

Лекции по математическому анализу: многообразия, дифференциальные формы

27 марта 2019 г.

Аннотация

Записки создавались студентами Механико-математического факультета НГУ с лекций, прочитанных С. Г. Басалаевым.

Внимание! Записки не подвергались редактуре, поэтому, возможно, содержат множество неточностей, опечаток и смысловых ошибок.

Содержание

1	Многообразия	3
1.1	Многообразия без края	3
1.2	Многообразия с краем	6
1.3	Касательное и нормальное пространства	10
1.4	Задача на условный экстремум	13
1.5	Площадь поверхности	15
1.6	Площадь графика функции	19
2	Криволинейные интегралы	21
2.1	Криволинейные интегралы I-рода	21
2.2	Объем шара и площадь сферы	22
2.3	Формула коплощади	23
3	Введение в векторный анализ	25
3.1	Дифференциальные формы	25
3.2	Интеграл 1-формы по кривой	27

1 Многообразия

1.1 Многообразия без края

Определение 1.1. Множество $M \subseteq \mathbb{R}^n$ называется C^r -гладким k -мерным многообразием без края, если для каждого $x_0 \in M$ существует U — окрестность x_0 и существует C^r -диффеоморфизм $\Phi : U \rightarrow \Phi(U)$, такой что $\Phi(x_0) = 0$ и $\Phi(U \cap M) = V \times \{0\}^{n-k}$, где V — окрестность нуля в \mathbb{R}^n .

При $r = 0$ многообразие называется топологическим, при $r > 0$ многообразие называется дифференцируемым.

Примеры многообразий:

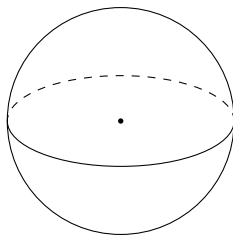
1. Набор изолированных точек ($k = 0$).



2. Набор кривых, в том числе с выколотыми концами, а также замкнутые ($k = 1$).



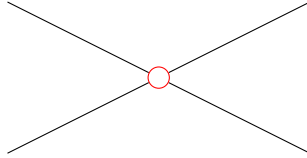
3. Поверхности ($k = 2$).



Пример 1.2.

- Пара параллельных прямых — многообразие,
- Пара непересекающихся плоскостей — многообразие,

- Плоскость и прямая — не многообразие, так как их размерности не совпадают,
- Пара пересекающихся прямых с выколотой точкой пересечения — многообразие.



Теперь рассмотрим способы задания k -мерных многообразий.

Теорема 1.3. Пусть $U \subseteq \mathbb{R}^n$ — открытое множество, тогда U является n -мерным многообразием.

Доказательство. Напомним, что множество называется *открытым*, если для любая его точка x_0 лежит в некоторой окрестности.

Отображение Φ можно определить следующим образом: $\Phi(x) = x - x_0$ — сдвиг в ноль, переводит окрестность x_0 в окрестность нуля. \square

Теорема 1.4 (О графике). Пусть $U \subset \mathbb{R}^n$ — открытое множество, $f : U \rightarrow \mathbb{R}$, $f \in C^r$, тогда график этой функции $\Gamma_f = \{(x, f(x)) \mid x \in U\}$ — C^r -гладкое n -мерное многообразие в \mathbb{R}^{n+1} .

Доказательство. Определим отображение $\Phi : U \times \mathbb{R} \rightarrow U \times \mathbb{R}$ следующим образом: $\Phi(x, y) = (x, y - f(x))$, тогда:

$$\Phi(x_1, \dots, x_n, y) = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \\ y - f(x_1, \dots, x_n) \end{pmatrix}, \quad |D\Phi| = \begin{vmatrix} E & 0 \\ -\frac{\partial f}{\partial x_i} & 1 \end{vmatrix} = 1.$$

Отображение Φ является C^r -диффеоморфизмом и $\Phi(x, f(x)) = (x, 0)$, т. е. $\Phi(\Gamma_f) = U \times \{0\}$. \square

Теорема 1.5 (О локальном вложении). Пусть $U \subset \mathbb{R}^n$ — открытое множество, $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$, $f \in C^r$ и $k \leq n$. Тогда, если $t^0 \in U$ и $\text{rank } Df(t^0) = k$, то существует U -окрестность t^0 , такая что $f(U)$ является C^r -гладким k -мерным многообразием.

$$\begin{cases} x_1 = f_1(t_1, \dots, t_k), \\ \dots \\ x_n = f_n(t_1, \dots, t_k). \end{cases}$$

Доказательство. Так как $\text{rank } Df(t^0) = k$, следовательно набор векторов $\{\frac{\partial f}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_k}\}$ является линейно независимым, т.е. его можно дополнить до базиса \mathbb{R}^n .

Пусть $\{\frac{\partial f}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_k}, v_{k+1}, \dots, v_n\}$ — базис в \mathbb{R}^n .

Определим $\Phi : U \times \mathbb{R}^{n-k} \rightarrow \mathbb{R}^n$ так, что $\Phi(t_1, \dots, t_k, s_{k+1}, \dots, s_n) = f(t_1, \dots, t_k) + s_{k+1}v_{k+1} + \dots + s_nv_n$.

$D\Phi = [\frac{\partial f}{\partial t_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial t_k}, v_{k+1}, \dots, v_n]$, следовательно $\det D\Phi \neq 0$.

По теореме об обратной функции существует W — окрестность $(t_0, 0)$, такая что $\Phi : W \rightarrow \Phi(W)$ — C^r -диффеоморфизм. Выберем $V \times (-h, h) \in W$, так что V — окрестность x_0 в \mathbb{R}^k , тогда $\Phi^{-1}(f(V)) = V \times \{0\}^{n-k}$. \square

Определение 1.6. Пусть x^0 — решение системы уравнений:

$$\begin{cases} f_1(x_1, \dots, x_n) = a_1, \\ \dots \\ f_k(x_1, \dots, x_n) = a_k, \end{cases}$$

тогда x^0 называется регулярным, если $\text{rank } \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(x^0) = k$.

Теорема 1.7 (О решении системы уравнений). Пусть $U \subset \mathbb{R}^k$ — открытое множество, $f_1, \dots, f_k : U \rightarrow \mathbb{R}$ и $f_i \in C^r \forall i \leq k$, тогда множество регулярных решений системы уравнений

$$\begin{cases} f_1(x_1, \dots, x_n) = a_1, \\ \dots \\ f_k(x_1, \dots, x_n) = a_k, \end{cases}$$

представляет собой C^r -гладкое $(n - k)$ -мерное многообразие.

Доказательство. Пусть x^0 — регулярное решение, тогда:

$$Df(x^0) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_k}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_k}{\partial x_n} \end{pmatrix} (x^0).$$

Матрица состоит из n столбцов, где k из них линейно независимы.

$f(x_1, \dots, x_{n-k}, x_{n-k+1}, \dots, x_n) = f(x, y) = 0$. Существует окрестность V такая, что $\det \frac{\partial f}{\partial y} \neq 0$ тогда по теореме о неявной функции $y = g(x)$.

В некоторой окрестности x^0 :

$$\begin{aligned} x_{n-k+1} &= g_{n-k+1}(x_1, \dots, x_{n-k}), \\ &\dots \\ x_n &= g_n(x_1, \dots, x_{n-k}). \end{aligned}$$

Множество решений по теореме о локальном вложении является многообразием:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_1, \\ &\dots \\ x_{n-k} &= x_{n-k}, \\ x_{n-k+1} &= g_{n-k+1}(x_1, \dots, x_{n-k}), \\ &\dots \\ x_n &= g_n(x_1, \dots, x_{n-k}). \end{aligned}$$

□

1.2 Многообразия с краем

Определение 1.8. $\mathbb{R}_+^k = \{(x_1, \dots, x_k) : x_k \geq 0\}$ — верхнее полупространство ($\mathbb{R}_-^k = \{(x_1, \dots, x_k) : x_k \leq 0\}$ — нижнее полупространство).

Определение 1.9. Пусть $V \subseteq \mathbb{R}^k$ — окрестность нуля, тогда $V \cap \mathbb{R}_+^k$ называется полукрестностью нуля. В ее основании лежит $(k-1)$ -мерная окрестность нуля.

Определение 1.10. Множество $M \in \mathbb{R}^n$ называется C^r -гладким k -мерным многообразием с краем, если для каждого $x_0 \in M$ существует U — окрестность x_0 и существует C^r -диффеоморфизм $\Phi : U \rightarrow \Phi(U)$, такой что $\Phi(x_0) = 0$ и, либо $\Phi(U \cap M) = V \times \{0\}^{n-k}$ (тогда x_0 — внутренняя точка), либо $\Phi(U \cap M) = (V \cap \mathbb{R}_+^k) \times \{0\}^{n-k}$ (тогда x_0 — крайняя точка).

Примеры многообразий с краем:

1. Края нет при $k = 0$.
2. Край незамкнутой кривой ($k = 1$) — это ее концевые точки. У замкнутых и неограниченных кривых края нет.



3. При $k = 2$, внутренними точками поверхности являются те, которые лежат внутри нее вместе со своей некоторой окрестности, остальные являются краевыми.

Определение 1.11. Пусть M — многообразие, тогда $\partial M = \{x \mid x \text{ — краевая точка } M\}$ — множество краевых точек многообразия M .

Теорема 1.12 (О крае). Пусть M — C^r -гладкое k -мерное многообразие с краем, тогда множество его краевых точек ∂M является C^r -гладким $(k - 1)$ -мерным многообразием без края ($\partial \partial M = \emptyset$).

Доказательство. Пусть $x \in \Phi(U \cap M)$, тогда $x = (x_1, \dots, x_{k-1}, x_k, \underbrace{0, \dots, 0}_{n-k})$.

Если $x_k = 0$, то $x \in \partial M$ — краевая точка. Отображение Φ переводит все краевые точки $U \cap M$ в $(k - 1)$ -мерную плоскость (основание полупространства). Основание — $(k - 1)$ -мерная окрестность нуля, следовательно $\Phi(U \cap \partial M) = W \times \{0\} \times \{0\}^{n-k}$ — выполнено определение многообразия. \square

Теорема 1.13 (О решении системы уравнений и неравенства). Пусть $U \subset \mathbb{R}^k$ — открытое множество, $f_1, \dots, f_{k+1} : U \rightarrow \mathbb{R}$, $f_i \in C^r \forall i \leq k + 1$ и $\text{rank } \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(x^0) = k + 1$, тогда множество регулярных решений системы уравнений

$$\begin{cases} f_1(x_1, \dots, x_n) = a_1, \\ \dots \\ f_k(x_1, \dots, x_n) = a_k, \\ f_{k+1}(x_1, \dots, x_n) \geq a_{k+1}, \end{cases}$$

представляет собой C^r -гладкое $(n - k)$ -мерное многообразием с краем (внутренние точки — решение строгого неравенства, край — решение $(k + 1)$ уравнений).

Доказательство. Решение неравенства $f_{k+1}(x_1, \dots, x_n) > a_{k+1}$ является открытым множеством, и по теореме 1.3 задает многообразие.

Решение системы уравнений

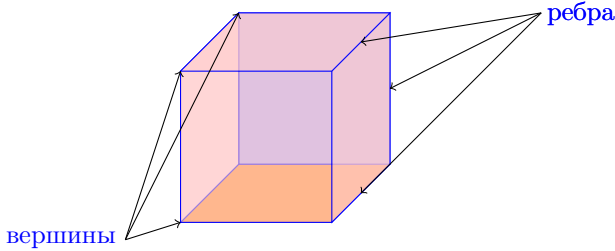
$$\begin{cases} f_1(x_1, \dots, x_n) = a_1, \\ \dots \\ f_k(x_1, \dots, x_n) = a_k, \\ f_{k+1}(x_1, \dots, x_n) = a_{k+1}, \end{cases}$$

задает $(k - 1)$ мерную поверхность — край многообразия. \square

Определение 1.14. Множество $M \subset \mathbb{R}^k$ называется k -мерным кусочно-гладким многообразием, если:

1. M — k -мерное топологическое многообразие.
2. Существует разбиение $M = \tilde{M} \cup (\bigcup_{i=0}^n Z_i)$, такое что \tilde{M} — гладкое k -мерное многообразие, а Z_i — кусочно гладкие многообразия размерности $l \leq k - 1$.

Пример 1.15. Куб.



Теорема 1.16. Пусть $U \subset \mathbb{R}^k$ — открытое множество, $f_1, \dots, f_k, \dots, f_{k+l} : U \rightarrow \mathbb{R}$, $f_i \in C^r \forall i \leq k + l$ и $\text{rank } \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(x^0) = k + l$, тогда множество регулярных решений системы уравнений

$$\begin{cases} f_1(x_1, \dots, x_n) = a_1, \\ \dots \\ f_k(x_1, \dots, x_n) = a_k, \\ f_{k+1}(x_1, \dots, x_n) \geq a_{k+1}, \\ \dots \\ f_{k+l}(x_1, \dots, x_n) \geq a_{k+l}, \end{cases}$$

представляет собой C^r -кусочно-гладкое $(n - k)$ -мерное многообразие с краем.

Пример 1.17. Является ли многообразием множество решений системы:

$$\begin{cases} x^2 - y^2 + z^2 \leq 16 \\ x^2 y^2 \geq 1 \\ z \geq 1 \end{cases}$$

Решение. Проверим условия теоремы выше.

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_j} = \begin{pmatrix} 2x & -2y & 2z \\ 2xy^2 & 2x^2y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Для того чтобы ранг этой матрицы был максимальным, достаточно, чтобы $\det \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \neq 0$.

$$\det \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(x_0) = 4xy(x^2 + y^2)$$

Это выражение равно нулю, если $x = 0$ или $y = 0$. Подставив их в исходную систему, убедимся, что они не являются ее решением. Следовательно $\text{rank} \det \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(x) = 3$ и множество решений системы является кусочно-гладким многообразием с краем размерности 3.

Внутренностью этого многообразия является решение системы

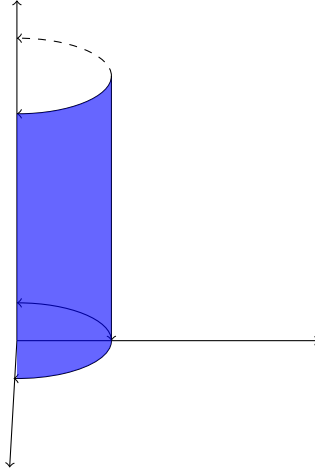
$$\begin{cases} x^2 - y^2 + z^2 < 16 \\ x^2y^2 > 1 \\ z > 1 \end{cases}$$

Рассмотрим теперь что является краем этого многообразия. Набор систем, перечисленный ниже задает компоненты края.

$$\begin{array}{lll} \begin{cases} x^2 - y^2 + z^2 = 16 \\ x^2y^2 = 1 \\ z = 1 \end{cases} & \begin{cases} x^2 - y^2 + z^2 < 16 \\ x^2y^2 = 1 \\ z = 1 \end{cases} & \begin{cases} x^2 - y^2 + z^2 = 16 \\ x^2y^2 > 1 \\ z = 1 \end{cases} \\ \begin{cases} x^2 - y^2 + z^2 = 16 \\ x^2y^2 = 1 \\ z > 1 \end{cases} & \begin{cases} x^2 - y^2 + z^2 < 16 \\ x^2y^2 > 1 \\ z = 1 \end{cases} & \begin{cases} x^2 - y^2 + z^2 < 16 \\ x^2y^2 = 1 \\ z > 1 \end{cases} \\ \begin{cases} x^2 - y^2 + z^2 = 16 \\ x^2y^2 > 1 \\ z > 1 \end{cases} & & \end{array}$$

Край кусочно-гладкий, размерности компонент края в порядке по строкам: 0, 1, 1, 1, 2, 2, 2 (каждая компонента - многообразие, размерность которых можно вычислить используя формулировки соответствующих теорем о задании многообразий). \square

Пример 1.18. в \mathbb{R}^3 . $x^2 + y^2 \leq 1, x \geq 0, z \geq 0, z \leq 1$



– грань тела, 2-мерное многообразие.

1.3 Касательное и нормальное пространства

Определение 1.19. Пусть $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n \in C^1$, тогда вектор $\gamma'(t) \in \mathbb{R}^n$ называется вектором скорости кривой γ .

Определение 1.20. Вектор $\vec{v} \in \mathbb{R}^n$ называется касательным к множеству $M \subseteq \mathbb{R}^n$ в точке $x_0 \in M$, если это вектор скорости некоторой кривой, лежащей в M , т.е. существует кривая $\gamma : [0, \varepsilon] \rightarrow M$, такая что $\gamma(0) = x_0$ и $\gamma'_t(0) = \vec{v}$.

Множество касательных векторов к M в точке x_0 обозначается $T_{x_0}M$.

Задача 1.21. Пусть $\gamma : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}^n$ – параметризованная кривая, $\Psi : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ – C^1 -диффеоморфизм. Показать, что если v – вектор скорости кривой γ в точке $t_0 \in (a, b)$, то $d\Psi_{\gamma(t_0)}\langle v \rangle$ – вектор скорости кривой $\Gamma = \Psi \circ \gamma$ в точке t_0 .

Решение. Воспользуемся правилом дифференцирования композиции:

$$d(\Psi \circ \gamma)\langle t_0 \rangle = d(\Psi_{\gamma(t_0)})\langle \gamma(t_0) \rangle = d(\Psi_{\gamma(t_0)})\langle v \rangle. \quad \square$$

Лемма 1.22. Коллинеарный касательному вектору так же является касательным вектором, т.е. если $\vec{v} \in T_{x_0}M$, то $\forall \lambda > 0 \lambda \vec{v} \in T_{x_0}M$.

Доказательство. По условию, существует кривая $\gamma \subset M$, для которой \vec{v} является вектором скорости. Зададим кривую $\tilde{\gamma}(t) = \gamma(\lambda t)$ и проверим, что вектор $\lambda \vec{v}$ является ее вектором скорости. Действительно

$$\tilde{\gamma}'(0) = \lambda \gamma'(0) = \lambda \vec{v}$$

□

Теорема 1.23 (О множестве касательных векторов). *Если $M \subseteq \mathbb{R}^n$ — C^1 -гладкое k -мерное многообразие, $x_0 \in M$, тогда:*

1. Если $x_0 \in M \setminus \partial M$, то $T_{x_0}M \simeq \mathbb{R}^k$.
2. Если $x_0 \in \partial M$, то $T_{x_0}M \simeq \mathbb{R}_+^k$.

Доказательство. По определению k -мерного многообразия, для каждого $x_0 \in M$ существует U — окрестность x_0 и существует C^r -диффеоморфизм $\Phi : U \rightarrow \Phi(U)$, такой что $\Phi(x_0) = 0$ и $\Phi(U \cap M) = V \times \{0\}^{n-k}$, где V — окрестность нуля в \mathbb{R}^k .

Под действием Φ кривая перейдет в кривую.

$$\gamma : [0, \varepsilon] \rightarrow M \implies \Gamma(t) = \Phi(\gamma(t)) = (x_1(t), \dots, x_k(t), 0, \dots, 0) \implies \Gamma'(t) = (x'_1(t), \dots, x'_k(t), 0, \dots, 0).$$

$\Gamma'(t) = (\Phi(\gamma(t)))' = D\Phi_{\gamma(t)}\langle \gamma'(t) \rangle$ — линейное отображение, такое, что $\det D\Phi \neq 0$.

$T_{x_0}M = D\Phi^{-1}(\mathbb{R}^k \times \{0\}^{n-k}) \implies T_{x_0}M$ — k -мерная плоскость (т.к. дифференциал переводит плоскость в плоскость). □

Определение 1.24. Нормальное пространство $N_{x_0}M$ к дифференцируемому многообразию в точке x_0 — это ортогональное дополнение к касательному пространству $T_{x_0}M$.

Лемма 1.25. Пусть $M \subset \mathbb{R}^n$ и $x_0 \in M$, тогда если $\dim M = k$ то, $\dim T_{x_0}M = k$ и $\dim N_{x_0}M = n - k$.

Теорема 1.26 (О базисе касательного пространства). Пусть многообразие M задано параметрически:

$$\begin{cases} x_1 = f_1(t_1, \dots, t_k), \\ \dots \\ x_n = f_n(t_1, \dots, t_k). \end{cases}$$

, где $(t_1, \dots, t_k) \in U$.

Пусть $U \subseteq \mathbb{R}^k$ — открытое множество, $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$, $f \in C^r$ и $t^0 \in U$. Тогда, если $M = f(U)$ — многообразие и $\text{rank } Df = k$, то $\left\{ \frac{\partial f}{\partial t_1}(t^0), \dots, \frac{\partial f}{\partial t_k}(t^0) \right\}$ — базис в $T_{f(t^0)}M$.

Доказательство. Пусть $t^0 \in U$, определим $\Gamma_j = t^0 + t \cdot \vec{e}_j$, тогда $\gamma_j(t) = f(\Gamma_j(t))$ — кривая на многообразии.

Найдем её касательный вектор в точке t^0 : $\gamma'_j(t^0) = \frac{d}{dt}f(t^0 + t \cdot \vec{e}_j) = \frac{\partial f}{\partial t_j}(t^0) \in T_{f(t^0)}M$.

Набор векторов $\left\{ \frac{\partial f}{\partial t_i} \right\}_{i=1}^k$ является линейно независимым и их количество равно размерности касательного пространства. \square

Теорема 1.27. Пусть многообразие M задано системой уравнений:

$$\begin{cases} f_1(x_1, \dots, x_n) = a_1, \\ \dots \\ f_k(x_1, \dots, x_n) = a_k. \end{cases}$$

и $f_1, \dots, f_k : U \rightarrow \mathbb{R}$, $f_i \in C^r \forall i \leq k$, $U \subseteq \mathbb{R}^n$ — открытое множество, а так же $\text{rank}\left(\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right) = k$, тогда система уравнений

$$\begin{cases} df_1(x_0)\langle \vec{v} \rangle = 0, \\ \dots \\ df_k(x_0)\langle \vec{v} \rangle = 0. \end{cases}$$

задает $T_{f(t_0)}M$, а $\{\nabla f_1(x_0), \dots, \nabla f_k(x_0)\}$ — базис в $N_{x_0}M$.

Доказательство. Пусть $x_0 \in M$. Возьмем вектор $\vec{v} \in T_{f(t_0)}M$, тогда по определению существует кривая $\gamma : [0, \varepsilon] \rightarrow M$, такая что $\gamma(0) = x_0$ и $\gamma'_t(0) = \vec{v}$.

$$f(\gamma(t)) = 0 \implies 0 = f(\gamma(t))' = df_{f(t)}\langle \gamma'(t) \rangle.$$

Подставим $t = 0 \implies 0 = df_{x_0}\langle \vec{v} \rangle$. Из этого равенства следует, что:

$$\begin{cases} df_1(x_0)\langle \vec{v} \rangle = 0 \\ \dots \\ df_k(x_0)\langle \vec{v} \rangle = 0 \end{cases}$$

Заметим, что $0 = df_{x_0}\langle \vec{v} \rangle = \nabla f_j(x_0) \cdot \vec{v}$, из чего получаем, что $\{\nabla f_1(x_0), \dots, \nabla f_k(x_0)\}$ — базис в $N_{x_0}M$, т.к. $T_{f(t_0)}M \perp N_{x_0}M$. \square

1.4 Задача на условный экстремум

Определение 1.28. Пусть M, N — дифференцируемые многообразия, тогда $f : M \rightarrow N$ дифференцируема в точке x_0 , если существует линейное отображение $L : T_{x_0}M \rightarrow T_{f(x_0)}N$, такое что для каждой кривой $\gamma : [0, \varepsilon] \rightarrow M$, такой что $\gamma \in C^1$, $\gamma(0) = x_0$, $\gamma'(0) = \vec{v} \in T_{x_0}M$, выполняется $f(\gamma(t)) = f(x_0) + tL(\vec{v}) + o(t)$.

Теорема 1.29 (Необходимое условие экстремума). Пусть $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ — дифференцируема и x_0 — её экстремум, тогда $df(x_0) = 0$.

Доказательство. Пусть $\vec{v} \in T_{x_0}M \iff \exists$ кривая $\gamma : [0, \varepsilon] \rightarrow M$, такая что $\gamma(0) = x_0$ и $\gamma'_t(0) = \vec{v}$.

Для $f|_\gamma$ x_0 — экстремум, следовательно $f(\gamma(t))'(0) = 0 = df_{x_0}(\vec{v})$. \square

Пусть $f : U \rightarrow \mathbb{R}$, $U \subseteq \mathbb{R}^n$ — открытое множество, $M \subseteq U$ — k -мерное многообразие. Ставится задача: найти экстремум на многообразии $f|_M$.

Теорема 1.30 (Необходимое условие условного экстремума). Если $x_0 \in M$ — точка экстремума f , то $df|_{T_{x_0}M} = 0 \iff \nabla f(x_0) \in N_{x_0}M$.

Доказательство. Пусть $\vec{v} \in T_{x_0}M \iff \exists$ кривая $\gamma : [0, \varepsilon] \rightarrow M$, такая что $\gamma(0) = x_0$ и $\gamma'_t(0) = \vec{v}$.

Тогда x_0 — экстремум $f(\gamma(t))$ и $f(\gamma(0)) = 0$. Заметим, что $f(\gamma(t)) = df_{\gamma(0)}(\gamma'(0)) = df_{x_0}(\vec{v})$. \square

Теорема 1.31 (Метод множителей Лагранжа). Пусть $f, \varphi_1, \dots, \varphi_k : U \rightarrow \mathbb{R}$, $U \subseteq \mathbb{R}^n$. Тогда, если x_0 — условный экстремум при условиях $\varphi_1(\bar{x}) = 0, \dots, \varphi_k(\bar{x}) = 0$, то $dL(x_0) = 0$, где $L(\bar{x}, \lambda_1, \dots, \lambda_k) = f(\bar{x}) - \lambda_1\varphi_1(\bar{x}) - \dots - \lambda_k\varphi_k(\bar{x})$ — функция Лагранжа.

Доказательство. Рассмотрим $L(\bar{x}, \lambda_1, \dots, \lambda_k)$. $\frac{\partial L}{\partial \lambda_j}(x) = -\varphi_j(x) = 0 \Rightarrow x$ — решение системы уравнений.

Возьмем частную производную L по x_j :

$$\frac{\partial L}{\partial x_j}(x, \lambda) = \frac{\partial f}{\partial x_j}(x) - \lambda_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_j}(x) - \dots - \lambda_k \frac{\partial \varphi_k}{\partial x_j}(x) = 0,$$

отсюда $\nabla f(x) = \lambda_1 \nabla \varphi_1(x) + \dots + \lambda_k \nabla \varphi_k(x)$ — градиенты $\nabla \varphi_i$ — это нормали, следовательно, их линейная комбинация тоже нормаль. Таким образом, ∇f — нормаль к поверхности и выполнено необходимое условие условного экстремума. \square

Лемма 1.32 (Правило дифференцирования вдоль кривой).

Пусть $f : U \rightarrow \mathbb{R} \in C^2$, $U \subseteq \mathbb{R}^n$ – открытое множество и $\gamma : [a, b] \rightarrow U \in C^2$ – кривая. Тогда

1. $(f \circ \gamma)'(t) = df_{\gamma(t)} \langle \gamma'(t) \rangle$,
2. $(f \circ \gamma)''(t) = d^2 f_{\gamma(t)} \langle \gamma'(t), \gamma'(t) \rangle + df_{\gamma(t)} \langle \gamma''(t) \rangle$.

Есть два способа доказательства, здесь будет приведен самый оптимальный. Другой способ вы сможете найти в своих лекциях ;-)

Доказательство. $(f \circ \gamma)''(t) = (df_{\gamma(t)} \langle \gamma'(t) \rangle)'_t$ – дифференцирование сложной функции.

Напомним, что $d_x(df_x \langle \vec{v} \rangle) = d^2 f(x) \langle \vec{v} \rangle$ и $d_{\vec{v}}(df_x \langle \vec{v} \rangle) = df_x$.

Отсюда имеем $(df_{\gamma(t)} \langle \gamma'(t) \rangle)'_t = d^2 f_{\gamma(t)} \langle \gamma'(t), \gamma'(t) \rangle + df_{\gamma(t)} \langle \gamma''(t) \rangle$.

□

Теперь мы готовы сформулировать достаточное условие экстремума.

Перед доказательством заметим, что если $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ – уравнения связи, то $x \in M$ (лежит в многообразии) тогда и только тогда, когда

$$\begin{cases} \varphi_1(x) = 0, \\ \dots \\ \varphi_n(x) = 0. \end{cases}$$

Теорема 1.33 (Достаточное условие экстремума в методе множителей Лагранжа). Пусть $U \subset \mathbb{R}^n$, $f, \varphi_1, \dots, \varphi_k : U \rightarrow \mathbb{R} \in C^2$, $\text{rank} \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial x_j} \right) = k$ всюду, то функция Лагранжа $L(x, \lambda_1, \dots, \lambda_k) = f(x) - \lambda_1 \varphi_1(x) - \dots - \lambda_k \varphi_k(x)$ если $dL(x_0, \lambda_0) = 0$, то при $d_x^2 L(x_0, \lambda_0) > 0$ – достигает минимума, при $d_x^2 L(x_0, \lambda_0) < 0$ – максимума.

Доказательство. Пусть $dL(x_0, \lambda_0) = 0$, $d_x^2 L(x_0, \lambda_0) |_{T_{x_0} M \times T_{x_0} M} > 0$.

$dL(x_0, \lambda_0) = 0 \iff \frac{\partial L}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x} - \sum_{j=1}^k \lambda_j \frac{\partial \varphi_j}{\partial x_j} = 0 \iff \nabla f(x_0) = \sum_{j=1}^k \lambda_j \nabla \varphi_j$. Кроме того, $\frac{\partial L}{\partial x} = 0 = -\varphi_j \iff x_0 \in M$. Следовательно, $\nabla f(x) \in N_{x_0} M \iff df_{x_0} |_{T_{x_0} M} = 0$.

Возьмем произвольную $\gamma : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow M \in C^2$, $\gamma(0) = x_0$. Посмотрим, как ведет себя функция f на кривой γ , т.е. ограничение функции на эту кривую.

Рассмотрим $f \circ \gamma : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow \mathbb{R}$. По лемме 1.32 $(f \circ \gamma)'(t) = df_{\gamma(t)} \langle \gamma'(t) \rangle$. $(f \circ \gamma)'(0) = df_{x_0} \langle \gamma'(0) \rangle = 0$.

Поскольку образ кривой лежит в многообразии

$$\gamma(t) = x \in M \iff \begin{cases} \varphi_1(\gamma(t)) \equiv 0, \\ \dots \\ \varphi_k(\gamma(t)) \equiv 0. \end{cases}$$

Подставим $\gamma(t) = x$ в $L(x, \lambda)$, получим

$$L(\gamma(t), \lambda) = f(\gamma(t)) - \lambda_1 \varphi_1(\gamma(t)) - \dots - \lambda_k \varphi_k(\gamma(t)) = f(\gamma(t))$$

далее,

$$(f \circ \gamma)''(t) = (L(\gamma(t), \lambda))'_{tt} = d_x^2 L \langle \gamma'(t), \gamma'(t) \rangle + d_x L \langle \gamma''(t) \rangle.$$

подставим ноль

$$(f \circ \gamma)''(0) = d_x^2 L \langle \gamma'(0), \gamma'(0) \rangle + 0 > 0.$$

Имеем, что $f \circ \gamma : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow \mathbb{R}$, $(f \circ \gamma)'(0) = 0$, $(f \circ \gamma)''(0) > 0$. Следовательно, $t = 0$ является точкой минимума для $f \circ \gamma$.

Таким образом, x_0 – точка минимума для любой кривой $\gamma \subseteq M$, проходящей через x_0 . Следовательно, x_0 – точка минимума для $f|_M$. \square

Пример 1.34. Найти экстремумы функции $f(x, y, z) = x^2 - 2x + y^2 - z^2$ на $x^2 + y^2 \leq 4, 0 \leq z \leq 1$.

1.5 Площадь поверхности

Пусть $v_1, \dots, v_n \in \mathbb{R}^n$. Из прошлого семестра, мы знаем, что n -мерный объем параллелепипеда $\Pi(v_1, \dots, v_n) = \{t_1 v_1 + \dots, t_n v_n : t_i \in [0, 1]\}$, натянутого на набор векторов $v_1, \dots, v_n \in \mathbb{R}^n$ может быть вычислен по формуле $|\Pi| = |\det[v_1, \dots, v_n]|$. Так же он может быть вычислен с помощью определителя матрицы Грамма, полагая $A = [v_1, \dots, v_n]$, из $(\langle v_i, v_j \rangle)_{ij} = A^T A$ получаем: $\det A^T A = \det A^T \det A = (\det A)^2 = (|\Pi|)^2$.

Вспомним так же, как изменяется мера при отображениях.

Пусть $L : \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^n$ – линейное отображение. Мы знаем, что для любого измеримого множества $E \subseteq \mathbb{R}^k$, мера его образа вычисляется по формуле $|L(E)| = J_L |E| = |\det L| |E|$.

Если же отображение $\varphi \in C^1$ не является линейным, мы можем приблизить его линейным и получить формулу локального искажения меры:

$$J_{\varphi(x)} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{|\varphi(Q(x, r))|}{|Q(x, r)|} = |\det D\varphi(x)|$$

Из чего мы получаем, что для каждого измеримого множества E , мера его образа вычисляется по формуле $|\varphi(E)| = \int_E J_{\varphi(x)} dx$.

Поскольку мы работаем не со всем пространством, мы можем расширить эти определения.

Теорема 1.35 (Объем k -мерного параллелепипеда). Пусть $v_1, \dots, v_k \in \mathbb{R}^n, k \leq n$. Тогда $|\Pi(v_1, \dots, v_n)|_k = \sqrt{\det(\langle v_i, v_j \rangle)}$. Обозначив за $A = [v_1, \dots, v_n]$, это выражение можно записать в виде $|\Pi| = \sqrt{\det A^* A}$.

Доказательство. Пусть k -мерная гиперплоскость L содержит в себе параллелепипед Π .

Существует ортогональное преобразование $Q : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, такое что $Q(L) = \mathbb{R}^k \times \{0\}^{n-k}$. Применим это преобразование к набору векторов, на которые натянута параллелепипед: $Q(v_i) = (a_{1i}, \dots, a_{ki}, 0, \dots, 0)^T$.

Заметим, что ортогональное преобразование не меняет объем.

$$A = [v_1; \dots; v_k] \quad QA = \begin{pmatrix} \theta \\ 0 \end{pmatrix} \text{ где } \theta - k \times k \text{ матрица}$$

Используя равенство $(QA)^* QA = \theta^* \theta$, получаем требуемое утверждение:

$$|Q(\Pi)|_k = |\Pi|_k = |\det \theta| = \sqrt{\det \theta^* \theta} = \sqrt{\det(QA)^* QA} = \sqrt{\det A^* A}$$

□

Определение 1.36. Пусть A - матрица, имеющая из n строк и k столбцов и $M(n, k) = \{I = (i_1, \dots, i_k) \in \mathbb{N}^k : 1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k \leq n\}$ - множество мультииндексов. Тогда A_I - минор, составленный из i_1, i_2, \dots, i_k строк матрицы A .

Теорема 1.37 (Формула Бине-Коши). Пусть A - матрица, имеющая из n строк и k столбцов, тогда $\det A^* A = \sum_{I \in M(n, k)} \det^2 A_I$.

Доказательство. Докажем более общее утверждение: пусть $A, B = (n, k)$ -матрицы, тогда $\det A^* B = \sum_{I \in M(n, k)} \det A_I \det B_I$.

Пусть $A = [u_1; \dots; u_n]$ и $B = [v_1, \dots, v_n]$, определим отображения L_1 и L_2 следующим образом:

$$L_1 \langle u_1, \dots, u_k, v_1, \dots, v_k \rangle = \det A^* B$$

$$L_2 \langle u_1, \dots, u_k, v_1, \dots, v_k \rangle = \sum_{I \in M(n, k)} \det A_I \det B_I$$

Заметим, что L_1 и L_2 линейны по каждому аргументу, следовательно, чтобы доказать, что $L_1 = L_2$ достаточно доказать что они одинаково действуют на базис (TODO: ???).

$$L_1 \langle e_{i1}, \dots, e_{ik}, e_{j1}, \dots, e_{jk} \rangle = \delta_{IJ} = L_2 \langle e_{i1}, \dots, e_{ik}, e_{j1}, \dots, e_{jk} \rangle$$

□

Следствие 1.38. Пусть $L : U \subseteq \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^n$ - линейное отображение, такое, что $\text{rank } L = k \leq n$. Тогда для каждого измеримого множества A , $L(A)$ - измеримо и $|L(A)|_k = J_L |A|_k$, где $J_L = \sqrt{\det L^* L}$.

Следствие 1.39. Пусть Π - k -мерная плоскость в \mathbb{R}^n и $\varphi : \mathbb{R}^k \rightarrow \Pi$ - C^1 -диффеоморфизм. Тогда для каждого измеримого $E \subset \mathbb{R}^k$, $\Pi(E)$ - измеримо и $|\varphi(E)|_k = \int_E J_\varphi(x) dx$, где $J_\varphi = \sqrt{\det D\varphi^*(x) D\varphi(x)}$.

Из формулы Коши-Бине так же можно получить выражения для скалярного и векторного произведения.

К примеру, взяв за A некоторый вектор $v \in \mathbb{R}^n$, можно получить:

$$v^T v = \langle v, v \rangle = |v|^2 = \sum_{i=1}^n v_i^2$$

Аналогично, если разместить векторы $u, v \in \mathbb{R}^3$ в столбцы матрицы A , получим (TODO: расписать это подробнее):

$$A^2 = \begin{vmatrix} u_1 & v_1 \\ u_2 & v_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} u_1 & v_1 \\ u_2 & v_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} u_2 & v_2 \\ u_3 & v_3 \end{vmatrix} = |u \times v|^2$$

Теперь мы готовы определить меру на многообразиях.

Пусть $M \subseteq \mathbb{R}^n$ - k -мерное C^1 -гладкое многообразие, заданное параметрически, т.е. существует $\varphi : U \subseteq \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^n$, такое что $\varphi \in C^1$ и $M = \varphi(U)$.

$$\varphi = \begin{cases} x_1 = \varphi_1(t_1, \dots, t_k) \\ \vdots \\ x_n = \varphi_n(t_1, \dots, t_k) \end{cases} \quad (t_1, \dots, t_k) \in U$$

Определим меру k -мерной площади S^k на параметрически заданном многообразии M .

Определение 1.40. Пусть $E \subseteq U \rightarrow \mathbb{R}^k$ - измеримо по $|\cdot|_k$, тогда $\varphi(E)$ назовем измеримым по S^k и будем вычислять его меру как $S^k(\varphi(E)) := \int_E J_\varphi(t) dt$, где $J_\varphi(t) = \sqrt{\det D\varphi^*(t) D\varphi(t)}$.

Внимательный читатель задастся вопросом: а не зависит ли наша мера от параметризации многообразия?

Лемма 1.41. Пусть $\varphi : U \subseteq \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^n$ и $\psi : V \subseteq \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^n$ - различные параметризации многообразия, такие что $\text{rank } D\varphi = \text{rank } D\psi = k$. Тогда $\int_U J_\varphi(t) dt = \int_V J_\psi(t) dt$.

Доказательство. Рассмотрим $\psi^{-1} \circ \varphi$ — отображение между U и V .

Очевидно, что $\psi^{-1} \circ \varphi$ является биекцией и $\det D\psi^{-1} \circ \varphi \neq 0$. Следовательно, $\psi^{-1} \circ \varphi$ — C^1 -диффеоморфизм.

Сделаем замену переменных $y = \psi^{-1}(\varphi(x))$ в интеграле:

$$\begin{aligned} \int_V \sqrt{\det D\psi^*(y) D\psi(y)} dy &= \int_U \sqrt{\det D\psi^*(\psi^{-1} \circ \varphi(x)) D\psi(\psi^{-1} \circ \varphi(x))} \\ |\det D\psi^{-1} \circ \varphi(x)| dx &= \int_U \sqrt{\det D\psi^*(\psi^{-1} \circ \varphi(x)) D\psi(\psi^{-1} \circ \varphi(x))} \\ &\quad \sqrt{\det D(\psi^{-1} \circ \varphi)^*(x) \det D\psi^{-1} \circ \varphi(x)} dx \end{aligned}$$

Заметим, что:

$$D\psi(\psi^{-1} \circ \varphi) = D\psi(\psi^{-1} \circ \varphi) \cdot D(\psi^{-1} \circ \varphi) = D\varphi$$

Осталось применить то, что произведение определителей равно определителю произведения и подставить это равенство в интеграл. \square

Рассмотрим некоторые свойства меры S^k :

1. Счетная аддитивность.

Пусть $\{M_i\}_{i \in N}$ — не более чем счетный дизъюнктивный набор множеств, тогда $S^k(\bigcup_i M_i) = \sum_i S^k(M_i)$.

2. Меру можно доопределить для кусочно-гладкого многообразия, так как мера множества размерности меньше k равна нулю в мере S^k .

Пример 1.42. Вывести формулу длины кривой $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ с помощью меры S^k и формулы Бине-Коши.

Решение.

$$\gamma(t) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{pmatrix} \quad D\gamma(t) = \begin{pmatrix} x'_1(t) \\ \vdots \\ x'_n(t) \end{pmatrix} \text{ - вектор скорости}$$

$$\sqrt{\det D\gamma^*(t)D\gamma(t)} = \sqrt{x_1'^2 + \dots + x_n'^2} = |\gamma'(t)|$$

$$l(\gamma) = \int_a^b |\gamma'(t)| dt$$

□

Определение 1.43. Мера угла – длина дуги окружности с центром в начале угла.

1.6 Площадь графика функции

Пусть $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n \in C^1$, где $U \subseteq \mathbb{R}^n$ её график – n -мерное многообразие $\Gamma_f = \{(\bar{x}, f(x)) \in \mathbb{R}^{n+1}\}$.

Чтобы найти S^k надо параметризовать график функции. Пусть

$$\varphi : \begin{cases} x_1 = x_1, \\ \dots \\ x_n = x_n, \\ y = f(x_1, \dots, x_n). \end{cases}$$

– параметризация графика. Тогда $S^k(\Gamma_f) = \int_U J_\varphi(x) dx$.

Посчитаем $D\varphi$.

$$D\varphi = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & 1 & \\ \frac{\partial f}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f}{\partial x_n} \end{pmatrix}_{n \times (n+1)}$$

Нам нужно посчитать определитель матрицы $\det D\varphi^* D\varphi$. Если мы будем считать «в лоб»:

$$D\varphi^* D\varphi = E + \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial f}{\partial x_j} \right)_{i,j}$$

Получилась довольно сложная конструкция. Определитель проще вычислить по формуле Бине-Коши.

$$\det D\varphi^* D\varphi = 1 + f_{x_1}^2 + f_{x_2}^2 + \dots + f_{x_n}^2 = 1 + |\nabla f|^2$$

Отсюда получаем, что

$$S^k(\Gamma_f) = \int_U \sqrt{1 + |\nabla f(x)|^2} \, dx$$

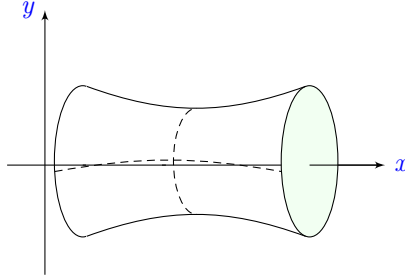
Свойство формулы 1.6:

- $S^k(\lambda M) = \lambda^k S^k(M)$

Доказательство. TODO

□

Пример 1.44 (Вывод частной формулы из общей). Пусть $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}_+$



– поверхность, полученная вращением кривой относительно оси Ox .

Для того, чтобы вывести формулу, нам нужно параметризовать поверхность. Должно быть два параметра (x, φ) . Воспользуемся цилиндрической системой координат:

$$\begin{cases} x = x, \\ y = f(x) \cos \varphi, \\ z = f(x) \sin \varphi. \end{cases}$$

Вывод формулы: TODO.

2 Криволинейные интегралы

2.1 Криволинейные интегралы I-рода

Определение 2.1. Пусть M – n -мерное дифференцируемое многообразие, задана функция $f : M \rightarrow \mathbb{E}$ – измеримая по S^k . Тогда интегралом по поверхности назовем

$$\int_M f dS^k$$

Чтобы взять интеграл по поверхности нам нужно:

1. надо выбрать параметризацию
2. подставить параметризацию в интеграл

Если мы выберем некоторую параметризацию $M = \varphi(U)$, то $S^k(M) = \int_U J_\varphi(x) dx$, получаем,

$$\int_M f(y) dS^k = \int_U f(\varphi(x)) \cdot J_\varphi(x) dx$$

Свойства интеграла по поверхности

1. линейность: если $f, g : M \rightarrow \mathbb{E}$ и $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$, то

$$\int_M (\alpha f + \beta g) dS^k = \alpha \int_M f dS^k + \beta \int_M g dS^k.$$

2. монотонность: если $f, g : M \rightarrow \mathbb{E}$ и $f \leq g$, то

$$\int_M f dS^k \leq \int_M g dS^k.$$

3. аддитивность по области определения: если $f : M \rightarrow \mathbb{E}$ и $M_1 \cap M_2 = \emptyset$, то

$$\int_{M_1 \cup M_2} f dS^k = \int_{M_1} f dS^k + \int_{M_2} f dS^k.$$

4. ограниченность: если $f : M \rightarrow \mathbb{E}$, то

$$\left| \int_M f dS^k \right| \leq \int_M |f| dS^k.$$

2.2 Объем шара и площадь сферы

Введем сферическую систему координат в \mathbb{R}^k :

$$u = \begin{cases} x_1 = r \cos \varphi \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cdots \cos \theta_{n-2} \\ x_2 = r \sin \varphi \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cdots \cos \theta_{n-2} \\ x_3 = r \sin \varphi \cos \theta_2 \cdots \cos \theta_{n-2} \\ \vdots \\ x_n = r \sin \theta_2 \cdots \cos \theta_{n-2} \\ r \geq 0 \quad \varphi \in [0, 2\pi] \quad \theta_i \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}] \end{cases}$$

Заметим, что $u(r, \varphi, \theta_1, \dots, \theta_{n-2})$ - параметризация шара, а $\tilde{u}(\varphi, \theta_1, \dots, \theta_{n-2}) = u|_{r=\text{const}}$ - параметризация сферы.

Обозначим n -мерный шар радиуса r как B_r . Соответственно S_r - $(n - 1)$ -мерная сфера радиуса r .

Вычислим якобианы J_u и $J_{\tilde{u}}$ этих параметризаций. Нам известно, что $J_u = |\det Du|$ и $J_{\tilde{u}} = |\det D\tilde{u}|$.

Рассмотрим набор векторов $\{u_r, u_\varphi, u_\theta, \dots, u_{\theta_{n-2}}\}$, где $u_s = \{\frac{\partial x_1}{\partial s}, \dots, \frac{\partial x_n}{\partial s}\}$. Нетрудно проверить, что этот набор является ортогональным. Следовательно, объем параллелепипеда, который натянут на этот набор можно вычислить как произведение длин векторов набора.

$$J_u = |u_r| |u_\varphi| |u_\theta| \cdots |u_{\theta_{n-2}}| \quad J_{\tilde{u}} = |u_\varphi| |u_\theta| \cdots |u_{\theta_{n-2}}|$$

Вычислим длины этих векторов.

$$\begin{aligned} |u_r| &= 1 \\ |u_\varphi| &= r \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cdots \cos \theta_{n-2} \\ |u_{\theta_1}| &= r \cos \theta_2 \cdots \cos \theta_{n-2} \\ &\dots \\ |u_{\theta_{n-3}}| &= r \cos \theta_{n-2} \\ |u_{\theta_{n-2}}| &= r \end{aligned}$$

Из того, что $|u_r| = 1$ следует, что $J_u = J_{\tilde{u}}$.

Теперь мы можем записать конкретное выражение для J_u :

$$J_u = r^{n-1} \cos \theta_1 \cos^2 \theta_2 \cdots \cos^{n-2} \theta_{n-2}$$

Из этого следуют формулы объема шара и площади сферы:

$$|B_R| = \int_0^R dr \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} d\theta_1 \cdots \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} d\theta_{n-2} = w_n R^n$$

$$S^{n-1}(S_r) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} d\theta_1 \cdots \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} d\theta_{n-2}$$

Так как $J_u = J_{\tilde{u}}$, можно получить другое выражение для объема шара:

$$|B_r| = \int_0^R S^{n-2}(S_r) dr$$

То есть, чтобы найти объем шара нужно вычислить площади сфер, которые в нем содержатся. Так же площадь сферы можно представить в виде объемов шаров:

$$S^{n-1}(S_r) = (w_n r^n)'_r = r w_n r^{n-1}$$

2.3 Формула коплощади

Пусть $\varphi : U \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$. Потребуем, чтобы $\nabla\varphi \neq 0$ (т. е. $\text{rank } D\varphi = k$ - максимальный).

Уравнение $\varphi(x) = 0$ задает поверхность в U . Эту поверхность можно так же задать как $\varphi^{-1}(0)$. Из этого получаем:

$$\int_a^b S^{n-1}(\varphi^{-1}(t)) dt = \int_U J_\varphi(x) dx = \int_U |\nabla\varphi|(x) dx$$

Теорема 2.2 (Формула коплощади). Пусть $\varphi : U \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^k \in C^1$, такая, что $\text{rank}(D\varphi) = k$, тогда верна формула коплощади

$$\int_U f(x) J_\varphi(x) dx = \int_{\mathbb{R}^k} dt \int_{\varphi^{-1}(t)} f(\varphi(t)) dS^{k-1}$$

, где

$$J_\varphi(x) = \sqrt{\det D\varphi(x) \det D\varphi^*(x)} = \sqrt{\det(\langle \nabla\varphi_i, \nabla\varphi_j \rangle)}$$

Доказательство. Пусть $x_0 \in U$. Мы знаем, что $\text{rank}(\frac{\partial \varphi_i}{\partial x_j}) = k$ - максимальный. Следовательно, в матрице $D\varphi$ есть k линейно-независимых столбцов. Для простоты будем считать, что это k последних столбцов.

По теореме о выпрямлении, существует C^1 -диффеоморфизм $\Phi : V \rightarrow W$, где V - окрестность x_0 , W - окрестность нуля, такая что:

$$\Phi \begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ h(x, z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

Выполним замену переменных в интеграле и воспользуемся формулой Фубини:

$$\begin{aligned} \int_U f(x, y) J_\varphi(x, y) dx dy &= \int_{\Phi^{-1}(U)} f(\Phi(x, z)) J_\varphi(\Phi(x, z)) J_{\Phi(x, z)} dx dy = \\ &= \int_{\mathbb{R}^k} dz \int_{\varphi^{-1}(U) \cap \mathbb{R}^{n-k}} f(\Phi(x, z)) J_\varphi(\Phi(x, z)) J_{\Phi(x, z)} dx \end{aligned}$$

Заметим, что $\Phi_{z(x)}^{-1} = \Phi^{-1}(x, z)$ при фиксированном z является поверхностью. Возьмем $s = \Phi_z^{-1}(x)$, тогда

$$\int_{U \cap \varphi^{-1}(z)} g(s) dS^{n-k} = \int_{\varphi(U) \cap \mathbb{R}_z^{n-k}} g(\Phi_z^{-1}(x)) J_{\Phi_z^{-1}}(x) dx$$

Теперь нужно подставить это в прошлое уравнение.

$$\int_{\mathbb{R}^k} dz \int_{\varphi^{-1}(U) \cap \mathbb{R}^{n-k}} f(\Phi(x, z)) J_\varphi(\Phi(x, z)) J_{\Phi(x, z)} dx = \int_{\mathbb{R}^k} dz \int_{U \cap \varphi^{-1}(z)} f(s) \frac{J_\varphi J_\Phi}{J_{\Phi_z^{-1}}}$$

Для того, чтобы закончить доказательство, нужно лишь доказать, что:

$$\frac{J_\varphi J_\Phi}{J_{\Phi_z^{-1}}} = 1$$

(TODO: продолжение следует) □

Следствие 2.3. Если $P_r : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^k$ - проекция, тогда

$$\int_U f(x) dx = \int_{\mathbb{R}^k} dt \int_{\mathbb{R}_t^{n-k}} f(y) dy$$

, где $\mathbb{R}_t^{n-k} = \{(y, s) : s = t\}$ - $(n - k)$ -мерная плоскость (TODO: а это точно следствие?).

3 Введение в векторный анализ

3.1 Дифференциальные формы

Определение 3.1. Векторным полем на многообразии M называется функция $F : M \rightarrow F(x)$, такая что $F(x) \in T_x M$.

Для того, чтобы выяснить, как замена переменных влияет на векторное поле, введем оператор переноса.

Определение 3.2. Пусть $\varphi : U \rightarrow V$ - C^1 -диффеоморфизм. Тогда оператором переноса назовем φ^* и определим результат его действия на функцию $f : V \rightarrow \mathbb{E}$ как функцию $\varphi^* f : U \rightarrow \mathbb{E}$, такую, что $\varphi^* f(x) = f(\varphi(x)) = (f \circ \varphi)(x)$.

Выясним как оператор переноса действует на векторное поле. Пусть $v : V \rightarrow TV$ - векторное поле, тогда $\varphi^* v : U \rightarrow TV$ и $\varphi^* v(x) = D\varphi_{\varphi(x)} \langle v(\varphi(x)) \rangle$.

Свойства оператора переноса:

1. линейность: $\forall \alpha, \beta \in \mathbb{R} \forall f, g$ - функции $\forall u, v$ - векторные поля.

$$\varphi^*(\alpha f + \beta g) = \alpha \varphi^* f + \beta \varphi^* g \quad \varphi^*(\alpha u + \beta v) = \alpha \varphi^* u + \beta \varphi^* v$$

2. мультипликативность: пусть $f : V \rightarrow \mathbb{R}$, $v : V \rightarrow TV$, $(f \circ v)(g) = f(g)\vec{v}(g)$. Тогда, если $\varphi : U \rightarrow V$ - C^1 -диффеоморфизм, то $\varphi^*(f\vec{v}) = \varphi^* f \cdot \varphi^* v$.

3. перенос композиции является произведением переносов: пусть $\varphi : U \rightarrow V$, $\psi : U \rightarrow V$ - C^1 -диффеоморфизмы, тогда $(\varphi \circ \psi)^* = \varphi^* \psi^*$.

4. перестановочность с дифференциалом: $\varphi^* d = d\varphi^*$.

Для доказательства последнего свойства, нам нужно ввести определение дифференциальной формы, а для этого нужно вспомнить некоторые свойства линейных отображений.

Пусть $L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ - линейное отображение. Рассмотрим действие L на вектор v :

$$L\langle v \rangle = L\langle v_1 e_1 + \dots + v_n e_n \rangle = v_1 L\langle e_1 \rangle + \dots + v_n L\langle e_n \rangle = v_1 a_1 + \dots + v_n a_n$$

Из этого уравнения следует то, что всякая линейная функция это скалярное произведение аргумента с некоторым постоянным вектором: $L\langle v \rangle = a \cdot v$.

Введем базис на пространстве линейных отображений $Lin(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}) \simeq \mathbb{R}^n$.

Набор функций $dx_1, \dots, dx_n : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, таких что $dx_j(v_1, \dots, v_n) = v_j$, является базисом в $Lin(\mathbb{R}^n, \mathbb{R})$. Следовательно, $L\langle v \rangle = a_1 v_1 + \dots + a_n v_n = a_1 dx_1 + \dots + a_n dx_n$.

Обозначим за $\Lambda^k(\mathbb{R}^n)$ пространство алгебраических форм степени k над \mathbb{R}^n . В частности $\Lambda^0(\mathbb{R}^n) = \mathbb{R}$ и $\Lambda^1(\mathbb{R}^n) = Lin(\mathbb{R}^n, \mathbb{R})$.

Определение 3.3. Дифференциальной формой степени k (сокращенно k -формой) на $U \subseteq \mathbb{R}^n$ будем называть $w : U \rightarrow \Lambda^k(\mathbb{R}^k)$.

Лемма 3.4. Существует так называемый дуализм между 1-формами и векторными полями, так как каждая 1-форма изоморфна некоторому векторному полю.

Доказательство. Рассмотрим некоторую 1-форму $w(x)$, тогда $w(x) = a_1(x)dx_1 + \dots + a_n(x)dx_n$. Пусть $v(x) = (a_1(x), \dots, a_n(x))$, тогда $w(x)\langle u \rangle = v(x) \cdot u$. \square

Дифференциал функции так же является 1-формой. Так что стоит задаться вопросом: а не все ли 1-формы являются дифференциалом некоторой функции? Пример ниже говорит, что ответ на этот вопрос - нет.

Пример 3.5. $w = xdy$ - 1-форма, но не дифференциал.

Доказательство. Допустим, что $w = df = f_x dx + f_y dy$. Тогда $f_x = 0$ и $f_y = x$. Из курса мы знаем, что для любой функции $f_{xy} = f_{yx}$. Проверим, так ли это в нашем случае. Получаем $f_{xy} = 0 \neq 1 = f_{yx}$. Получили противоречие. \square

Рассмотрим как перейти к полярным координатам в форме $w = xdy$. Пусть $x = r \cos \varphi$ и $y = r \sin \varphi$, тогда $\varphi^* w = r \cos \varphi d(r \sin \varphi) = r \cos \varphi (\sin \varphi dr + r \cos \varphi d\varphi) = r \sin \varphi \cos \varphi dr + r^2 \cos^2 \varphi d\varphi$.

Определим теперь оператор переноса для 1-форм.

Определение 3.6. Пусть w - 1-форма на V . Пусть $\varphi : U \rightarrow V \subseteq \mathbb{R}^n$ - C^1 -диффеоморфизм. Тогда $\varphi^* w$ - 1-форма на U и $\varphi^* w(x)\langle v \rangle = w(\varphi(x))\langle d\varphi(x)\langle v \rangle \rangle$.

Теперь мы можем доказать 4 свойство оператора переноса.

Лемма 3.7 (Четвертое свойство оператора переноса). Пусть $\varphi : U \rightarrow V$ - C^1 -диффеоморфизм, $f : V \rightarrow \mathbb{E} \in C^1$, тогда $\varphi^*(d\varphi) = d(\varphi^*f)$. Заметим так же, что слева от равенства стоит 1-форма, а справа 0-форма.

Доказательство. Утверждение следует из следующей цепочки равенств:

$$\begin{aligned}\varphi^*(df)(x)\langle v \rangle &= df(\varphi(x))\langle d\varphi(x)\langle v \rangle \rangle = df(\varphi(x)) \circ d\varphi(x)\langle v \rangle = \\ &= d(f \circ \varphi)(x)\langle v \rangle = d(\varphi^*f)(x)\langle v \rangle\end{aligned}$$

□

Пример 3.8 (Работа векторного поля вдоль кривой). Рассмотрим одно из физических приложений дифференциальных форм. Мы знаем, что работа силы вычисляется по формуле $A = \vec{F} \cdot \vec{l}$. То есть силу можно рассматривать как дифференциальную форму $A = w_g \langle l \rangle$. А теперь представим, что нам нужно посчитать работу вдоль кривой, где сила не постоянна на всех точках кривой. Получаем $A = \int_{\gamma} \vec{g}(x) \cdot \vec{r}'(x) dl(x)$.

Тут должна быть лекция за 19.03.19

3.2 Интеграл 1-формы по кривой

Пусть $\gamma - C^1$ -гладкая ориентированная кривая. Рассмотрим две регулярные параметризации. Тогда $\psi^{-1} \circ \varphi : [a, b] \rightarrow [c, d] \in C^1$ и $\psi^{-1} \circ \varphi \neq 0$.

Определение 3.9. Две параметризации φ, ψ называются сорентированными (противоположно ориентированными), если $(\psi^{-1} \circ \varphi)' > 0$ ($(\psi^{-1} \circ \varphi)' < 0$).

Определение 3.10. Параметризация φ кривой γ называется согласованной с ориентацией θ , если $\theta(\varphi(t), \varphi'(t)) > 0$.

Определение 3.11. Пусть $w : U \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \Lambda^1(\mathbb{R}^n)$ - непрерывная 1-форма и $\gamma \subset U - C^1$ -гладкая кривая с заданной ориентацией. Тогда интегралом 1-формы по ориентированной кривой называется $\int_{\gamma} w = \int_a^b w(\varphi(t))\langle \varphi'(t) \rangle dt$, где $\varphi : [a, b] \rightarrow \gamma$ - параметризация, согласованная с ориентацией.

Рассмотрим как использовать эту формулу на примере.

Пример 3.12. Пусть $w = xdy + ydx$, найти интеграл w по параболе $y = 4 - x^2$ в направлении возрастания y .

Решение. Введем параметризацию, согласованную с ориентацией:

$$\begin{cases} x = 1 - t \\ y = 4 - (1 - t)^2 \\ t \in [0, 1] \end{cases}$$

Тогда $dx = -dt$, $dy = 2(1 - t)dt$. Подставим эти выражения в формулу:

$$\begin{aligned} \int_{\gamma} xdy + ydx &= \int_0^1 x(t)dy(t) + y(t)dx(t) = \int_0^1 [x(t)y'(t) + y(t)x'(t)]dt = \\ &= \int_0^1 2(1 - t)^2dt - (4 - (1 - t)^2)dt = \int_0^1 [3(1 - t)^2 - 4]dt = \\ &= \int_0^1 (-1 - 6t + 3t^2)dt = -t - 3t^2 + t^3 \Big|_0^1 = -3 \end{aligned}$$

□

Свойства интеграла 1-формы

1. Определение не зависит от параметризации, согласованной с ориентацией

Доказательство. Пусть $\varphi : [a, b] \rightarrow \gamma, \psi : [c, d] \rightarrow \gamma \in C^1$ - параметризации, согласованные с ориентацией, следовательно они сориентированы. То есть $(\psi^{-1} \circ \varphi)' > 0$ и $(\psi^{-1} \circ \varphi)$ - монотонно возрастает, следовательно $(\psi^{-1} \circ \varphi)(a) = c$ и $(\psi^{-1} \circ \varphi)(b) = d$.

По определению интеграла 1-формы имеем:

$$\int_{\gamma} w = \int_c^d w(\psi(t)) \langle \psi'(t) \rangle$$

Проведем замену переменных $t = (\psi^{-1} \circ \varphi)(s)$.

$$\int_c^d w(\psi(t))\langle\psi'(t)\rangle = \int_a^b w(\psi(\psi^{-1}(\varphi(s))))\langle\psi'(\psi^{-1}(\varphi(s)))\rangle(\psi^{-1} \circ \varphi)'(s)ds$$

Так как $w(\psi(s))$ - линейный оператор, можем внести $(\psi^{-1} \circ \varphi)'(s)$ как множитель аргумента. Имеем $\psi'(\psi^{-1}(\varphi(s)))(\psi^{-1} \circ \varphi)'(s) = (\psi \circ \psi^{-1} \circ \varphi)'(s) = \varphi'(s)$ как производную композиции.

$$\int_a^b w(\psi(\psi^{-1}(\varphi(s))))\langle\psi'(\psi^{-1}(\varphi(s)))\rangle(\psi^{-1} \circ \varphi)'(s)ds = \int_a^b w(\varphi(s))\langle\varphi'(s)\rangle ds$$

□

2. Антисимметричность

Пусть γ - ориентированная кривая, тогда $-\gamma$ та же кривая, только с противоположной ориентацией.

$$\int_{-\gamma} w = - \int_{\gamma} w$$

Доказательство. Пусть $\varphi : [0, T] \rightarrow \gamma$ - параметризация кривой γ , согласованная с ориентацией, тогда $\psi(t) = \varphi(T-t)$ - параметризация кривой $-\gamma$, согласованная с ориентацией.

По определению интеграла 1-формы имеем:

$$\int_{\gamma} w = \int_0^T w(\varphi(t))\langle\varphi'(t)\rangle$$

Проведем замену переменных $t = (\varphi^{-1} \circ \psi)(s)$. Тогда $\psi(0) = T$ и $\psi(T) = 0$.

$$\begin{aligned}
\int_0^T w(\varphi(t)) \langle \varphi'(t) \rangle &= \int_T^0 w(\varphi(\varphi^{-1}(\psi(s)))) \langle \varphi'(\varphi^{-1}(\psi(s))) \rangle (\varphi^{-1} \circ \psi)'(s) ds = \\
&= \int_T^0 w(\psi(s)) \langle \psi^{-1}(s) \rangle ds = - \int_0^T w(\psi(t)) \langle \psi'(t) \rangle = - \int_{-\gamma} w
\end{aligned}$$

□

3. Линейность

$\forall w_1, w_2$ - формы, $\forall \alpha, \beta \in \mathbb{R}$.

$$\int_{\gamma} (\alpha w_1 + \beta w_2) = \alpha \int_{\gamma} w_1 + \beta \int_{\gamma} w_2$$

4. Аддитивность

Пусть $\varphi : [p, q] \rightarrow \gamma$ - параметризация кривой γ , возьмем $r \in [p, q]$ и определим $\varphi_{pr} : [p, r] \rightarrow \gamma_{pr}$ и $\varphi_{rq} : [r, q] \rightarrow \gamma_{rq}$, тогда

$$\int_{\gamma} w = \int_{\gamma_{pr}} + \int_{\gamma_{rq}}$$

Замечание 3.13. Если кривая замкнута, тогда вместо $\int_{\gamma} w$ используют обозначение $\oint_{\gamma} w$, чтобы подчеркнуть, что интеграл берется по замкнутому контуру.

Пример 3.14 (Работа векторного поля вдоль ориентированной кривой). Пусть \vec{v} - векторное поле, γ - ориентированная кривая, тогда работа векторного поля вдоль кривой γ вычисляется как ($\vec{\tau}$ - касательный вектор к кривой)

$$\int_{\gamma} v_1 dx_1 + \dots + v_n dx_n = \int_{\gamma} \vec{v} \cdot \vec{\tau} dl$$

Теорема 3.15 (Формула Ньютона-Лейбница). Пусть $w = df$ - полный дифференциал, γ - ориентированная кривая с начальной точкой p и конечной точкой q , тогда справедлива формула

$$\int_{\gamma} df = f(q) - f(p)$$

Доказательство. Пусть $\varphi : [a, b] \rightarrow \gamma$ - параметризация кривой, согласованная с ориентацией. Тогда $\varphi(a) = p$ - начальная точка кривой и $\varphi(b) = q$ - конечная точка кривой.

$$\int_{\gamma} df = \int_a^b df(\varphi(t)) \langle \varphi^{-1}(t) \rangle dt = \int_a^b [f(\varphi(t))]'_t dt = f(\varphi(t)) \Big|_a^b = f(q) - f(p)$$

□

Следствие 3.16. Если $w = df$, то $\int_{\gamma} w$ не зависит от пути γ , а только от начальной и конечной точки.

Следствие 3.17.

$$\oint_{\gamma} df = 0$$

Пример 3.18. Пусть $w = xdy + ydx$, найти интеграл w по параболе $y = 4 - x^2$ в направлении возрастания y .

Решение. Заметим, что w - полный дифференциал функции $f = xy$, а так же, что начальная точка параболы это $(1, 3)$, а конечная $(0, 4)$.

$$\int_{\gamma} xdy + ydx = \int_{\gamma} d(xy) = xy \Big|_{(1,3)}^{(0,4)} = 0 - 3 = -3$$

□

Теорема 3.19 (Критерий полного дифференциала). Пусть w - непрерывная 1-форма на множестве U . Тогда w является полным дифференциалом некоторой функции $f \in C^1$ тогда и только тогда, когда $\oint_{\gamma} w = 0$ для всех ориентированных замкнутых контуров $\gamma \subset U$.

Доказательство. Необходимость следует из 3.17.

Для доказательства достаточности построим функцию f .

Пусть U - открытое связное множество. Возьмем точку $x_0 \in U$ и положим, что $f(x_0) = C$. Возьмем так же $x \in U$ - другую точку и положим $f(x) = f(x_0) + \int_{\gamma} w$, где γ - кривая, соединяющая точки x и x_0 (начало в x_0 , конец в x).

Если γ_1 и γ_2 - две кривые из x_0 в x , то $\gamma_1 - \gamma_2$ - замкнутый контур и

$$0 = \int_{\gamma_1 - \gamma_2} w = \int_{\gamma_1} w - \int_{\gamma_2} w$$

Следовательно интегралы по разным кривым совпадают независимо от пути.

Продолжение следует ;)

□