

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ИЗ ПОЛИМЕРНО-КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. М. МЕДУНЕЦКИЙ, Е. В. ШАЛОБАЕВ, В. А. ЗИНКОВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: zinkov21@yandex.ru*

Предложена методика расчета и проектирования малогабаритных цилиндрических кинематических зубчатых передач преимущественно из конструкционных полимерно-композиционных материалов. Методика состоит из четырех последовательных этапов, в которых представлены формулы расчета основных геометрических параметров зубчатых передач. Определены особенности применения композиционных материалов для зубчатых колес. Приведены рекомендации по оптимизации параметров зубчатой передачи на примере использования конусно-клиновых зубчатых венцов.

**Ключевые слова:** *малогабаритные цилиндрические зубчатые передачи, расчет зубчатой передачи, полимерно-композиционные материалы, конусно-клиновой зубчатый венец*

Малогабаритные зубчатые передачи используются в современных автоматических, вычислительных, измерительных приборах [1]. Для изготовления зубчатых колес в приборостроении широко применяются полимерно-композиционные материалы [2—4].

Отличительной особенностью современного приборостроения является большая доля мелкосерийного производства. В некоторых типах приборов имеются механические блоки (модули), в том числе и из зубчатых передач, поэтому для их изготовления целесообразно использовать конструкционные полимерные композиционные материалы. Для получения зубчатых колес из таких материалов следует применять технологию, которая заключается в возможности получения небольших партий изделий методом отлива в изготовленные предварительно формы из силикона. В результате требуемые детали имеют необходимые характеристики и параметры. Процесс изготовления форм и производства отливок достаточно быстрый, а себестоимость, по сравнению с литьем в формы из металла, не высока.

В настоящее время широкое распространение получило производство полимерных зубчатых колес с помощью 3D-печати [5—8]. Изделия, построенные по цифровым аналогам, не уступают по качеству традиционным деталям [9, 10]. Преимущество зубчатых звеньев из композитных полимеров, по сравнению с металлическими, — высокая эффективность (КПД) благодаря меньшим потерям на трение [11—16]. Полимерно-композитные зубчатые колеса легче, менее шумные, сохраняют смазывающую способность и являются коррозионно-стойкими.

Полимерно-композитные зубчатые передачи используются во многих устройствах для передачи крутящего момента, а также в медицинских изделиях для точного позиционирования. Как правило, это простейшие одноступенчатые малогабаритные зубчатые передачи.

Практика показывает, что изделия из пластических масс имеют достаточно много преимуществ [4, 17].

Основу конструирования и расчета полимерно-композиционных передач составляют методы, которые используются для зубчатых передач, выполненных из металлов. Эти методы лишь корректируются с учетом специфики полимерных материалов [4, 18]. Однако такие методы сложны в практическом применении, поэтому необходима методика, которая учитывает современные тенденции и особенности использования полимерных зубчатых передач и относительно проста при реализации. Иначе говоря, востребована инженерная методика.

Предлагаемая в настоящей статье методика содержит четыре последовательных этапа.

*Этап 1. Подготовка и анализ исходных данных.* В приборостроении зубчатые передачи являются кинематическими с малыми значениями модулей, тем самым обеспечивается увеличение плавности хода и уменьшение габаритных размеров передач [3, 9]. Для кинематических (несиловых) передач модуль определяют, руководствуясь соображениями необходимого передаточного отношения  $i$  при определенном межцентровом расстоянии [2, 3].

Прежде чем приступать к проектированию, конструктор определяет передаточное отношение механизма и в соответствии с межосевым расстоянием  $a_w = a_{w1} \dots a_{wn}$ , мм, примерные габаритные размеры зубчатой передачи, поскольку, как правило, они ограничены размерами корпуса прибора. Затем после проектировочного расчета необходимо произвести проверочные расчеты получившихся зубчатых колес с учетом крутящего момента  $M_{кр}$ , Н·м.

*Этап 2. Определение и расчет основных геометрических параметров цилиндрической зубчатой передачи.* Из опыта конструирования зубчатых механизмов известно, что диапазон выбора количества зубьев имеет ограничение в виде предельного минимального значения числа зубьев шестерни  $z_1 \geq 17$ .

Формула расчета модуля  $m$ , мм, для заданных исходных данных при диаметре делительной окружности  $d_1 = z_1 \cdot m = \frac{2a_w}{1+i}$  имеет вид

$$m = \frac{2a_w}{z_1 \cdot (1+i)}.$$

Значения модулей регламентируются ГОСТ 9563–60. Путем изменения числа зубьев шестерни  $z_1$  (17, 18...) и межосевого расстояния  $a_w$  определяется модуль  $m$  стандартного ряда, так как передаточное отношение  $i$  известно. При этом следует учитывать, что чем больше зубьев у шестерни, тем плавнее ход зубчатой передачи, но при этом будет ослаблена выносливость зубьев при изгибе.

Далее рассчитываются геометрические параметры зубчатой передачи:

- число зубьев колеса:  $z_2 = i_{21} \cdot z_1$ ;
- диаметры делительных окружностей, мм:  $d_1 = m \cdot z_1$ ;  $d_2 = m \cdot z_2$ ;
- диаметры вершин зубьев, мм:  $d_{a1} = d_1 + 2m$ ;  $d_{a2} = d_2 + 2m$ ;
- диаметры впадин зубьев, мм:  $d_{f1} = d_1 - 2,5m$ ;  $d_{f2} = d_2 - 2,5m$  [19].

Первоначальная (исходная) ширина зубчатых венцов (в миллиметрах) задается как

$$B_B = \frac{1}{2} \left( m \sqrt{d_a + 2} \right) - h,$$

где  $h = 2,25m$  — высота зуба, мм [20].

*Этап 3. Выбор композиционного материала. Рекомендуемые расчеты.* На этом этапе выбирается и оценивается конструкционный полимерный материал по критерию изгибной прочности зубьев колес. Следует учесть, что для увеличения прочности зубьев можно варьировать ширину зубчатого венца колес с учетом конкретного композиционного полимерного материала.

Прежде всего, необходимо оценить уровень показателей механических свойств материала при кратковременном и длительном нагружении. Затем определяются значения напряжений, действующих на элементы конструкции, внешние силы и требуемая износостойкость. В результате необходимо обеспечить соответствие значений расчетных и допускаемых напряжений [2].

Выбор материала осуществляется с учетом крутящего момента и ширины зубчатого венца и проверяется по следующим формулам (критерии выбора).

Расчет напряжения изгиба, действующего на зубья неметаллического зубчатого колеса, производится по формуле

$$\sigma = \frac{2M_{кр}K}{B_b d m y \vartheta_u} \leq [\sigma],$$

где  $K$  — коэффициент нагрузки,  $y$  — коэффициент формы зуба,  $\vartheta_u$  — коэффициент отношения нагрузок; значения коэффициентов приведены в работе [21].

Напряжение в поверхностном слое зуба (контактная выносливость)

$$\sigma_H = \frac{310}{a_w} \sqrt{\frac{M_{кр} K_H (i+1)^3}{B_b i^2}} \leq \sigma_{Hр},$$

где  $\sigma_{Hр}$  — допускаемое контактное напряжение; коэффициент  $K_H = K_{H\alpha} K_{H\beta} K_{H\nu}$ , где  $K_{H\alpha}$ ,  $K_{H\beta}$  — коэффициенты, учитывающие неравномерность распределения нагрузки между зубьями и по ширине венца соответственно,  $K_{H\nu}$  — динамический коэффициент, зависящий от окружной скорости колес; значения коэффициентов приведены в работе [1].

Как видно из приведенных формул, варьируя ширину зубчатого венца при фиксированном модуле зацепления, можно изменять напряжения изгиба, что позволяет выбрать приемлемый конструкционный материал.

В качестве материала для зубчатых колес в работах [3, 22] рекомендуется использовать конструкционные полиамиды, полиуретаны, поликарбонаты.

В целях рационального выбора полимерно-композиционных материалов для изготовления зубчатых колес необходимо определить основные требования, предъявляемые к ним. Выбранные материалы должны обеспечивать высокую механическую прочность (усталостную и статическую), износостойкость, низкий и стабильный коэффициент трения, долговечность сопряжения, а также должны обладать низкой теплопроводностью и теплостойкостью, надежностью и химической стойкостью; кроме того свойства материала влияют на технологическую точность размеров деталей. Допускаемая температура, при которой эксплуатируются полимерно-композиционные материалы, не должна превышать 80 °С.

Среди свойств современных полимерных материалов особый интерес, согласно работе [6], представляют релаксация и старение. Кроме того, в этой же работе авторы рекомендуют для оптимизации зубчатой передачи учитывать следующее. Работоспособность полимерных композиционных зубчатых передач зачастую существенно зависит от дополнительного бокового зазора, который позволяет компенсировать высокое термическое расширение материала; погрешности при производстве передач и прогиб колес при работе также влияют на качество зубчатого зацепления. Кроме того, такие показатели, как влаго- и водопоглощение и коэффициент линейного термического расширения могут весьма существенно влиять на возможность применения полимерных материалов.

В работе [18] показано, что длительность нагружения отдельного зуба определяется частотой вращения. Следует учитывать, что большие окружные скорости способствуют значительному нагреву в зоне зубчатого зацепления. При невысоких нагрузках и больших окружных скоростях может возникать повышенный уровень шума и вибрации. В этом случае необходимо применять материалы с высокой демпфирующей способностью. Материалы

с высокой ударной вязкостью следует использовать в зубчатых передачах, характеризующихся ударными нагрузками.

Зубчатые колеса из полиамидов рекомендуется эксплуатировать в закрытых передачах при незначительном колебании влажности. Полиформальдегид применяют для работы в условиях ударных и высоких циклических нагрузок, во влажных и химически активных средах. Зубчатые колеса из поликарбоната могут выдерживать значительные контактные удары, перегрузки и длительную статическую нагрузку в условиях повышенной влажности. Фторопласты используют для работы в агрессивных средах [18].

К зубчатым передачам, работающим с реверсированием вращения, дополнительно предъявляется требование по уменьшению мертвого хода. Уменьшение времени реверсирования связано с минимизацией моментов инерции зубчатых колес, т.е. облегчением их конструкции [23].

*Этап 4. Назначение параметров звеньев зубчатой передачи.* Для повышения качественно-количественных характеристик зубчатой передачи необходимо задать параметры ее звеньев.

Рассмотрим предлагаемый авторами вариант повышения кинематической точности редуктора — использование зубчатых колес с так называемыми конусно-клиновыми венцами. Фрагмент конусно-клинового зубчатого венца представлен на рис. 1 (здесь  $a_1$ ,  $a_n$  и  $b_{\Gamma}$ ,  $b_{fn}$  — ширина зуба на окружности вершин зубьев и впадин зубьев соответственно), а схема конусно-клинового зубчатого зацепления приведена на рис. 2.

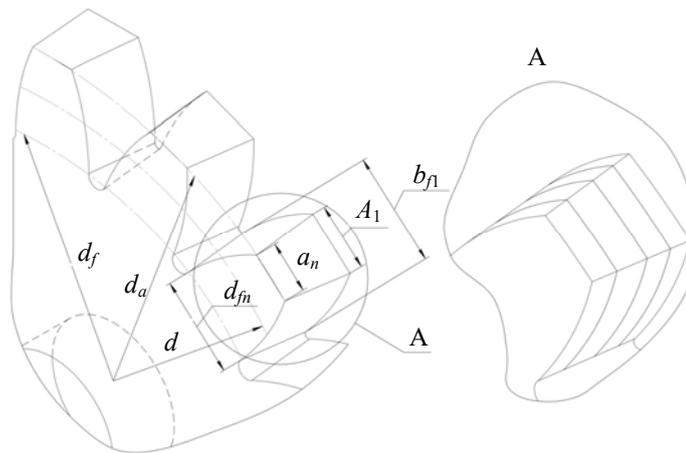


Рис. 1

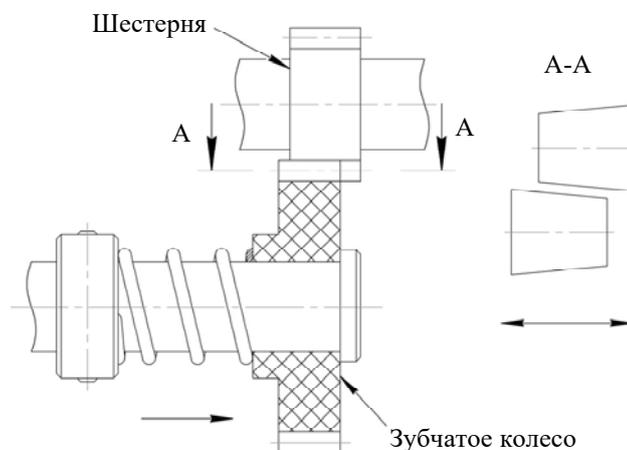


Рис. 2

Особенностью конусно-клиновых зубчатых венцов является плавное изменение ширины зуба по линейному закону для каждого осевого сечения зубчатого колеса [24, 25]. Это позволяет в предельном варианте обеспечить „безззорное“ зацепление пары зубчатых колес.

Последовательно перечисленные этапы предложенной методики расчета и проектирования цилиндрической кинематической (несиловой) зубчатой передачи представлены на рис. 3. В исходном и кратком вариантах методика приведена в работе [26].

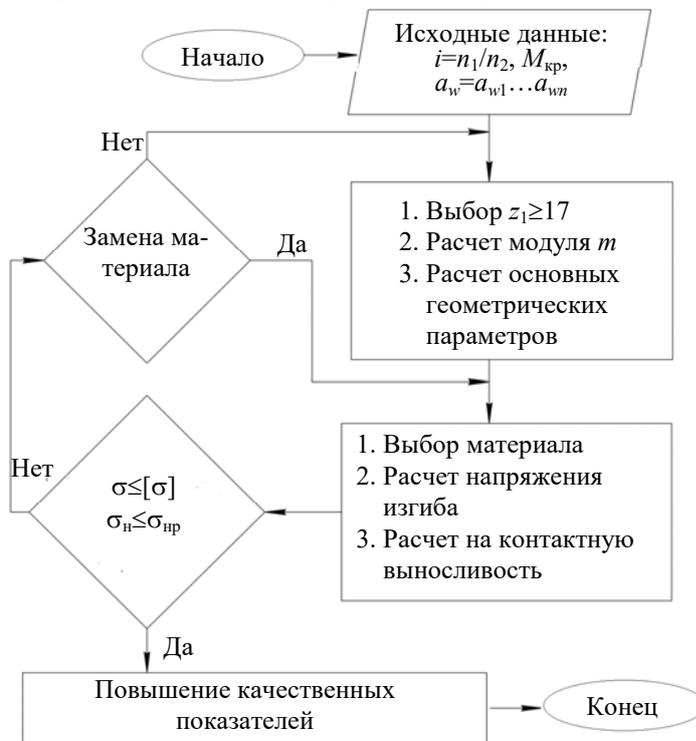


Рис. 3

В предложенной методике реализован принцип „от простого к сложному“, она не требует от проектировщика высокой квалификации в этой области и, как показал опыт, весьма доступна для использования в современной инженерной практике.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Элементы привода приборов: расчет, конструирование, технологии / В. Е. Старжинский, Е. В. Шалобаев, С. В. Шилько и др.; Под ред. Ю. М. Плескачевского. Минск: Беларус. навука, 2012. 769 с.
2. Пластмассовые зубчатые колеса в передачах точного приборостроения / В. Е. Старжинский, О. В. Гаврилова, В. Краузе и др.; Минск: Навука і тэхніка, 1993. 358 с.
3. Пластмассовые зубчатые колеса в механизмах приборов / В. Е. Старжинский, Б. П. Тимофеев, Е. В. Шалобаев, А. Т. Кудинов. СПб—Гомель: ИММС НАН Б, 1998. 538 с.
4. Старжинский В. Е., Шалобаев Е. В., Кудинов А. Т. Зубчатые колеса из пластмасс. Особенности выбора геометрических параметров // Справочник. Инженерный журн. 2001. № 9. С. 11—13.
5. Исследования свойств пластмасс, используемых в аддитивных технологиях, в зависимости от программ-слайсеров / Е. В. Шалобаев, С. Л. Гавриленко, Ф. А. Перепелица, Н. С. Красноруцкая, Г. А. Демидов // Тез. докл. Междунар. конф. „Полимерные композиты и трибология“ (Поликомтриб-2017), Гомель, 27—30 июня 2017. Минск: ОИМ НАН Б, 2017. С. 205—206.
6. Старжинский В. Е., Шилько С. В., Шалобаев Е. В. Технология производства зубчатых колес из термопластичных полимерных материалов (Обзор) // Полимерные материалы и технологии. 2018. Т. 4, № 2. С. 6—31.

7. Довыденко Е. М., Иванова Н. А., Чижик С. А., Агабеков В. Е. Определение параметров 3D-печати отечественными прутками из композиционных полимерных материалов на основе АБС пластиков // Полимерные материалы и технологии. 2018. № 2. С. 85—90.
8. Применение полимерных связующих при изготовлении керамических изделий методами аддитивных технологий / Г. А. Демидов, А. Н. Карандашев, Е. В. Шалобаев, Ф. А. Перепелица, С. В. Шилько, В. Е. Старжинский // Полимерные материалы и технологии. 2019. Т. 5, № 3. С. 85—90.
9. Технология 3D печати в промышленности [Электронный ресурс]: <<https://www.tehnohacker.ru/tehnologii/tehnologiya-3d-pechati-v-promyshlennosti/>>, 5.12.2019.
10. Полякова Д. А., Сокуренок Ю. А. Анализ зарубежных и отечественных исследований проблемы адаптации 3D-моделей для 3D-печати // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. СПб: НИУ ИТМО, 2018. Т. 7. С. 249—252.
11. Bartosch G. Polymers outperform metals in precision gearing: // Intech Power Core, 2015 [Электронный ресурс]: <<https://www.designworldonline.com/polymers-outperform-metals-in-precision-gearing/>>, 5.12.2019.
12. Шалобаев Е. В., Медунецкий В. М., Монахов Ю. С. Комплексный подход к профильной модификации зубчатых колес для повышения их качественных показателей // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2004. № 11. С. 31—34.
13. Шалобаев Е. В., Медунецкий В. М., Монахов Ю. С. Геометрическая оптимизация трибопары в зацеплении зубчатых колес // Теория и практика зубчатых передач: Сб. докл. конф. с международным участием; Под ред. В. И. Гольдфарба. Ижевск: ИжГТУ, 2004. С. 139—144.
14. Обеспечение качественных показателей зубчатых колес, венцы которых выполнены из пластмасс и композитов / Е. В. Шалобаев, В. М. Медунецкий, Р. Р. Магдиев, В. Е. Старжинский, С. В. Шилько // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2012. № 12—1. С. 142—149.
15. Условия эксплуатации, критерии качества и методы повышения качественных показателей мелко модульных зубчатых передач / В. М. Медунецкий, Е. В. Шалобаев, С. С. Резников, В. Е. Старжинский // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2012. № 12—1. С. 107—116.
16. Упрочнение функциональных поверхностей для повышения надежности и работоспособности малогабаритных зубчатых передач / В. М. Медунецкий, Е. В. Шалобаев, Р. Р. Магдиев, К. Н. Заикин, Д. Г. Суриков // Современное машиностроение. Наука и образование. 2014. № 4. С. 400—407.
17. Typical Plastic Gear Applications [Электронный ресурс]: <<http://www.intechpower.com/products/gears/typical-gear-applications>>, 5.12.2019.
18. Альшиц И. Я., Благов Б. Н. Проектирование деталей из пластмасс. Справочник. М.: Машиностроение, 1977. 215 с.
19. Мосягин Р. В., Павлов Б. И. Детали и узлы малогабаритных редукторов. Л.: Машиностроение, 1967. 146 с.
20. Павлов Я. М. Детали машин. Л.: Машиностроение, 1969. 448 с.
21. Ермаков В. А. Зубчатые колеса из неметаллических материалов. М.: Машиностроение, 1966. 67 с.
22. Скороходов Е. А. Справочник технолога-приборостроителя. М.: Машиностроение, 1980. Т. 2. 463 с.
23. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач: Учеб. пособие / В. Е. Антонюк, В. Е. Старжинский, Е. В. Шалобаев и др.; Под ред. В. Е. Старжинского и М. М. Кане. СПб: Профессия, 2007. 832 с.
24. Медунецкий В. М., Зинков В. А. Повышение точности электромеханического прибора-датчика для измерения угла поворота судового оборудования // Морской вестник. 2019. № 1 (69). С. 112—114.
25. Медунецкий В. М. Формообразование модифицированных зубчатых венцов комбинированных цилиндрических передач: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб, 2003.
26. Медунецкий В. М., Шалобаев Е. В., Зинков В. А., Данг Н. Методика проектирования и расчета малогабаритных зубчатых передач из композиционных материалов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 2. С. 192—194.

**Сведения об авторах**

**Виктор Михайлович Медунецкий** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО;  
E-mail: vm57med@yandex.ru

- Евгений Васильевич Шалобаев** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО;  
E-mail: shalobaev47@mail.ru
- Владимир Александрович Зинков** — аспирант; Университет ИТМО;  
E-mail: zinkov21@yandex.ru

Поступила в редакцию  
06.02.2020 г.

**Ссылка для цитирования:** Медунецкий В. М., Шалобаев Е. В., Зинков В. А. Методика расчета и проектирования малогабаритных цилиндрических зубчатых передач из полимерно-композиционных материалов // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 5. С. 436—443.

### METHOD OF CALCULATION AND DESIGN OF SMALL-SIZED CYLINDRICAL KINEMATIC GEARS MADE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

V. M. Medunetskiy, E. V. Shalobaev, V. A. Zinkov

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia  
E-mail: zinkov21@yandex.ru

A methodology for calculating and designing small-sized cylindrical kinematic gears made of mainly structural polymer-composite materials is proposed. The technique consists of four main successive stages, in which the basic calculation formulas are presented. The features of the use of composite materials for gears are determined. Recommendations are given on improving the gear transmission parameters based on the experience of cone-wedge ring gears employment.

**Keywords:** small-sized cylindrical gears, gear calculation, polymer-composite materials, cone-wedge ring gear

#### REFERENCES

1. Starzhinsky V.E., Shalobayev E.V., Shil'ko S.V. *Elementy privoda priborov: raschet, konstruirovaniye, tekhnologii* (The Drive Elements of the Instrument: the Calculation, Designing, Technology), Pleskachevskiy Yu.M., ed., Minsk, 2012, 769 p. (in Russ.)
2. Starzhinskiy V.E., Gavrilova O.V., Krauze V. et al. *Plastmassovyye zubchatyye kolea v peredachakh tochnogo priborostroyeniya* (Plastic Gears in Precision Gear Transmissions), Minsk, 1993, 358 p. (in Russ.)
3. Starzhinskiy V.E., Timofeyev B.P., Shalobayev E.V., Kudinov A.T. *Plastmassovyye zubchatyye kolea v mekhanizmaxh priborov. Raschet i konstruirovaniye* (Plastic Cogwheels in Mechanisms of Devices. Calculation and Designing), St. Petersburg, Gomel', 1998, 538 p. (in Russ.)
4. Starzhinskiy V.E., Shalobayev E.V., Kudinov A.T. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal*, 2001, no. 9, pp. 11–13. (in Russ.)
5. Shalobayev E.V., Gavrilenko S.L., Perepelitsa F.A., Krasnorutskaya N.S., Demidov G.A. *Polimernyye kompozity i tribologiya. Polikomtrib-2017* (Polymer Composites and Tribology. Polycomtrib-2017), Abstracts of reports of the International Conference, Gomel', June 27–30, 2017, Minsk, 2017, pp. 205–206. (in Russ.)
6. Starzhinskiy V.E., Shil'ko S.V., Shalobayev E.V. *Polimernyye materialy i tekhnologii*, 2018, no. 2(4), pp. 6–31. (in Russ.)
7. Dovydenko E.M., Ivanova N.A., Chizhik S.A., Agabekov V.E. *Polimernyye materialy i tekhnologii*, 2018, no. 2, pp. 85–90. (in Russ.)
8. Demidov G.A., Karandashev A.N., Shalobayev E.V., Perepelitsa F.A., Shil'ko S.V., Starzhinskiy V.E. *Polimernyye materialy i tekhnologii*, 2019, no. 3(5), pp. 85–90. (in Russ.)
9. <https://www.tehnohacker.ru/tehnologii/tehnologiya-3d-pechati-v-promyshlennosti/>. (in Russ.)
10. Polyakova D.A., Sokurenko Yu.A. *Almanac of scientific works of young scientists of ITMO University*, St. Petersburg, 2018, vol. 7, pp. 249–252. (in Russ.)
11. <https://www.designworldonline.com/polymers-outperform-metals-in-precision-gearing/>.
12. Shalobayev E.V., Medunetskiy V.M., Monakhov Yu.S. *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii*, 2004, no. 11, pp. 31–34. (in Russ.)
13. Shalobayev E.V., Medunetskiy V.M., Monakhov Yu.S. *Teoriya i praktika zubchatykh peredach* (Theory and Practice of Gears), Abstracts of reports of the International Conference, Izhevsk, 2004, pp. 139–144. (in Russ.)
14. Shalobayev E.V., Medunetskiy V.M., Magdiyev R.R., Starzhinskiy V.E., Shil'ko S.V. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*, 2012, no. 12-1, pp. 142–149. (in Russ.)
15. Medunetskiy V.M., Shalobayev E.V., Reznikov S.S., Starzhinskiy V.E. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*, 2012, no. 12-1, pp. 107–116. (in Russ.)
16. Medunetskiy V.M., Shalobayev E.V., Magdiyev R.R., Zaikin K.N., Surikov D.G. *Sovremennoye mashi-*

- nostroyeniye. Nauka i obrazovaniye*, 2014, no. 4, pp. 400–407. (in Russ.)
17. *Typical Plastic Gear Applications*, <http://www.intechpower.com/products/gears/typical-gear-applications>.
  18. Al'shits I.Ya., Blagov B.N. *Proyektirovaniye detaley iz plastmass. Spravochnik* (Design of plastic parts. Directory), Moscow, 1977, 215 p. (in Russ.)
  19. Mosyagin R.V., Pavlov B.I. *Detali i uzly malogabaritnykh reduktorov* (Details and Units of Small-Sized Gearboxes), Leningrad, 1967, 146 p. (in Russ.)
  20. Pavlov Ya.M. *Detali mashin* (Machine Parts), Leningrad, 1969, 448 p. (in Russ.)
  21. Ermakov V.A. *Zubchatyye kolea iz nemetallicheskih materialov* (Gear Wheels Made of Non-Metallic Materials), Moscow, 1966, 67 p. (in Russ.)
  22. Skorokhodov E.A. *Spravochnik tekhnologa-priborostroytelya* (Handbook of a Process Engineer), Moscow, 1980, vol. 2, 463 p. (in Russ.)
  23. Antonyuk V.E., Starzhinskiy V.E., Shalobayev E.V. et al. *Tekhnologiya proizvodstva i metody obespecheniya kachestva zubchatykh kolev i peredach* (Production Technology and Methods for Ensuring the Quality of Gears and Gears), St. Petersburg, 2007, 832 p. (in Russ.)
  24. Medunetskiy V.M., Zinkov V.A. *Morskoy vestnik*, 2019, no. 1(69), pp. 112–114. (in Russ.)
  25. Medunetskiy V.M. *Formoobrazovaniye modifitsirovannykh zubchatykh ventsov kombinirovannykh tsilindricheskikh peredach* (Shaping of Modified Gear Rims of Combined Cylindrical Gears), Doctor's thesis, St. Petersburg, 2003, 386 p. (in Russ.)
  26. Medunetskiy V.M., Shalobaev E.V., Zinkov V.A., Dang Nhan Thong, *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 2(62), pp. 192–194 (in Russ.)

**Data on authors**

- Viktor M. Medunetskiy** — Dr. Sci., Professor; ITMO University; E-mail: vm57med@yandex.ru  
**Evgeny V. Shalobaev** — PhD, Associate Professor; ITMO University;  
E-mail: shalobaev47@mail.ru  
**Vladimir A. Zinkov** — Post-Graduate Student; ITMO University; E-mail: zinkov21@yandex.ru

**For citation:** Medunetskiy V. M., Shalobaev E. V., Zinkov V. A. Method of calculation and design of small-sized cylindrical kinematic gears made of polymer composite materials. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 5. P. 436–443 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-5-436-443