

ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИЙ ЗУБЧАТОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕДАЧИ

В.Б. Кобзаренко

ORCID: 0009-0009-8514-9608 e-mail: kobzarenko_vb@bmstu.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия

Я.Ю. Левенков

ORCID: 0000-0001-6556-3232 e-mail: levenkov_yy@bmstu.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия

Рассмотрены методы улучшения эксплуатационных характеристик эвольвентной зубчатой передачи путем модификации геометрических параметров зубьев, а также проведен сравнительный анализ их влияния на плавность и шум. Определены рациональные значения параметров продольной и поперечной модификации зубьев. Расчеты проводились при помощи программного обеспечения KISSsoft. Выявлены модификации, позволяющие минимизировать шум и вибрации, а также кинематическую погрешность максимально эффективным образом.

Ключевые слова: зубчатые колеса; эксплуатационные характеристики; модификация зубчатых колес; KISSsoft; модернизация трансмиссии.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кобзаренко, В.Б. Влияние модификаций зубчатого зацепления на эксплуатационные характеристики передачи / В.Б. Кобзаренко, Я.Ю. Левенков // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2026. № 2. С. 84-95. EDN ZBEROH

THE EFFECT OF GEAR MODIFICATIONS ON THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF A GEAR TRAIN

V.B. Kobzarenko

ORCID: 0009-0009-8514-9608 e-mail: kobzarenko_vb@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

Ya.Yu. Levenkov

ORCID: 0000-0001-6556-3232 e-mail: levenkov_yy@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

Abstract. This article discusses methods for improving the performance of an evolved gear train by modifying the geometric parameters of the teeth, as well as a comparative analysis of their effect on smoothness and noise. The purpose of the work is to determine the rational values of the parameters of the longitudinal and transverse modification of the teeth. The calculations were performed using KISSsoft software. As result of the study, modifications were identified that minimize noise and vibration, as well as kinematic error in the most efficient way.

Key words: gears; performance characteristics; gear modification; KISSsoft; transmission modernization.

FOR CITATION: V.B. Kobzarenko, Ya. Yu. Levenkov. The effect of gear modifications on the operational characteristics of a gear train. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 2. Pp. 84-95. EDN ZBEROH

Введение

Зубчатые передачи получили широкое распространение в конструкциях силовых установок транспортных средств для передачи мощности от двигателя к движителю за счет своих преимуществ [1], которая осуществляется через контактное взаимодействие между рабочими поверхностями зубьев. Наибольшее распространение в автомобилестроении получил профиль зубьев в виде эвольвенты [2]. Зубчатые зацепления характеризуются рядом ключевых эксплуатационных показателей, среди которых особое значение имеют коэффициент полезного действия (КПД), уровень шума и технологичность изготовления. КПД отражает эффективность передачи механической энергии, уровень шума определяет акустический комфорт эксплуатации механизмов, а технологичность влияет на себестоимость производства и ремонтопригодность изделий.

Выход зубчатого зацепления из строя оказывает весьма негативное воздействие на работу механизма. Это может привести к снижению производительности транспортно-технологических средств, увеличению затрат на обслуживание и ремонт, а также аварийным ситуациям. Поломка и дефекты зубьев вызывают нарушение кинематической точности передачи движения, повышают уровня вибрации и шума, негативно сказываясь на работе сопряженных узлов и агрегатов. Наиболее частыми являются следующие причины отказов.

1. *Усталостное разрушение.* Возникает вследствие многократного нагружения зуба, приводящего к появлению трещин и сколов. Причинами служат неправильный подбор материалов, недостаточная твердость поверхности или чрезмерные нагрузки.

2. *Износ рабочих поверхностей.* Проявляется в форме абразивного износа, возникающего из-за попадания посторонних частиц в зону контакта зубьев, либо адгезионного износа, вызванного недостаточной смазкой или перегревом.

3. *Пластическое деформирование.* Наблюдается при перегрузках, особенно при запуске или остановке машин, когда зубья испытывают повышенные ударные нагрузки, что приводит к деформации и потере геометрической формы профиля зуба.

Существует множество различных методов улучшения эксплуатационных характеристик зубчатого зацепления, наиболее эффективным из которых является модификация [1]. Ее главная цель – минимизировать вибрацию и шум, а также обеспечить большую надежность и продолжительный срок службы.

Влияние модификаций на показатели надежности и эффективности зубчатых колес

Существует несколько видов модификации зубчатого зацепления, каждый из которых направлен на улучшение определенных характеристик передачи – снижения шума, увеличения нагрузочной способности, увеличения КПД передачи или компенсации деформаций:

- модификация линии зуба;
- модификация профиля зуба;
- комбинированные модификации зубьев.

Модифицированный исходный контур характеризуется рядом преимуществ: увеличенные или асимметричные углы обеспечивают повышенную контактную прочность зубьев; наличие приграничной зоны и притупленной вершины исключает интерференцию кромок и снижает концентрацию напряжений; также контролируется толщина вершины. В качестве оценочных показателей эффективности модификаций приняты кинематическая погрешность, коэффициенты запаса прочности ножки и боковой поверхности и коэффициенты перекрытия. Основные параметры продольной модификации зубчатого зацепления представлены в табл. 1. В зависимости от условий работы и изготовления зубчатого зацепления могут применяться различные наборы параметров модификации. Для уменьшения влияния погрешностей профиля зубьев на плавность работы цилиндрических зубчатых передач и для компенсации колебаний упругой податливости зубьев рекомендуется применять исходный контур с модификацией профиля зуба.

Таблица 1.
Параметры продольной модификации
Table 1.
Parameters of the longitudinal modification

Параметр	Обозначение	Единицы измерения
b	Ширина венца	мм
b_x	Исходная ширина	мм
b_c	Ширина продольной модификации	мм
b_f	Рабочая ширина продольной модификации	мм
$C_{\beta I}$	Глубина продольной модификации на левой стороне зуба	мм
$C_{\beta II}$	Глубина продольной модификации на правой стороне зуба	мм
r	Радиус продольной модификации	мм
r_I	Радиус продольной модификации на левой стороне зуба	мм
r_{II}	Радиус продольной модификации на правой стороне зуба	мм
L_{CI}	Длина продольной модификации на левой стороне зуба	мм
L_{CII}	Длина продольной модификации на правой стороне зуба	мм

Глобально схемы модификации исходного контура можно разделить на два типа: с прямой и с параболической линиями модификации. Значение этих и других параметров модификации профиля устанавливают либо экспериментальным путем, либо расчетом, учитывая степень точности колеса, статические характеристики типичных геометрических и монтажных погрешностей, упругую податливость зубьев, зависящих от метода производства [3]. Обозначения параметров модификаций представлены в табл. 2.

Таблица 2.
Параметры модификации исходного контура
Table 2.
Parameters for modifying the original contour

Параметр	Обозначение	Единицы измерения
Δ_q	Глубина модификации головки зуба	мм
Δ_g	Глубина модификации ножки зуба	мм
$\Delta_{\alpha q}$	Нормальная глубина модификации головки зуба	мм
$\Delta_{\alpha g}$	Нормальная глубина модификации ножки зуба	мм
h_q	Высота модификации головки зуба	мм
h_g	Высота модификации ножки зуба	мм
α_t	Угол модификации	градус

В технически обоснованных случаях допускается применять модификацию профиля комбинированного типа [3-5]. Также эффективность профильной модификации подтверждается данными [6].

Оценка влияния модификации зубьев на эксплуатационные характеристики зубчатой передачи

В качестве зубчатого зацепления был выбран планетарный колесный редуктор моста трактора (табл. 3).

Таблица 3.
 Параметры зубчатых колес

Table 3.
 Gears parameters

Параметр	Солнце	Сателлиты	Эпицикл
Зубчатое зацепление	Эвольвентное		
Модуль, мм	3	3	3
Число зубьев	12	23	60
Угол наклона, °	0	0	0
Угол профиля, °	25	25	25
Коэффициент высоты головки	1	1	1
Коэффициент высоты ножки	1,25	1,25	1,25
Коэффициент смещения по ГОСТ 16531	0,34	0,5752	0,4121
Делительный диаметр	36	69	180
Степень точности	8	8	8

Проверка влияния модификации может быть проведена только с использованием контактного анализа под нагрузкой. Чаще всего данная задача решается численными методами с использованием метода конечных элементов и соответствующих программных пакетов, что является довольно трудоемким с точки зрения временных затрат и затрат ресурсов ЭВМ [7]. Однако KISSsoft позволяет проводить данные расчеты с помощью встроенное в данное ПО аналитической модели Вебера-Банашека [8]. Преимущества данного подхода в том, что возможно исследовать различные варианты модификаций за короткое время.

Результаты данного расчета предоставляют важные для дальнейшей оптимизации и оценки шума параметры:

- ошибка передачи;
- амплитудный спектр ошибки передачи;
- возбуждающая сила.

Амплитудный спектр ошибки зубчатой передачи представляет собой графическое отображение распределения амплитуд колебаний зубчатых колес относительно определенных частот. Этот метод применяется для диагностики состояния зубчатых передач путем выявления характерных дефектов и оценки уровня вибрации, возникающей при работе механизма. Возбуждающая сила в зубчатых зацеплениях – это динамическая нагрузка, возникающая в результате взаимодействия зубьев шестерен. Она проявляется как периодический импульс силы, создаваемый контактами зубьев при вращении колес. Самым важным параметром для понижения уровня шума является ошибка передачи. Она описывает отклонение теоретической точки контакта от реальной с учетом деформации зуба.

Рассмотрим влияние на эксплуатационные характеристики зубчатых передач следующих модификаций.

Скругление кончика зуба. Данная модификация уменьшает концентрацию напряжений и снижает риск разрушения зубьев при эксплуатации, способствуя также снижению уровня шума и уменьшению износа контактирующих поверхностей благодаря плавному взаимодействию зубьев.

Срез кромок зуба. Заключается в специальной обработке острых краев зуба зубчатого колеса с целью уменьшения концентрации напряжений, снижения риска повреждения поверхности и предотвращения образования микротрещин.

Линейная модификация головки с переходным радиусом. Это способ изменения профиля зуба зубчатого колеса, при котором вершина зуба имеет небольшую закругленную форму, плавно соединенную с основной поверхностью зуба посредством линейного перехода. Цель модификации заключается в снижении концентрации напряжений, повышении прочности зуба и улучшении условий контакта зубьев.

Бочкообразность. Представляет из себя форму модифицированного профиля зуба зубчатого колеса, при которой поверхность зуба слегка выпуклая вдоль своей длины. Такой профиль создает равномерное распределение давления по всей длине контакта зубьев, снижая нагрузку на отдельные участки и предотвращая преждевременный износ.

Твист. Тип модификации профиля зубчатого зацепления, при котором ось симметрии зуба отклоняется от прямой линии, образуя спиральную или винтовую конфигурацию. Такое изменение профиля позволяет равномерно распределять нагрузку по ширине зуба.

Результаты расчета

Скругление кончика зуба. В качестве первой модификации профиля для рассмотрения была выбрана – скругление кончика зуба. Для всех зубчатых колес были заданы одинаковые параметры этой модификации, а именно радиус скругления. Ниже приведены результаты расчета (табл. 4). На рис. 1-3 приведены лучшие результаты и результаты расчета без модификации.

Таблица 4.
Результаты расчета

Table 4.
Calculation results

Значение радиуса модификации r , мкм	Запас прочности ножки зуба			Запас прочности боковой поверхности зуба			Перекрытия, солнечное колесо – сателлиты	Перекрытия, сателлиты – эпицикл
	Сол.	Сат.	Эп.	Сол.	Сат.	Эп.		
0	5,004	4,435	2,426	1,448	1,867	3,322	1,495/1,495	2,095/2,095
50	4,991	4,460	2,453	1,444	1,864	3,322	1,495/1,495	2,095/2,095
150	4,963	4,512	2,509	1,436	1,860	3,322	1,474/1,474	2,074/2,074
250	4,935	4,570	2,566	1,429	1,855	3,322	1,463/1,463	2,067/2,064

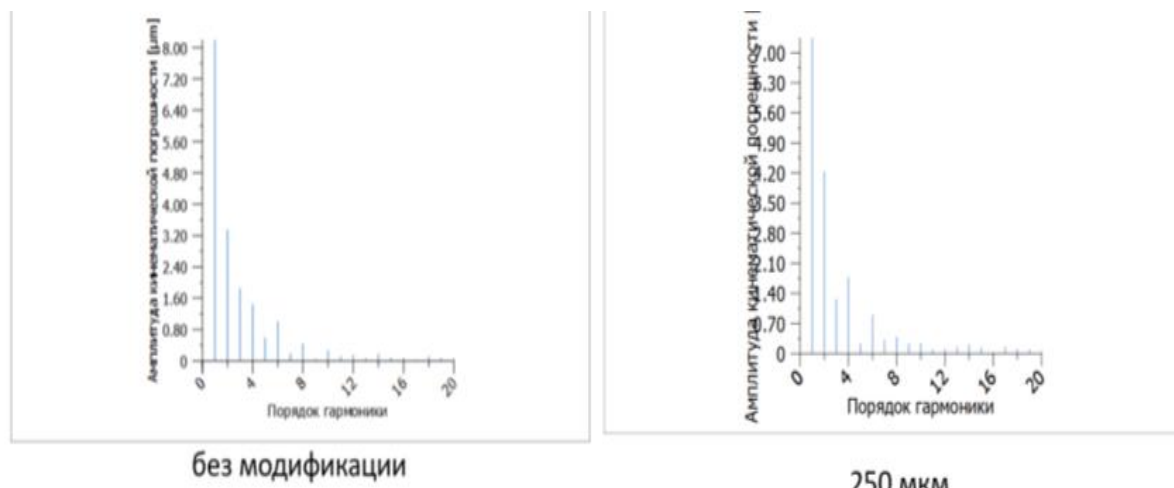


Рис. 1. Изменение амплитудного спектра кинематической погрешности

Fig. 1. Change in the amplitude spectrum of the kinematic error

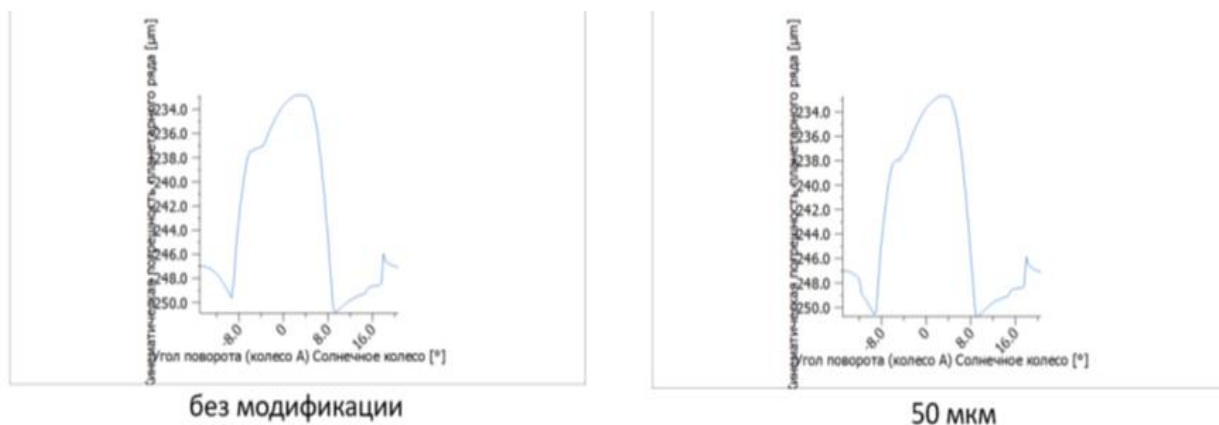


Рис. 2. Изменение кинематической погрешности

Fig. 2. Change in kinematic error

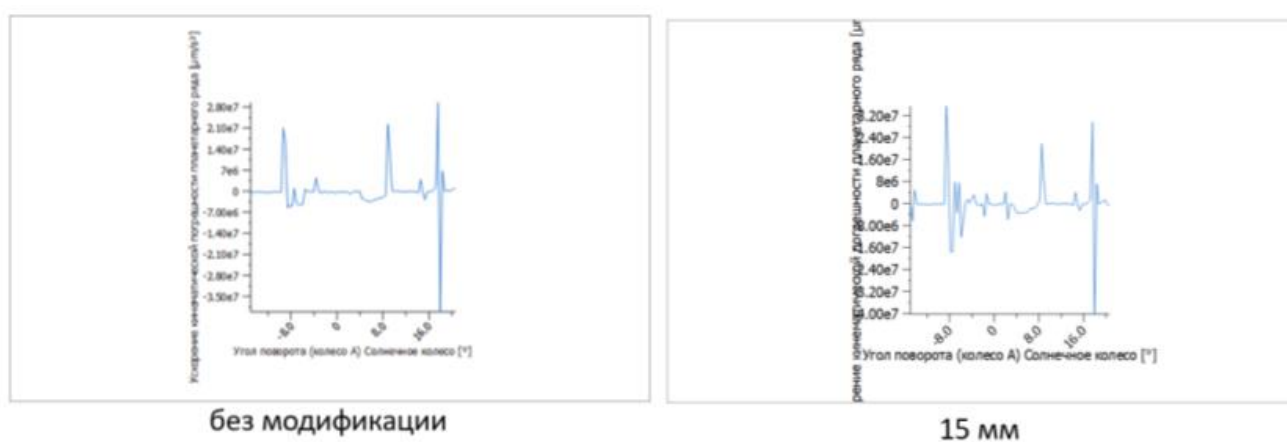


Рис. 3. Изменение ускорений кинематической погрешности

Fig. 3. Change in acceleration of kinematic error

Срез кромок зуба. В качестве следующей модификации профиля для рассмотрения была выбрана – срез кромок зуба. Для всех зубчатых колес были заданы одинаковые параметры этой модификации, а именно высота и угол наклона. Ниже приведены результаты расчета (табл. 5). На рис. 4-6 приведены лучшие результаты и результаты расчета без модификации.

Таблица 5.
Результаты расчета

Table 5.
Calculation results

Значение величины модификации h , мкм	Запас прочности ножки зуба			Запас прочности боковой поверхности зуба			Перекрытия, солнечное колесо – сателлиты	Перекрытия, сателлиты – эпицикл
	Сол.	Сат.	Эп.	Сол.	Сат.	Эп.		
0	5,004	4,435	2,426	1,448	1,867	3,322	1,495/1,495	2,095/2,095
100	4,935	4,549	2,525	1,426	1,854	3,322	1,463/1,463	2,107/2,107
200	4,867	4,679	2,631	1,404	1,842	3,343	1,442/1,442	2,064/2,064
300	4,796	4,669	2,747	1,381	1,830	3,398	1,410/1,410	1,946/1,946

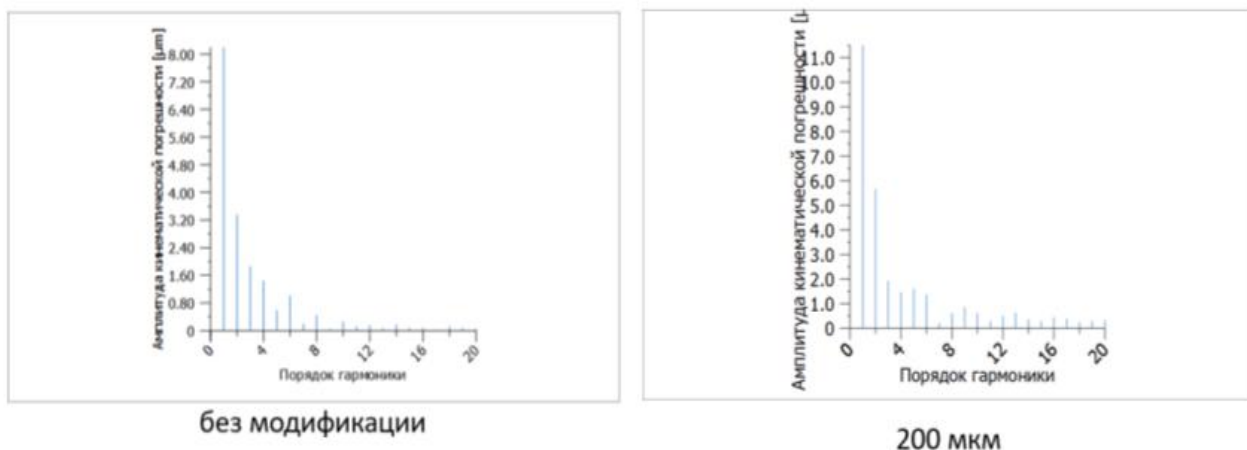


Рис. 4. Изменение амплитудного спектра кинематической погрешности

Fig. 4. Change in the amplitude spectrum of the kinematic error

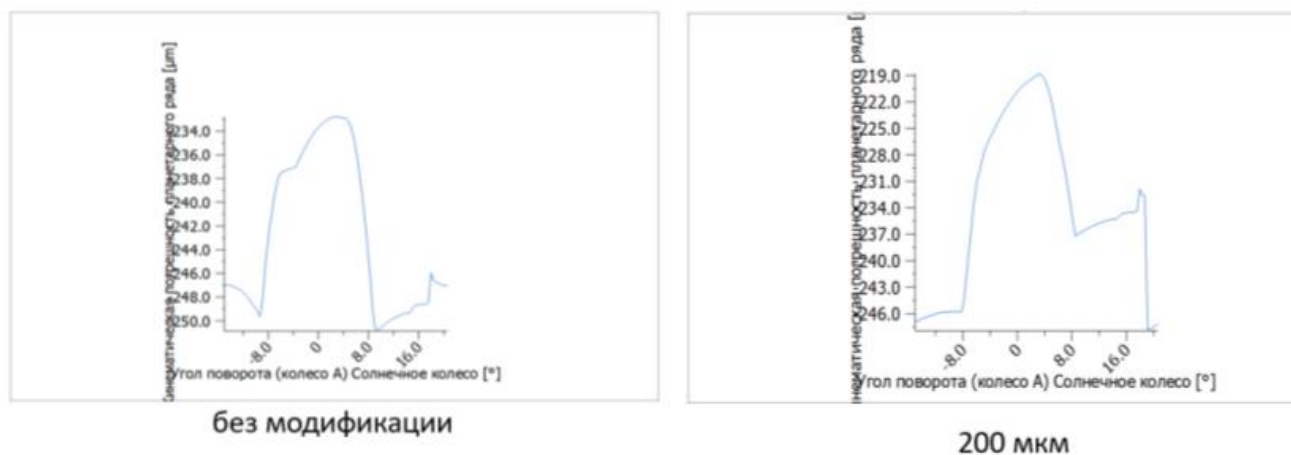


Рис. 5. Изменение кинематической погрешности

Fig. 5. Change in kinematic error

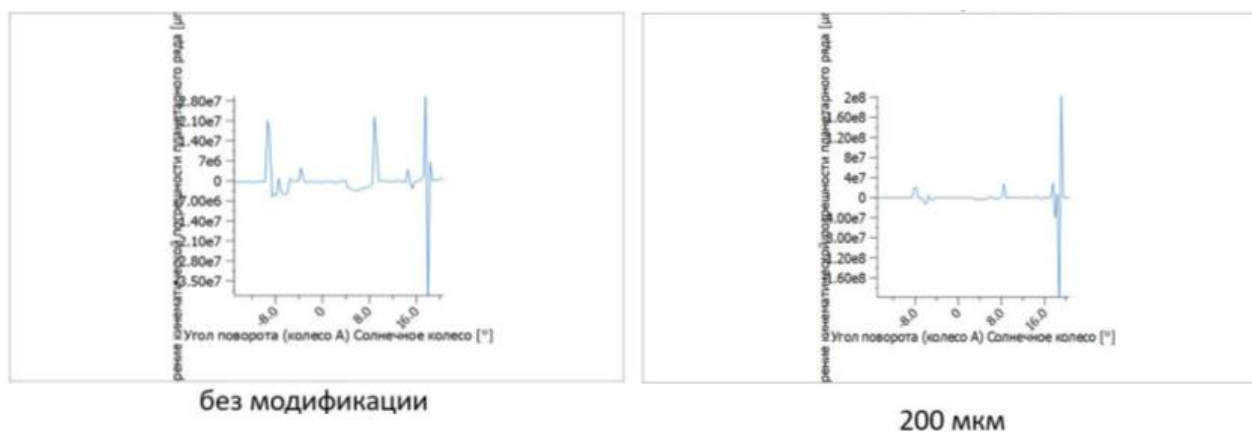


Рис. 6. Изменение ускорений кинематической погрешности

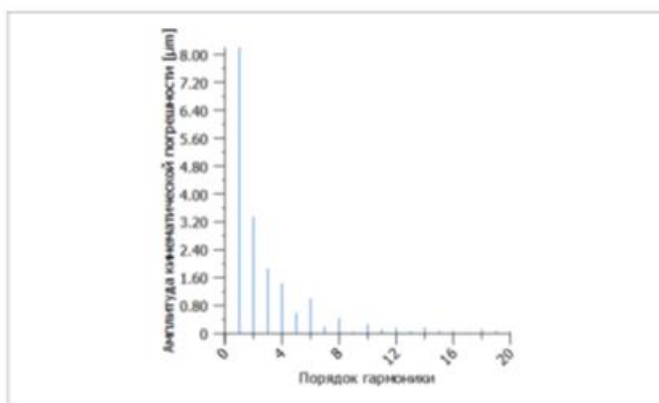
Fig. 6. Change in acceleration of kinematic error

Линейная модификация головки с переходным радиусом. Рассмотрено влияние модификации – линейная модификация головки с переходным радиусом. Ниже приведены результаты расчета (табл. 6). На рис. 7-9 приведены лучшие результаты и результаты расчета без модификации.

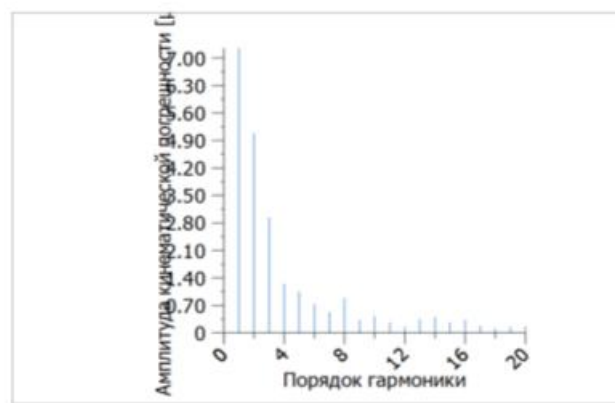
Таблица 6.
Результаты расчета

Table 6.
Calculation results

Значение толщины модификации, мкм	Запас прочности ножки зуба			Запас прочности боковой поверхности зуба			Перекрытия, солнечное колесо – спутники	Перекрытия, спутники – эпицикл
	Сол.	Сат.	Эп.	Сол.	Сат.	Эп.		
0	5,004	4,435	2,426	1,448	1,867	3,322	1,495/1,495	2,095/2,095
5	5,004	4,435	2,426	1,448	1,867	3,322	1,484/1,484	2,084/2,084
10	5,004	4,435	2,426	1,448	1,867	3,322	1,484/1,484	2,084/2,084
15	5,004	4,435	2,426	1,448	1,867	3,322	1,484/1,484	2,074/2,074



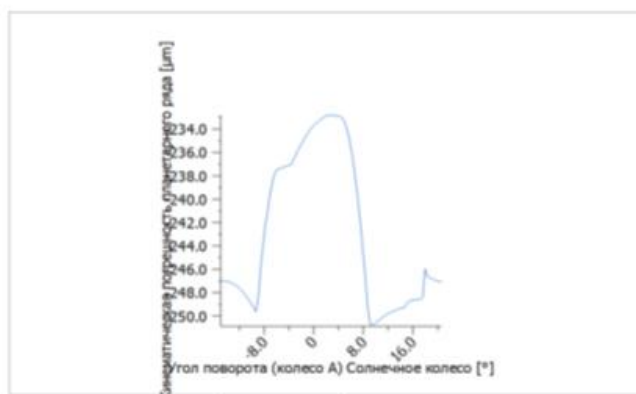
без модификации



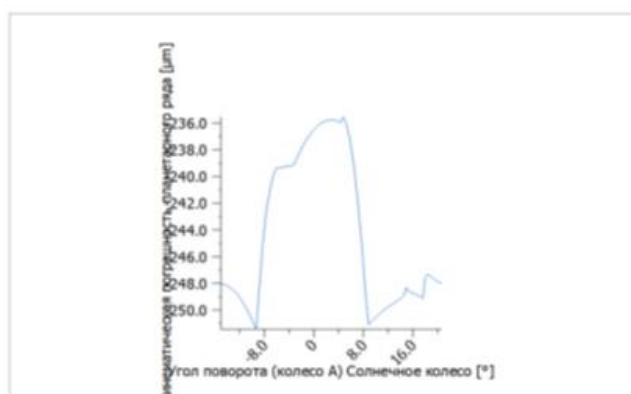
15 мкм

Рис. 7. Изменение амплитудного спектра кинематической погрешности

Fig. 7. Change in the amplitude spectrum of the kinematic error



без модификации



5 мкм

Рис. 8. Изменение кинематической погрешности

Fig. 8. Change in kinematic error

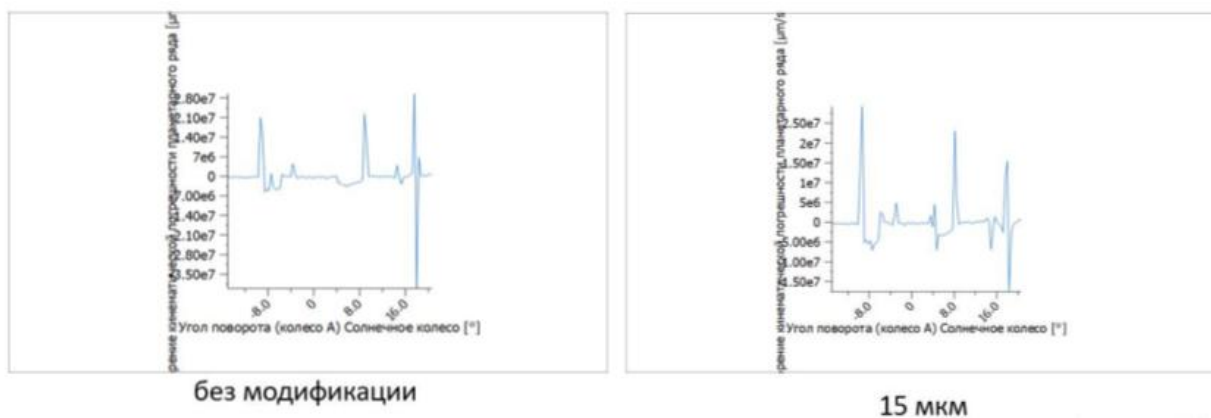


Рис. 9. Изменение ускорений кинематической погрешности

Fig. 9. Change in acceleration of kinematic error

Бочкообразность. В качестве первой продольной модификации для рассмотрения была выбрана – бочкообразность. Для всех зубчатых колес была задана одинаковая высота модификации. Ниже приведены результаты расчета (табл. 7). На рис. 10-12 приведены лучшие результаты и результаты расчета без модификации.

Таблица 7.
Результаты расчета

Table 7.
Calculation results

Значение высоты модификации h_g , мкм	Запас прочности ножки зуба			Запас прочности боковой поверхности зуба			Перекрытия, солнечное колесо – спутники	Перекрытия, спутники – эпицикл
	Сол.	Сат.	Эп.	Сол.	Сат.	Сол.		
0	5,004	4,435	2,426	1,448	1,867	3,322	1,495/1,495	2,095/2,095
5	4,422	4,029	2,204	1,340	1,726	3,009	1,495/1,495	2,116/2,116
15	3,608	3,366	1,841	1,183	1,523	2,649	1,495/1,495	2,149/2,149
25	3,133	2,922	1,598	1,089	1,402	2,440	1,516/1,516	2,181/2,181

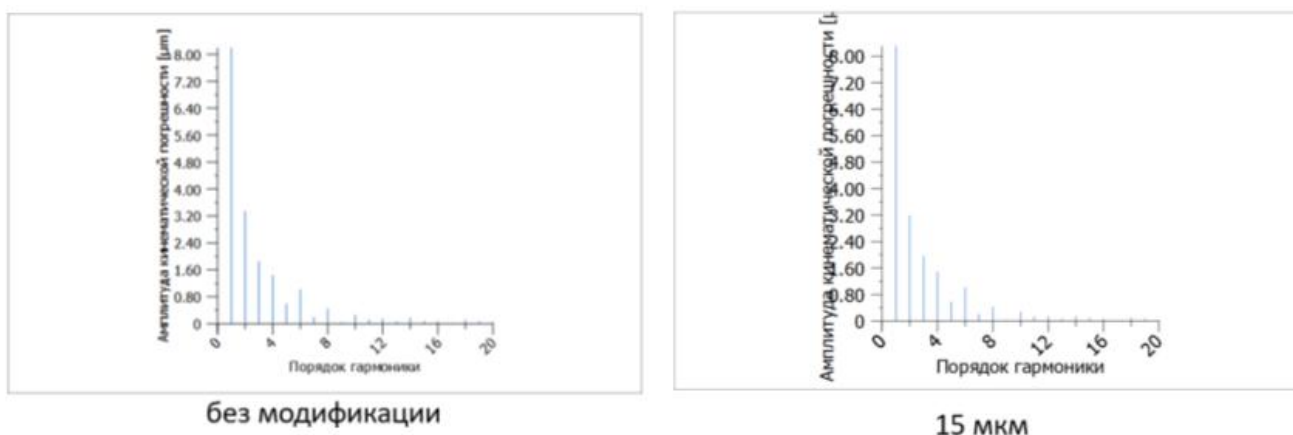


Рис. 10. Изменение амплитудного спектра кинематической погрешности

Fig. 10. Change in the amplitude spectrum of the kinematic error

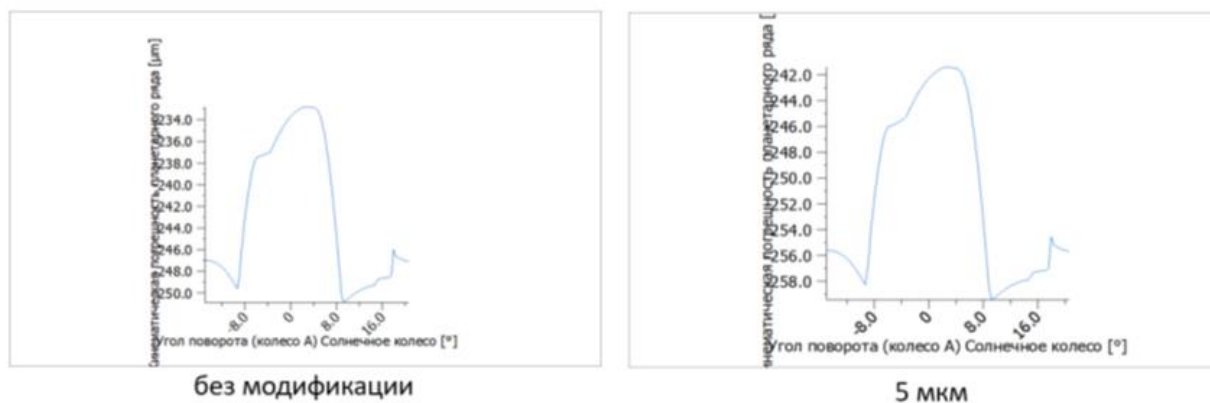


Рис. 11. Изменение кинематической погрешности

Fig. 11. Change in kinematic error

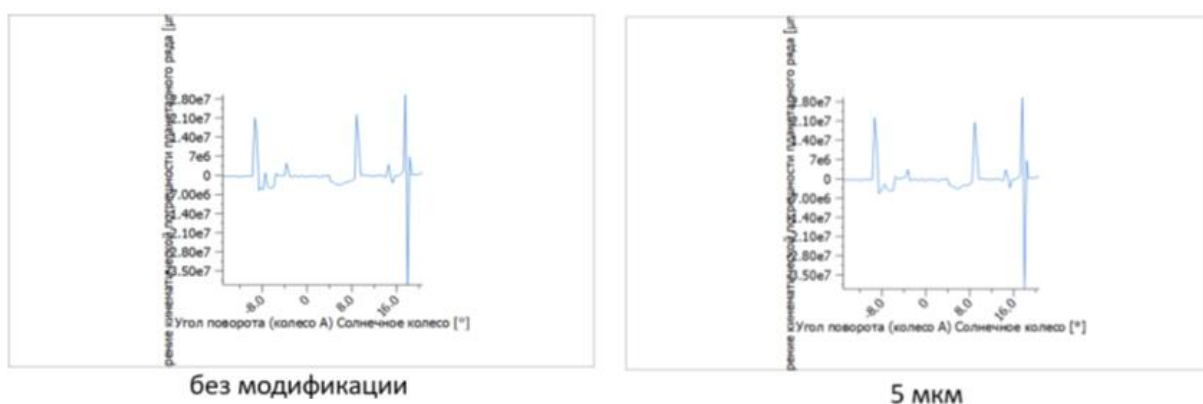


Рис. 12. Изменение ускорений кинематической погрешности

Fig. 12. Change in acceleration of kinematic error

Твист. В качестве следующей продольной модификации для рассмотрения была выбрана модификация под названием – твист. Для всех зубчатых колес была задана одинаковая толщина модификации. Ниже приведены результаты расчета (табл. 8). На рис. 13-15 приведены лучшие результаты и результаты расчета без модификации.

Таблица 8.
Результаты расчета

Table 8.
Calculation results

Значение толщины модификации, мкм	Запас прочности ножки зуба			Запас прочности боковой поверхности зуба			Перекрытия, солнечное колесо – сателлиты	Перекрытия, сателлиты – эпицикл
	Сол.	Сат.	Эп.	Сол.	Сат.	Сол.		
0	5,004	4,435	2,426	1,448	1,867	3,322	1,495/1,495	2,095/2,095
5	5,004	4,435	2,426	1,448	1,867	3,322	1,495/1,495	2,127/2, 127
10	5,004	4,435	2,426	1,448	1,867	3,322	1,495/1,495	2,106/2,106
15	5,004	4,435	2,426	1,448	1,867	3,322	1,495/1,495	2,106/2,106

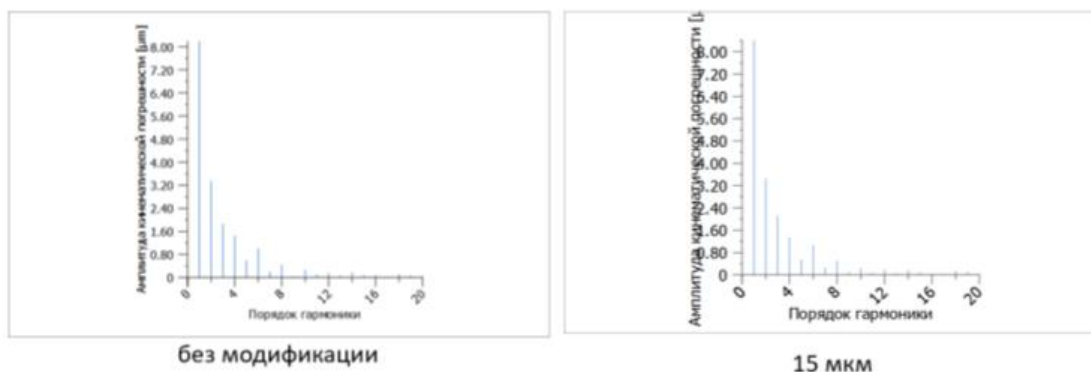


Рис. 13. Изменение амплитудного спектра кинематической погрешности

Fig. 13. Change in the amplitude spectrum of the kinematic error

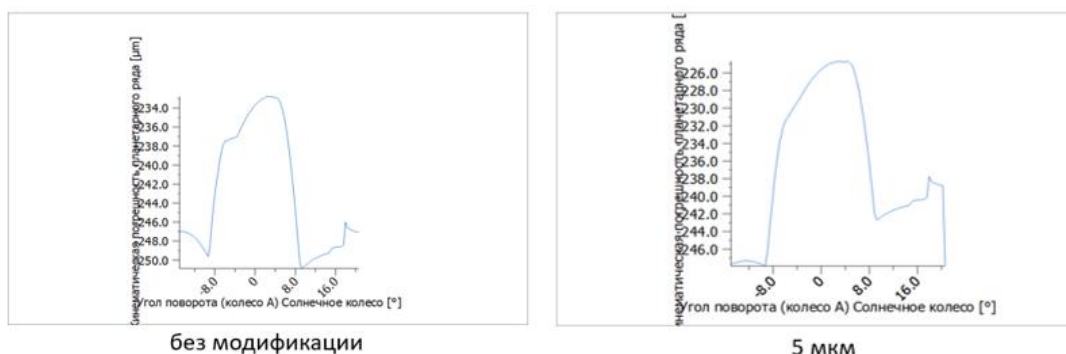


Рис. 14. Изменение кинематической погрешности

Fig. 14. Change in kinematic error

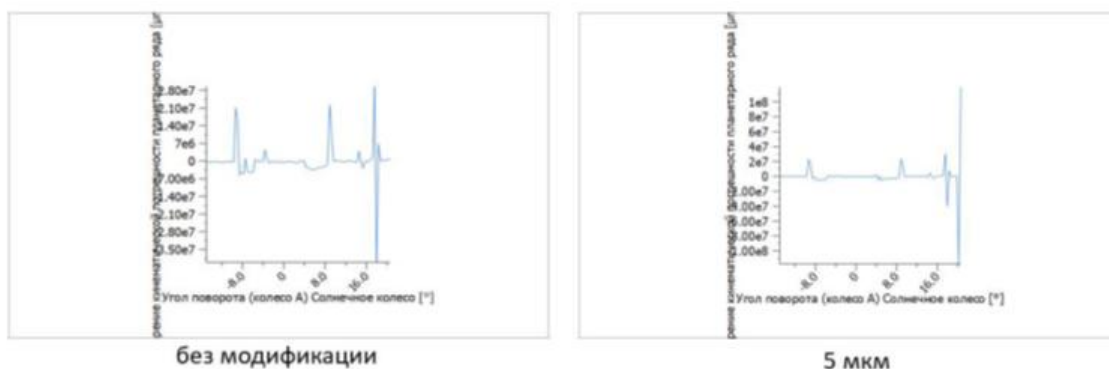


Рис. 15. Изменение ускорений кинематической погрешности

Fig. 15. Change in acceleration of kinematic error

Выводы

Наибольшую эффективность с точки зрения уменьшения величин первых трех гармоник показала линейная модификация головки с переходным радиусом, показав снижение этих величин на 12,5 %. Теоретически это означает, что применение данной модификации может способствовать уменьшению шумности и виброн нагруженности передачи.

Рост величин перекрытий в зубчатом зацеплении наблюдался только для модификации бочкообразность, для всех других рассмотренных в данной статье модификаций величины перекрытий уменьшались. Удалось достичь увеличения перекрытия зубьев на 4 %, что позволяет снизить ударные нагрузки и уменьшить зоны однопарного зацепления. При этом запасы прочности ножки и боковой поверхности зубьев значительно уменьшались на 35 и 25 % соответственно. Также наблюдался незначительный рост кинематической погрешности в пределах 3,3 %. С точки зрения увеличения запасов прочности ножки зуба эпицикла и сателлитов, наибольшее из всех значений было достигнуто при применении модификации *срез*

кромки зуба. Удалось достичь увеличения прочности ножки зуба эпицикла на 11,6 % и прочности ножки зуба сателлита 4,8 %.

Обоснованное введение продольных и профильных модификаций позволяет улучшить требуемые характеристики зубчатого зацепления, например, снизить шумность и/или повысить надежность зубчатых передач.

Библиографический список

1. **Рязанцева, И.Л.** О профильной модификации тяжело нагруженных зубчатых колес / И.Л. Рязанцева // Омский научный вестник. – 2011. – С. 73-76.
2. **Генкин, М.Д.** Повышение надежности тяжело нагруженных зубчатых передач / М.Д. Генкин, М.А. Рыжов. – Москва: Машиностроение, 1981. – 232 с.
3. **ISO 6336-1:2019(E).** Calculation of load capacity of spur and helical gears. Part 1: Basic principles, introduction. – 9 с.
4. **Гуляев, К.И.** Повышение работоспособности тяжело нагруженных цилиндрических прямозубых передач / К.И. Гуляев, Л.И. Рязанцева // Станки и инструмент. – 1986. – № 8. – С. 26-29.
5. **Михайлов, В.Л.** Экспериментальное исследование эффективности фланкирования при различных параметрах фланка / В.Л. Михайлов // Вопросы теории механизмов и машин. – Москва, 1958. – С. 11-13.
6. **Vivek, R.** Improving functional performance characteristics of spur gears through flank modifications by non-contact advanced finishing process / R. Vivek, K. Neelesh, P. Sunil // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol.124. Iss. 5. – P. 1787-1811.
7. **Сабоннадьер, Ж.К.** Метод конечных элементов и САПР / Ж.К. Сабоннадьер, Ж.Л. Кулон. – Москва: Мир, 1989. – 190 с.
8. Справочник KissSoft [Электронный ресурс]. – URL: [https:// www.kisssoft.com/ru](https://www.kisssoft.com/ru) (дата обращения: 10.10.2025).

References

1. Ryazantseva I.L. O profil'noy modifikatsii tyazhelonagruzhennykh zubchatykh koles [On profile modification of heavily loaded gears]. Omskiy nauchnyy vestnik [Omsk Scientific Bulletin]. 2011:73-76. (in Russian).
2. Genkin M.D., Ryzhov M.A. Povysheniye nadezhnosti tyazhelonagruzhennykh zubchatykh peredach [Increasing the reliability of heavily loaded gear drives]. Moscow: Mashinostroenie; 1981. 232 p. (in Russian).
3. ISO 6336-1:2019(E). Calculation of load capacity of spur and helical gears. Part 1: Basic principles, introduction. 9 p.
4. Gulyaev K.I., Ryazantseva L.I. Povysheniye rabotosposobnosti tyazhelonagruzhennykh tsilindricheskikh pryamozubykh peredach [Increasing the performance of heavily loaded spur cylindrical gears]. Stanki i instrument [Machine Tools and Tools]. 1986;(8):26-29. (in Russian).
5. Mikhaylov V.L. Eksperimental'noye issledovaniye effektivnosti flankirovaniya pri razlichnykh parametrah flanka [Experimental study of the effectiveness of flanking under various flank parameters]. Voprosy teorii mekhanizmov i mashin [Problems of Theory of Mechanisms and Machines]. Moscow; 1958:11-13. (in Russian).
6. Vivek R., Neelesh K., Sunil P. Improving functional performance characteristics of spur gears through flank modifications by non-contact advanced finishing process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2023;124(5):1787-1811.
7. Sabonnadiere J.K., Coulomb J.L. Metod konechnykh elementov i SAPR [Finite element method and CAD]. Moscow: Mir; 1989. 190 p. (in Russian).
8. Spravochnik KissSoft [KissSoft reference] [Internet]. Available from: [https:// www.kisssoft.com/ru](https://www.kisssoft.com/ru) [accessed 2025 Oct 10]. (in Russian).

**Дата поступления
в редакцию: 22.10.2025**

**Дата принятия
к публикации: 18.03.2026**