ ba &= (ab)^n ba = (ab)^{n-1}; \\ &\vdots \\ (ba)^{n-1} b &= (ab)^n (ba)^{n-1} b = a. \end{aligned}$$

Таким образом, все слова вида $ba \dots$ представляются словами вида $abab \dots$. Значит, $|H| \leq 2n$. Отсюда следует, что $D_n = H$.