

**Ключевые слова:**

наружный конус, погрешность измерения, точность измерения, угол конуса, отклонения формы, составляющие погрешности, анализ погрешностей

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАРУЖНЫХ КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Ирина ИВАНИНА, Наталия КРУШНЯК

Представлен анализ методов измерения геометрических параметров наружных конусов при дифференцированном контроле и способы оценки их точности. Определены структура погрешностей измерения и частные составляющие погрешности нормируемых параметров. В аналитическом виде получены уравнения погрешностей измерения, позволяющие проводить анализ результатов измерений, устанавливать соответствие предельной погрешности измерения параметра заданной норме точности, давать сравнительную оценку применяемых средств измерения, а также рекомендации по повышению точности измерений.

ВВЕДЕНИЕ

В металлообработке широко используются разнообразные конические соединения. Широко распространены инструментальные конусы – метрические конусы 1:20 и конусы Морзе, изготовленные по ГОСТ 25557-2016. Для установки и закрепления вспомогательного инструмента в шпинделях суппортных устройств станков с ЧПУ применяют конструкции конических соединений с конусностью 1:10 [2], служащие для закрепления как вращающегося осевого многолезвийного инструмента, так и неподвижного инструмента типа резцов. В современных станках с ЧПУ также применяют конусы с конусностью 7:24, позволяющей получить точное центрирование и легкое разделение сопряженных деталей. Для крепления инструмента в шпинделях высокоскоростных фрезерных автоматов разработана серия инструментальных конусов типа HSK [1].

В работах [4, 5, 6] отмечается, что для обеспечения точности положения установленного в шпиндель инструмента и жесткости его крепления важно выполнение требований по точности угла конуса и допуску отклонения от круглости его поперечных сечений. В работе [2] экспериментальным путем подтверждена взаимосвязь величины отклонений углов конусов конических хвостовиков

инструмента и эксплуатационных показателей качества его базирования и закрепления – величины радиального биения, меры его рассеяния, а также виброустойчивость технологической системы. Точность исполнительных размеров конусов, в частности инструментальных, напрямую связана с эксплуатационными показателями технологической системы.

Точность инструментальных конусов – предельные отклонения угла конуса и допуски формы поверхности конуса – нормируются ГОСТ 25307-82 «Система допусков и посадок для конических соединений» и ГОСТ 8908-81 «Допуски угловых размеров и углов конусов».

Требования к точности исполнительных размеров определяют правильность выбора средств измерения (контроля), который должен включать не только оценку предельной погрешности измерения, но и возможность анализа ее составляющих. Так, например, выполненная в работе [1] сравнительная оценка и анализ погрешностей координатных измерений (измерения проводились на контрольно-измерительной машине DEA GLOBAL 05-05-05 Hexagon Metrology) конических хвостовиков типа HSK и погрешностей измерений в специальном контрольном приспособлении фирмы

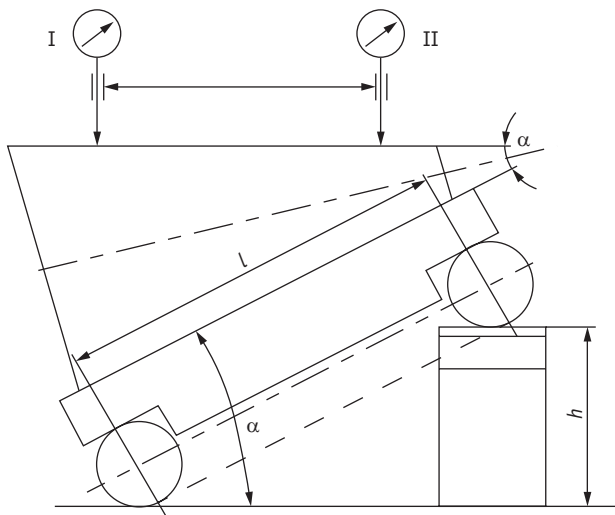


Рис. 1. Измерение угла с помощью контактной измерительной головки

Guhring в рассматриваемом случае показал целесообразность использования специализированных приборов.

Стандартом ГОСТ 2848-75 установлены средства контроля и их техническая характеристика для различной точности проверяемых конусов. Дифференцированный (поэлементный) контроль конусов включает измерения следующих параметров: угла конуса α ; диаметра большого основания D или малого основания d ; отклонения от прямолинейности образующей EFL ; отклонения от круглости EFC . Для перечисленных параметров определим предельные погрешности измерения и их структуру для отдельных методов контроля геометрических параметров конусов степеней точности АТ4-АТ8, в том числе обозначенных в ГОСТ 2848-75.

ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛА КОНУСА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИНУСНОЙ ЛИНЕЙКИ

Измерение углов с помощью синусной линейки является примером реализации косвенных тригонометрических методов измерения углов, при которых угол выражают как функцию сторон прямоугольного треугольника, измеряемых или воспроизводимых линейными мерами.

Измерение угла α заключается в определении отклонения от параллельности, что делают с помощью контактной измерительной головки, укрепленной на универсальной стойке (рис. 1).

Отклонение от параллельности, определяемое как алгебраическая разность отсчетов в положениях I и II измерительной головки, отнесенное к расстоянию l_i между точками контакта измерительного наконечника со свободной стороной угла кону-

са, равно отклонению угла $\Delta\alpha_{\text{изм}}$ измеряемого конуса от установленного угла α

$$\Delta\alpha_{\text{изм}} = \left(\frac{A_I - A_{II}}{l_i} \right) \cdot 2 \cdot 10^2 \text{ угл. с,}$$

где A_I и A_{II} – отсчеты измерительной головки в положениях I и II, мкм;

l_i – длина измерения угла конуса.

Результат измерения равен:

$$\alpha_{\text{изм}} = \alpha + \Delta\alpha_{\text{изм}}.$$

Погрешность результата измерения угла конуса включает следующие составляющие:

- инструментальную погрешность $\Delta_{\text{инстр}}$;
- методическую погрешность, в качестве которой будем рассматривать погрешность установки синусной линейки $\Delta_{\text{уст}}$;
- субъективную погрешность $\Delta_{\text{суб}}$.

Инструментальная погрешность определяется погрешностью применяемой измерительной головки. Так как результат измерения определяется как разность показаний измерительной головки, то

$$\Delta_{\text{инстр}} = \sqrt{2} \cdot \Delta_{\text{иг}}, \text{ мкм,} \quad (1)$$

где $\Delta_{\text{иг}}$ – предел допускаемой основной погрешности измерительной головки.

Погрешность установки синусной линейки определяется выражением

$$\Delta_{\text{уст}} = \text{tg } \alpha \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h} \right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2} \cdot l_i, \text{ мкм,}$$

где Δh – погрешность блока концевых мер, мкм; Δl – погрешность аттестации расстояния между центрами роликов синусной линейки, мкм; l_i – расстояние между точками измерения I и II, мм.

Субъективная погрешность определяется погрешностью отсчета:

- при снятии показаний до целых делений шкалы

$$\Delta_{\text{отсч}} = 0,5 \text{ с, мкм,} \quad (2)$$

где c – цена деления измерительной головки, мкм;

- при использовании интерполяции (отсчете десятых долей деления шкалы)

$$\Delta_{\text{отсч}} = 0,1 \text{ с, мкм.} \quad (3)$$

Так как результат измерения определяется как разность показаний измерительной головки, то субъективная погрешность равна:

$$\Delta_{\text{суб}} = \sqrt{2} \Delta_{\text{отсч}}. \quad (4)$$

Полная погрешность результата измерения угла конуса на длине измерения определяется по формуле:

$$\Delta_{\Sigma l} = \sqrt{\Delta_{\text{инстр}}^2 + \Delta_{\text{уст}}^2 + \Delta_{\text{суб}}^2}, \text{ мкм},$$

или выражается в угловых единицах:

$$\Delta_{\Sigma \alpha} = \frac{\Delta_{\Sigma l}}{l_{\text{и}}} \cdot 2 \cdot 10^2, \text{ угл. с.}$$

ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРОВ КОНУСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АТТЕСТОВАННЫХ РОЛИКОВ

Косвенное измерение диаметров D и d наружных конусов может производиться с помощью двух аттестованных роликов по схемам, приведенным на рис. 2.

Конус большим (рис. 2а) или малым (рис. 2б) торцом устанавливаются на точной плите, прикладываются два аттестованных ролика одинакового диаметра и измеряют размеры M или m . Диаметры конуса рассчитывают по формулам:

$$D = M - d_p \frac{1 - \sin \frac{\alpha}{2} + \cos \frac{\alpha}{2}}{\cos \frac{\alpha}{2}}; \quad (5)$$

$$d = m - d_p \frac{1 + \sin \frac{\alpha}{2} + \cos \frac{\alpha}{2}}{\cos \frac{\alpha}{2}}; \quad (6)$$

где d_p – диаметр аттестованного ролика; α – угол конуса.

Погрешность результата измерения диаметров D и d зависит от погрешностей измерения ΔM и Δm размеров M и m соответственно, от погрешности аттестации роликов Δd_p и от погрешности $\Delta \alpha$ определения угла α .

Дифференцируя выражение (5) по M , d_p и α , получим частные составляющие погрешности измерения диаметра D :

→ из-за погрешности измерения размера M

$$\Delta D_M = \Delta M;$$

→ из-за погрешности аттестации диаметра ролика Δd_p

$$\Delta D_{d_p} = - \frac{1 - \sin \frac{\alpha}{2} + \cos \frac{\alpha}{2}}{\cos \frac{\alpha}{2}} \Delta d_p; \quad (7)$$

→ из-за погрешности $\Delta \alpha$ определения угла α

$$\Delta D_{\alpha} = d_p \frac{1 - \sin \frac{\alpha}{2}}{2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}} \Delta \alpha, \quad (8)$$

где $\Delta \alpha$ – предельное отклонение угла конуса, выраженное в радианах, если в формулы (5) и (6) подставляется номинальное значение угла конуса α . Для уменьшения составляющей погрешности ΔD_{α} в формулу (4) можно подставлять измеренное значение угла $\alpha_{\text{изм}}$ и тогда вместо предельного откло-

нения угла конуса $\Delta \alpha$ в формулах (7) и (8) следует использовать погрешность измерения $\Delta_{\Sigma \alpha}$ угла конуса α , выраженную в радианах.

Дифференцируя выражение (6) по m , d_p и α , получим частные составляющие погрешности измерения диаметра d :

→ из-за погрешности измерения размера m

$$\Delta d_m = \Delta m;$$

→ из-за погрешности аттестации диаметра ролика Δd_p

$$\Delta d_{d_p} = - \frac{1 + \sin \frac{\alpha}{2} + \cos \frac{\alpha}{2}}{\cos \frac{\alpha}{2}} \Delta d_p;$$

→ из-за погрешности $\Delta \alpha$ определения угла α

$$\Delta d_{\alpha} = - d_p \frac{1 + \sin \frac{\alpha}{2}}{2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}} \Delta \alpha.$$

Погрешность измерения размеров M и m зависит от средств измерения, используемых для их определения. Например, если измерение размеров M и m производится с помощью микрометра гладкого, то погрешность измерения ΔM (Δm) будет включать следующие составляющие:

→ основную погрешность микрометра $\Delta_{\text{си}}$, определяемую по паспорту микрометра;

→ субъективную погрешность, в качестве которой используется погрешность отсчета $\Delta_{\text{отсч}}$, определяемая по формуле (2) или (3);

→ температурную погрешность ΔM_t (Δm_t), возникающую из-за отклонения Δt_1 температуры от нормальной и колебания Δt_2 температуры за время измерений:

$$\Delta M_t (\Delta m_t) = M(m) \cdot \theta_t \cdot 11,6 \cdot 10^{-3}, \text{ мкм},$$

где θ_t – температурный режим определяется по формуле:

$$\theta_t = \sqrt{\left[\frac{\Delta t_1 (\alpha_{\text{си}} - \alpha_{\text{д}})_{\text{max}}}{1,6 \cdot 10^{-6}} \right]^2 + \left[\frac{\Delta t_2 \alpha_{\text{max}}}{1,6 \cdot 10^{-6}} \right]^2},$$

где $(\alpha_{\text{си}} - \alpha_{\text{д}})_{\text{max}}$ – наибольшая разность коэффициентов линейного расширения средства измерений $\alpha_{\text{си}}$ и объекта измерений $\alpha_{\text{д}}$; α_{max} – наибольший коэффициент линейного расширения средства измерений или объекта измерений.

Так как состав стали, из которой сделан корпус микрометра и конус, неизвестна, то в качестве значений коэффициентов линейного расширения средства измерения и объекта измерения можно принять полный диапазон коэффициентов линейного расширения стали $(9,4 \dots 14,5) \cdot 10^{-6}, 1/^\circ\text{C}$. Тогда $(\alpha_{\text{си}} - \alpha_{\text{д}})_{\text{max}} = (14,5 - 9,4) \cdot 10^{-6} = 5,1 \cdot 10^{-6}, 1/^\circ\text{C}$ и $\alpha_{\text{max}} = 14,5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

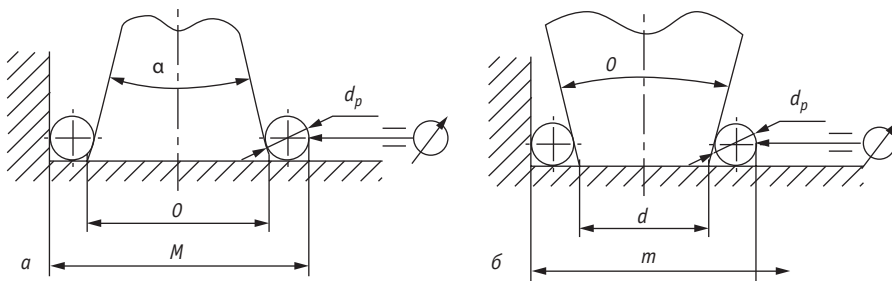


Рис. 2. Схема измерения диаметров наружных конусов: а – конус с большим торцом, б – конус с малым торцом

Погрешности измерения ΔM и Δm размеров M и m определяются выражениями:

$$\Delta M = \sqrt{\Delta_{\text{си}}^2 + \Delta_{\text{отсч}}^2 + \Delta M_t^2};$$

$$\Delta m = \sqrt{\Delta_{\text{си}}^2 + \Delta_{\text{отсч}}^2 + \Delta m_t^2}.$$

Полная погрешность измерения диаметров конуса D и d определяется по формулам:

$$\Delta D_{\Sigma} = \sqrt{(\Delta M)^2 + (\Delta D_{d_p})^2 + (\Delta D_{\alpha})^2};$$

$$\Delta d_{\Sigma} = \sqrt{(\Delta m)^2 + (\Delta d_{d_p})^2 + (\Delta d_{\alpha})^2},$$

где составляющие уравнений определены выше.

ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ ОБРАЗУЮЩЕЙ КОНУСА

При измерении отклонения от прямолинейности EFL образующей наружного конуса с помо-

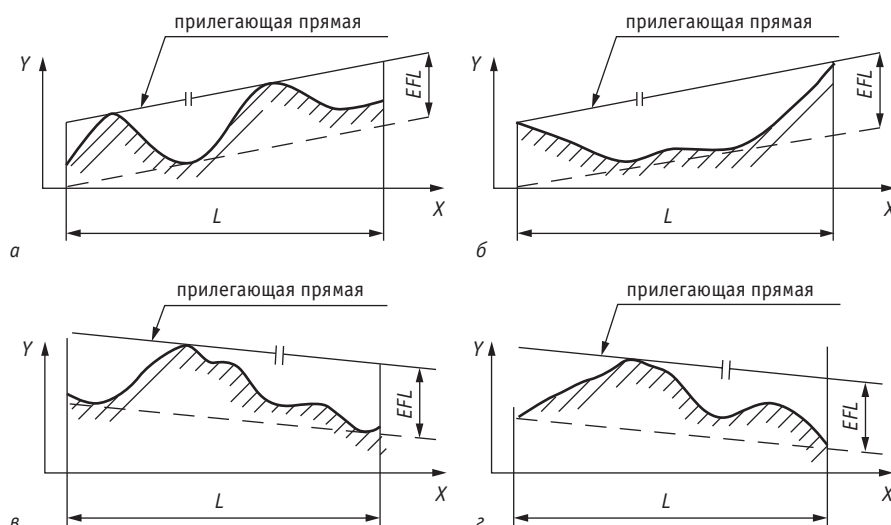


Рис. 3. Оценка отклонения от прямолинейности по профилограмме измеренного профиля

щью синусной линейки конус располагают так, чтобы вершина наконечника измерительного устройства при перемещении проходила через образующую конуса. Стол с измеряемым конусом перемещают относительно измерительного наконечника и отмечают показания отсчетного устройства в нескольких точках.

Оценка отклонения от прямолинейности образующей по результатам измерения осуществляется одним из следующих способов:

1. По профилограмме измеренного профиля. В этом случае по результатам измерений строят профилограмму и на ней проводят прилегающую прямую, которая касается профилограммы либо в двух наивысших точках (вогнутая форма профиля – рис. 3 а), либо в одной наивысшей точке, проходя параллельно касательной к профилограмме, проведенной через две низшие точки (выпуклая форма профиля – рис. 3 в). В особых случаях эти точки могут быть концевыми точками нормируемого участка (рис. 3 б, г). Отклонение от прямолинейности определяется как наибольшее в направлении оси ординат отклонение от прилегающей прямой до низшей точки профилограммы;
2. Непосредственно по показаниям отсчетного устройства (при условии равенства показаний на концах измеряемого участка); в этом случае за отклонение от прямолинейности принимается алгебраическая разность между наибольшим

A_{max} и наименьшим A_{min} показаниями $EFL = A_{\text{max}} - A_{\text{min}}$.

Это соответствует оценке отклонения относительно упрощенной базы – прямой, соединяющей крайние точки профиля.

При оценке отклонения от прямолинейности по профилограмме погрешность измерения включает погрешность измерительной головки $\Delta_{\text{ит}}$, погрешность отсчета $\Delta_{\text{отсч}}$, определяемую по формуле (2) или (3), и погрешность графического изображения измеренного профиля и графической оценки отклонений от прямолинейности $\Delta_{\text{граф}}$:

$$\Delta_{\Sigma}(EFL) = \sqrt{\Delta_{иг}^2 + \Delta_{отсч}^2 + \Delta_{граф}^2}$$

При вычислении случайной погрешности $\Delta_{граф}$ можно использовать ориентировочные значения среднего квадратического отклонения $s_{граф}$, определяемые по формуле:

$$s_{граф} = 0,05 EFL.$$

При доверительной вероятности $P = 0,9973$:

$$\Delta_{граф} = 3 s_{граф} = 0,15 EFL.$$

При оценке отклонения от прямолинейности по показаниям измерительной головки погрешность измерения включает инструментальную погрешность $\Delta_{инстр}$, определяемую по формуле (1), и субъективную погрешность $\Delta_{суб}$, определяемую по формуле (4). Поэтому:

$$\Delta_{\Sigma}(EFL) = \sqrt{\Delta_{инстр}^2 + \Delta_{суб}^2}$$

ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ КРУГЛОСТИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ КОНУСА

Для измерения отклонения от круглости EFK широко используются кругломеры. Оценка EFK производится как максимальное расстояние между прилегающей окружностью и круглограммой.

К основным составляющим погрешности измерения следует отнести:

- радиальную погрешность шпинделя кругломера $\Delta_{рад}$;
- погрешность коэффициента увеличения $\Delta_{ув}$ измерительного прибора;
- погрешность центрирования (влияние данной погрешности может не учитываться, если эксцентриситет круглограммы не превышает определенных пределов);
- осевая погрешность шпинделя $\Delta_{ос}$;
- случайные погрешности графической обработки результатов измерения $\Delta_{граф}$.

Погрешности $\Delta_{рад}$, $\Delta_{ос}$ и $\Delta_{пер}$ определяются по паспорту кругломера. При вычислении случайной погрешности $\Delta_{граф}$ можно использовать ориентировочные значения среднего квадратического отклонения $s_{граф}$, определяемые по формуле:

$$s_{граф} = 0,05 EFK.$$

При доверительной вероятности $P = 0,9973$:

$$\Delta_{граф} = 3 s_{граф} = 0,15 EFK.$$

Полная погрешность результата измерения отклонения от круглости определяется по формуле:

$$\Delta_{\Sigma}(EFL) = \sqrt{\Delta_{рад}^2 + \Delta_{ос}^2 + \Delta_{ув}^2 + \Delta_{граф}^2}, \text{ МКМ.}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в **аналитическом виде** уравнения погрешностей измерения внутренних конических поверхностей позволяют:

- проводить анализ результатов измерения, а также установить соответствие предельной погрешности измерения параметра заданной норме точности измерений,
- определить при несоответствии предельной погрешности измерений норме точности приоритетность технических мероприятий и дать рекомендации по повышению точности измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бушуев С.В., Маслов А.Р.** Оценка погрешности определения геометрических параметров инструментальных конусов // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2016. № 3. С. 62–65.
2. **Маслов А.Р., Смолкин Е.М., Аксененко А.Ю.** Обоснование требований к точным зажимным устройствам токарных прутковых автоматов с ЧПУ // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2016. № 4 (39). С. 71–74.
3. **Маслов А.Р.** Контроль качества изготовления хвостовиков инструмента // Инструмент. Технология. Оборудование. 2005. № 5. С. 20–22.
4. **Zavgorodnii V.I., Kozochkin M.P., Maslov A.R., Sabirov F.S.** Influence of the Dynamic Characteristics of the Tool and the Blank on the Vibroacoustic Monitoring of Cutting // Russian Engineering Research. 2010. № 9 (30). P. 939–943.
5. **Фадюшин И.Л., Маслов А.Р.** Влияние точности конусов на качество крепления концевых инструментов // Станки и инструмент. 1972. № 5. С. 40.
6. **Григорьев С.Н., Маслов А.Р., Кохомский М.В.** Инструментальная оснастка станков с ЧПУ: справочник / Под ред. А.Р. Маслова. — М.: Машиностроение, 2006. 544 с.

ИВАНИНА Ирина Владимировна –
кандидат технических наук, доцент МГТУ
им. Н.Э. Баумана

КРУШНЯК Наталия Тимофеевна –
кандидат технических наук, доцент МГТУ
им. Н.Э. Баумана

НА НОВОЙ ВЫСОТЕ



ДЕЛОВАЯ ПРОГРАММА

более 60 конференций, круглых столов, семинаров и мастер-классов. Деловая программа «Future Hub» — инновационные научно-технические разработки молодых ученых

ПРЕМЬЕРЫ МАКС-2019

отечественный лайнер МС 21-300 и гражданские вертолеты Ка-62 и Ми-38 в полете и на земле. Новинки от Embraer и Pilatus.

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ПАВИЛЬОН

полноразмерный макет российско-китайского широкофюзеляжного дальнемагистрального самолета CR-929

МАСШТАБНАЯ ЭКСПОЗИЦИЯ БВС

беспилотники, авионика, двигатели и целевая нагрузка. Демонстрационные полёты БВС и встречи в рамках деловой программы.

БОЛЕЕ 1000 ДЕЛОВЫХ ВСТРЕЧ MATCHMAKING

поиск деловых партнёров для участников авиасалона: перечень компаний, готовых к встрече, контактные лица, расписание назначенных переговоров.

Подробности на www.aviasalon.com

МАКС 2019

Организаторы

Устроитель

КИТАЙ —
страна-партнёр



ЖУКОВСКИЙ • 27 АВГУСТА - 1 СЕНТЯБРЯ

Стратегический банк-партнёр



Стратегический партнёр



Генеральный финансовый партнёр



Официальный партнёр



Официальный страховщик



Международный
информационный партнёр



Генеральные информационные партнёры

