

Формула Карно

В задаче 8 прошлого занятия было сформулировано важное утверждение, которое называется **формулой Карно** (по имени французского математика, физика и политического деятеля Лазаря Карно, 1753 – 1823).

Напомню формулировку:

В остроугольном треугольнике сумма расстояний от центра описанной окружности до сторон треугольника равняется сумме радиусов описанной и вписанной окружностей.

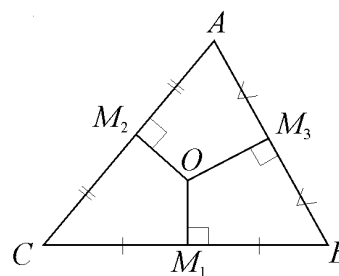


Рис. 1а

В виде формулы это удобно записать так: $OM_1 + OM_2 + OM_3 = R + r$ (в соответствии с обозначениями на рис. 1а). Эта формула играет важную роль для решения некоторых задач. Некоторые из вас доказали (или докажут) её с помощью теоремы Птолемея. Сегодня мы рассмотрим другой способ ее доказательства, в процессе которого будут получены другие важные факты.

Рассмотрим окружность, описанную около треугольника ABC . Пусть биссектриса угла A пересекает ее в точке W , а точка D диаметрально противоположна точке W .

Докажем сначала два вспомогательных факта:

1) $M_1W = \frac{r_a - r}{2}$; 2) $M_1D = \frac{r_b + r_c}{2}$, где r , r_a , r_b и r_c – радиусы вписанной и внеписанных окружностей, касающихся сторон BC , AC и AB соответственно.

Доказательство. 1) Пусть точки I и O_a соответственно – центры вписанной окружности и внеписанной окружности, касающейся стороны BC , K и P – точки касания этих окружностей с BC (см. рис. 1б), Так как W – середина отрезка IO_a (следствие из теоремы «трилистника») и $WM_1 \parallel IK \parallel LO_a$, то WQ – средняя линия треугольника ILO_a (L и Q – проекции точек O_a и W на прямую, параллельную BC и проходящую через точку I).

Следовательно, $WQ = \frac{1}{2} O_aL = \frac{r_a + r}{2}$, тогда

$$M_1W = WQ - M_1Q = \frac{r_a - r}{2}.$$

2) Так как DW – диаметр окружности, то $\angle DAW = 90^\circ$ (см. рис. 1в). Кроме того, AW – биссектриса угла BAC , поэтому, биссектрисы внешних углов треугольника при вершине A лежат на прямой AD , следовательно на этой прямой лежат и центры O_b и O_c внеписанных окружностей. Опустим перпендикуляры O_cB_0 и O_bC_0 на прямую BC , тогда $O_cB_0 = r_c$, $O_bC_0 = r_b$. Таким образом, $O_bO_cB_0C_0$ – трапеция и утверждение задачи равносильно тому, что отрезок M_1D является ее средней линией.

Заметим, что $BC_0 = CB_0 = p$ (полупериметру треугольника ABC), так как эти отрезки являются расстояниями от вершины треугольника до точки касания внеписанной окружности с продолжением стороны. Кроме того, $BM_1 = CM_1$, поэтому M_1 – середина отрезка B_0C_0 . Учитывая, что $KD \parallel O_cB_0 \parallel O_bC_0$, получим требуемое утверждение.

Из 1) и 2) следует, что $\frac{r_a - r}{2} + \frac{r_b + r_c}{2} = 2R \Leftrightarrow r_a + r_b + r_c = r + 4R$. Это отдельный важный факт.

Теперь докажем формулу: $OM_1 + OM_2 + OM_3 = 3R - (W_1M_1 + W_2M_2 + W_3M_3) = 3R - \frac{r_a + r_b + r_c - 3r}{2} = 3R - \frac{r + 4R - 3r}{2} = R + r$.

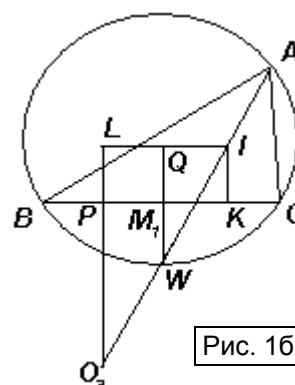


Рис. 1б

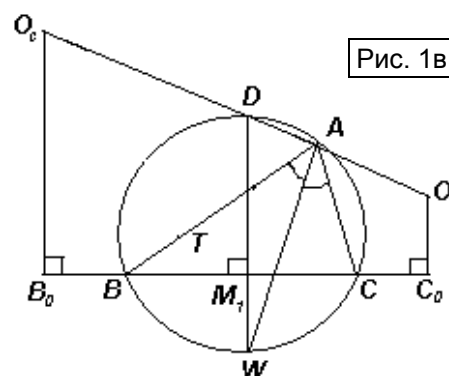


Рис. 1в

Упражнения и задачи для самостоятельного решения

Если это не оговорено отдельно, то треугольник, заданный в условии, – остроугольный, r и R – радиусы его вписанной и описанной окружностей соответственно, p – полупериметр, O – центр описанной окружности, H – ортоцентр.

1. Пусть AH_1 , BH_2 и CH_3 – высоты треугольника ABC . Найдите сумму диаметров окружностей, описанных около треугольников AH_2H_3 , BH_1H_3 и CH_1H_2 , если даны R и r .

2. Докажите, что в треугольнике ABC выполняются неравенства:

а) $\frac{AH + BH + CH}{3} \leq R$; б) $OH \geq \frac{R - 2r}{3}$.

3. а) Докажите, что $m_a + m_b + m_c \leq \frac{9}{2}R$, где m_a , m_b и m_c – длины медиан треугольника.

б) Пусть в треугольнике ABC биссектрисы углов A , B и C пересекают описанную окружность в точках W_1 , W_2 и W_3 соответственно. Докажите, что $AW_1 + BW_2 + CW_3 \leq 6,5R - r$.

4. Докажите, что для углов α , β и γ треугольника выполняется неравенство:

$$\frac{3r}{R} \leq \cos \alpha + \cos \beta + \cos \gamma \leq \frac{3}{2}.$$

5. В окружность радиуса R вписан треугольник, а в каждый сегмент, ограниченный стороной треугольника и меньшей из дуг окружности, вписана окружность наибольшего радиуса. Найдите сумму диаметров трех получившихся окружностей и радиуса окружности, вписанной в треугольник.

6. Пусть O – центр описанной окружности остроугольного треугольника ABC . Прямая, проходящая через O и параллельная BC , пересекает AB и AC в точках P и Q соответственно. Известно, что сумма расстояний от точки O до сторон AB и AC равна OA . Докажите, что сумма отрезков PB и QC равна PQ .

7. а) Докажите, что в треугольнике ABC выполняется равенство: $a(OM_2 + OM_3) + b(OM_1 + OM_3) + c(OM_1 + OM_2) = 2pR$.

б) (Неравенство Эрдеша) Пусть h_a – наибольшая высота треугольника ABC . Докажите, что $h_a \geq R + r$.

8. а) Запишите формулу Карно для случаев прямоугольного и тупоугольного треугольников и обоснуйте.

б) Четырехугольник $ABCD$ – вписанный, центр его описанной окружности лежит внутри четырехугольника. Пусть r_1 и r_2 – радиусы окружностей, вписанных в треугольники ABC и ADC , а r_3 и r_4 – радиусы окружностей, вписанных в треугольники ABD и CBD . Докажите, что $r_1 + r_2 = r_3 + r_4$.

9. а) Докажите, что если точка принадлежит отрезку, соединяющему основания двух биссектрис треугольника, то сумма расстояний от этой точки до двух сторон треугольника равна расстоянию от нее до третьей стороны.

б) Пусть центр O окружности, описанной около треугольника, лежит на отрезке, соединяющем основания двух биссектрис. Докажите, что расстояние от ортоцентра треугольника до одной из его вершин равно $R + r$.

10. Докажите, что в любом треугольнике $r = 4R \sin \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\beta}{2} \sin \frac{\gamma}{2}$.