

УДК 621.941.1

doi: 10.18698/0536-1044-2023-10-44-56

Оптимизация режимных параметров точения с использованием степенных и полиномиальных уравнений

С.В. Грубый

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Optimization of the turning operating conditions using exponential and polynomial equations

S.V. Grubyi

Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрены вопросы расчета и оптимизации режимных параметров точения с применением различных методов: последовательного расчета по степенным уравнениям с поправочными коэффициентами, линейного программирования, нелинейного программирования с помощью штрафной функции и оптимального управления, в том числе со стабилизацией скорости изнашивания режущего инструмента. Для реализации разработанных алгоритмов использованы степенные уравнения, заимствованные из справочной литературы, или параметры которых рассчитаны по результатам моделирования. Для расчета режимных параметров по алгоритмам оптимального управления применены ранее полученные и рассчитанные полиномиальные уравнения. Показано, что режимные параметры по алгоритму управления со стабилизацией скорости изнашивания инструмента позволяют относительно лучше оценить такие выходные показатели, как средняя себестоимость обработки и технологическая производительность, одновременно обеспечивая заданный параметр шероховатости обработанной поверхности.

Ключевые слова: режимные параметры, степенные уравнения, полиномиальные уравнения, линейное программирование, нелинейное программирование, скорость изнашивания

The paper considers issues of calculating and optimizing the turning operating conditions applying various methods: sequential calculation using the exponential equations with correction factors, linear programming, nonlinear programming with penalty function and optimal control, including stabilization of the tool wear rate. To implement the developed algorithms, exponential equations were introduced either taken from the reference literature, or those which parameters were calculated based on the simulation results. To calculate the operating conditions using the optimal control algorithms, the previously obtained and calculated polynomial equations were used. It is shown that operating conditions of the control algorithm with the tool wear rate stabilization make it possible to relatively better assess such output indicators as the average cost of processing and technological productivity, while simultaneously ensuring the specified roughness parameter of the machined surface.

Keywords: operating conditions, exponential equations, polynomial equations, linear programming, nonlinear programming, wear rate

Назначение режимных параметров механической обработки можно рассматривать как многостадийный процесс, включающий в себя следующие этапы: выбор по рекомендациям производственных и инструментальных фирм, расчет по методикам (например, изложенным в учебных пособиях и литературных источниках [1–4]) и оптимизация как выбор лучшего варианта из совокупности возможных.

В общем виде методы оптимизации достаточно полно рассмотрены в специальной научной и учебной литературе. Эти методы постоянно развиваются вследствие усложнения задач управления процессом механической обработки. Так, в работах [5–8] приведены основные понятия, теоремы и методы решения задач оптимизации, в том числе многокритериальной. Методы оптимизации применяют в совокупности с методами компьютерного моделирования и программирования, используя программные системы CAD, CAM, CAE, PDM [9] и др.

Традиционная методика расчета режимов резания на операциях механической обработки основана на применении степенных уравнений для определения скорости и составляющих силы резания, крутящего момента и шероховатости обработанной поверхности с табличными значениями параметров, входящих в состав этих уравнений [3, 4, 10].

Однако эта методика имеет существенные недостатки, заключающиеся в следующем:

- в справочной литературе приведено ограниченное количество вариантов обрабатываемых (ОМ) и инструментальных (ИМ) материалов, видов режущих инструментов (РИ), для которых известны значения параметров степенных уравнений;
- традиционное использование поправочных коэффициентов для расширения области применения степенных уравнений по маркам ОМ и ИМ, геометрическим параметрам РИ приводит к расчетным погрешностям, которые могут быть значительными;
- степенные уравнения составлены для нового, неизношенного РИ и не могут быть использованы для вычисления выходных переменных с учетом нарастания изнашивания РИ во времени.

Наряду со степенными зависимостями для аппроксимации экспериментальных или расчетных данных применяют полиномиальные уравнения [11–13]. Используют методы повышения точности аппроксимирующих полиномов путем

увеличения их степени и количества членов, разбиения исходных данных на несколько частей и др. Разрабатывают алгоритмы прикладных задач аппроксимации, реализуемые, например, в программной среде MATLAB [13].

Цель исследования — анализ методов расчета и оптимизации режимных параметров точения с использованием степенных и полиномиальных уравнений, разработка алгоритмов расчета для достижения лучших оценок выходных показателей обработки.

Реализованы и проанализированы следующие методы: последовательного расчета по степенным уравнениям с поправочными коэффициентами, линейного программирования, нелинейного программирования с применением штрафной функции, оптимального управления режимными параметрами, в том числе со стабилизацией скорости изнашивания РИ.

Использованы степенные уравнения для расчета следующих параметров точения:

- крутящего момента M , Н·м;
- мощности N , кВт;
- скорости резания

$$v = \frac{C_v K_v}{T^{m_v} t^{x_v} s^{y_v}}, \text{ м/мин}; \quad (1)$$

- тангенциальной составляющей силы резания

$$P_z = C_p t^{x_p} s^{y_p} K_p / v^{n_p}, \text{ Н}; \quad (2)$$

- параметра шероховатости обработанной поверхности

$$Ra = \frac{C_R s^{y_R} t^{x_R}}{v^{n_R}} (1 + K_h h_z), \text{ мкм}, \quad (3)$$

где C_v , C_p , C_R и K_v , K_p , K_h — постоянные и поправочные коэффициенты; T — стойкость РИ, мин; m_v , x_v , y_v , x_p , y_p , n_p , y_R , x_R , n_R — показатели степеней; t — глубина резания, мм; s — подача РИ (далее подача), мм/об; h_z — износ РИ по задней поверхности, мм.

Постоянные, показатели степеней и поправочные коэффициенты в уравнениях скорости резания (1) и тангенциальной составляющей силы резания (2) для условий точения резцами из различных ИМ заготовок и ОМ приведены, например, в справочной литературе [3, 10].

Для условий обработки твердосплавными резцами заготовки из коррозионно-стойкой стали значения параметров степенных уравнений заимствованы из справочника [3] и указаны в табл. 1 и 2. Для уравнения параметра ше-

Таблица 1

Значения параметров степенного уравнения скорости резания

ОМ	Твердый сплав	Подача s , мм/об	Параметры уравнения			
			C_v	m_v	x_v	y_v
Сталь коррозионно-стойкая жаро-стойкая 12X18H10T (с пределом прочности $\sigma_b = 510$ МПа)	BK6M	$\leq 0,2$	240	0,25	0,15	0,15
		$> 0,2$	150	0,25	0,15	0,45

Таблица 2

Значения параметров степенного уравнения тангенциальной составляющей силы резания

ОМ	Твердый сплав	Параметры уравнения			
		C_p	n_p	x_p	y_p
12X18H10T	BK6M	3400	0,15	0,95	0,75

Таблица 3

Значения параметров степенного уравнения шероховатости обработанной поверхности

ОМ	Параметры уравнения				
	C_R	x_R	y_R	n_R	K_h
Алюминиевый сплав, сталь	29,50	0,338	1,253	0,25	0,96
Титановый сплав	18,85	0	1,076	0,15	0,96

роховатости поверхности (3) значения постоянной, показателей степеней и поправочного коэффициента для групп материалов получены по результатам обработки экспериментальных данных (табл. 3).

Вместе с тем в учебнике [5] предложена методика расчета параметров степенных уравнений по результатам экспериментальных и теоретических исследований. В качестве примера в табл. 4 приведены значения расчетных параметров степенного уравнения скорости резания для различных марок твердых сплавов и ОМ — коррозионно-стойкой стали.

Рассмотрены твердые сплавы: однокарбидный мелкозернистый BK6M, двухкарбидный мелкозернистый группы P10 и твердый сплав с однослойным покрытием BK6-TiN.

Расчеты выполнены для сборного резца со сменными многогранными пластинами (СМП) ромбической формы без заднего угла CNUM-120412, имеющего следующие параметры: главный угол в плане $\phi = 93^\circ$; передний угол $\gamma = -6^\circ$; угол наклона кромки $\lambda = 6^\circ$; износ РИ по задней поверхности $h_z = 0,3$ мм. Значения параметров соответствующего этим условиям степенного уравнения для расчета тангенциальной составляющей силы резания для различных твердых сплавов приведены в табл. 5.

Для сравнительного анализа методов расчета и оптимизации использованы два критерия: переменная (зависящая от режима резания) часть штучного времени и переменная часть себестоимости обработки детали на операции [5].

Таблица 4

Значения расчетных параметров степенного уравнения скорости резания для различных твердых сплавов

Твердый сплав	ОМ	Параметры уравнения			
		C_v	m_v	x_v	y_v
BK6M	12X18H10T	215,6	0,327	0,169	0,197
P10		300,6	0,343	0,150	0,183
BK6-TiN		335,3	0,344	0,204	0,204

Таблица 5

**Значения параметров степенного уравнения тангенциальной составляющей силы резания
для различных твердых сплавов**

Твердый сплав	ОМ	Параметры уравнения			
		C_p	n_p	x_p	y_p
ВК6М	12Х18Н10Т	4021,7	0,155	0,983	0,800
P10		4137,6	0,163	0,976	0,793

Переменная часть штучного времени определяется выражением

$$t_{st} = (t_o + t_v + t_{mv})(1 + a_{obs}/100) + T_{cm}t_o/T, \text{ мин}, \quad (4)$$

где t_o — основное время; t_v — вспомогательное время на установку и снятие заготовки; t_{mv} — машинно-вспомогательное время, связанное с установочными перемещениями РИ; a_{obs} — показатель, учитывающий долю времени на отдых рабочего и обслуживание рабочего места, %; T_{cm} — время на замену РИ после затупления и на настройку станка.

Выражение (4) можно упростить следующим образом:

$$t_{st} = C_\tau t_o + T_{cm}t_o/T = C_\tau t_o + t_o/K_T, \quad (5)$$

где C_τ — коэффициент, отражающий влияние на t_{st} времени вспомогательного и на обслуживание рабочего места, $C_\tau = 1,7$; K_T — число деталей, обработанных за период стойкости РИ.

Первое слагаемое выражения (5) отражает временные затраты непосредственно на процесс резания, второе — на замену РИ после затупления.

Переменная часть себестоимости, зависящая от режимов резания, рассчитывается как

$$C = t_o E + t_o C_{es} + t_o (T_{cm} E + E_u)/T = C_{st} + C_{ee} + C_u, \text{ руб./шт.}, \quad (6)$$

где E — стоимость минуты работы станка с учетом затрат на эксплуатацию и ремонт; C_{es} — затраты на электроэнергию, приходящиеся на минуту резания; E_u — расходы на РИ за период его стойкости; C_{st} , C_{ee} и C_u — доля себестоимости, приходящаяся на станок, электроэнергию и РИ соответственно.

Последовательный расчет режимных параметров точения выполнен по методике, изложенной в учебном пособии [1], и реализован в расчетной программе по алгоритму, который включает в себя следующие шаги:

- выбор этапов (стадий) обработки в соответствии с заданным качеством точности и

параметром шероховатости обработанной поверхности, назначение глубины резания на каждом этапе;

- расчет подачи по степенному уравнению $s = (C_s d^{z_s} / t^{x_s}) K_s$, где поправочный коэффициент есть произведение коэффициентов, учитывающих влияние прочности (твердости) ОМ, геометрических параметров РИ, жесткости заготовки и способа закрепления на станке, состояние поверхности заготовки и прочности твердосплавной СМП; для получистовой и чистовой обработок значение подачи корректируют по параметру шероховатости в степенном уравнении $s = C_s Ra^{y_s}$;

- вычисление скорости резания по степенному уравнению (1), где поправочный коэффициент есть произведение коэффициентов, которые учитывают влияние механических свойств ОМ, состояние поверхности заготовки, марки ИМ, геометрических параметров РИ;

- определение тангенциальной составляющей силы резания по степенному уравнению (2) с поправочными коэффициентами.

Для расчета в отмеченных степенных уравнениях использованы параметры, заимствованные из справочной литературы (см. табл. 1 и 2).

Для количественной реализации процедур оптимизации выбранные критерии (5) и (6) представлены соответствующими математическими уравнениями в виде целевой функции. Если она и все ограничения являются линейными, то это задача линейного программирования, и минимум линейной целевой функции находится на границе области допустимых значений.

Например, если для критерия штучного времени (5) принять $T = \text{const}$ как нормативное или табличное (рекомендуемое) значение стойкости РИ и выразить штучное время как функцию частоты вращения шпинделя станка n и подачи, то целевая функция запишется в виде

$$t_{st} = \frac{l(C_\tau + T_{cn}/T)}{ns} = \frac{B_1}{ns} \rightarrow \min; \quad (7)$$

$$ns \rightarrow \max; \quad f_o = x_1 + x_2 \rightarrow \max,$$

где l — длина обработки с учетом врезания и перебега; B_1 — постоянная, не зависящая от режимных параметров.

В выражении (7) выполнена замена переменных путем логарифмирования: $x_1 = \ln(n)$; $x_2 = \ln(100s)$, где подача увеличена в 100 раз, чтобы избежать отрицательных значений переменной x_2 .

Для условий наружного продольного точения заготовки на токарном станке с числовым программным управлением (ЧПУ) на рис. 1 в координатной плоскости переменных $x_1 - x_2$ построены линии технологических ограничений по стойкости РИ $T = 15$ мин, шероховатости обработанной поверхности $Ra = 2$ мкм, крутящему моменту $M = 136$ Н·м и мощности $N = 7,5$ кВт.

Вывод соответствующих линейных уравнений приведен в учебнике [5], параметры степенных уравнений взяты из табл. 3– 5. Характеристики привода станка с ЧПУ приняты следующими: в диапазоне частот вращения шпинделя станка от $n_{\min} = 36$ мин⁻¹ до $n_2 = 525$ мин⁻¹ — постоянный крутящий момент; в интервале от n_2 до $n_{\max} = 4200$ мин⁻¹ — постоянная мощность; диапазон подачи — от $s_{\min} = 0,05$ мм/об до $s_{\max} = 1,00$ мм/об. Здесь и далее индексы «min» и «max» соответствуют минимальным и максимальным (предельным) значениям параметров.

Предельные значения частоты вращения шпинделя станка и подачи на рис. 1 отражены

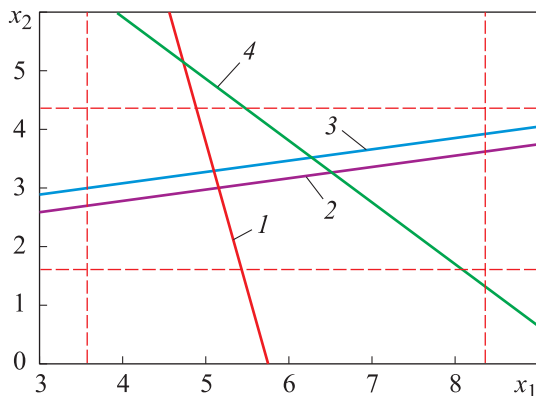


Рис. 1. Технологические ограничения в задаче линейного программирования для наружного продольного точения заготовки на токарном станке с ЧПУ:

- 1 — стойкость $T = 15$ мин; 2 — шероховатость $Ra = 2$ мкм;
3 — крутящий момент $M = 136$ Н·м;
4 — мощность $N = 7,5$ кВт

в виде штриховых линий. Условия соответствуют точению заготовки из стали 12Х18Н10Т сборным резцом с СМП из сплава ВК6М при следующих параметрах: диаметр вала $d = 200$ мм; длина вала $l = 100$ мм, глубина резания $t = 2$ мм. Заданы стойкость РИ $T = 15$ мин, предельный параметр шероховатости поверхности $Ra = 2$ мкм и износ РИ по задней поверхности $h_z = 0,3$ мм.

Координаты оптимальной точки соответствуют точке пересечения линий ограничений по стойкости РИ и параметра шероховатости поверхности: $X_o = [5,151; 3,003]$, что соответствует следующим режимным параметрам: частоте вращения шпинделя станка $n = 172,6$ мин⁻¹, скорости резания $v = 108,5$ м/мин и подаче $s = 0,202$ мм/об.

Результаты оптимизации режимных параметров методом линейного программирования приведены в табл. 6. Там же указаны результаты общепринятого последовательного расчета режимных параметров, методика которого изложена в учебном пособии [1].

Задача нелинейного программирования решена с использованием метода внутренней штрафной функции, когда условный экстремум находят как последовательность решений вспомогательной задачи безусловной минимизации для составленной определенным образом функции [14].

Критерий себестоимости (6) преобразован в целевую функцию от скорости резания и подачи $C(v, s) \rightarrow \min$, а оптимальные режимные параметры соответствуют координатам точки минимума штрафной функции

$$L(v, s, r_k) = C(v, s) + \dots + r_k \times$$

$$\times \left[\frac{1}{T(v, s) - T_{\min}(v, s)} + \frac{1}{M_z - M(v, s)} + \right.$$

$$+ \frac{1}{N_z - N(v, s)} + \dots + \frac{1}{Ra_z - Ra(v, s)} + \frac{1}{v_{\max} - v} +$$

$$\left. + \frac{1}{v - v_{\min}} + \frac{1}{s_{\max} - s} + \frac{1}{s - s_{\min}} \right] \rightarrow \min \quad (8)$$

при заданных ограничениях

$$T_{\min} = 15 \text{ мин}; \quad M_z = 136 \text{ Н·м}; \quad N_z = 7,5 \text{ кВт};$$

$$Ra_z = 2 \text{ мкм}; \quad v_{\max} = 200 \text{ м/мин};$$

$$v_{\min} = 10 \text{ м/мин}; \quad s_{\max} = 0,8, \quad s_{\min} = 0,05 \text{ мм/об.}$$

Здесь r_k — параметр штрафа как последовательность положительных чисел, стремящихся к нулю.

Таблица 6

Результаты последовательного расчета режимных параметров точения и их оптимизации методом линейного программирования

Метод расчета	Скорость резания v , м/мин	Подача s , мм/об	Штучное время t_{st} , мин	Стойкость РИ T , мин	Число деталей K_T , шт.	Себестоимость C , руб.	Производительность Q , шт/мин
Последовательный расчет	88,7	0,240	5,61	15	5,08	250,3	0,178
Линейное программирование	108,5	0,202	5,46	15	5,21	244,0	0,183

Для поиска минимума функции (8) использован метод спуска, когда итерационный процесс выполняется пропорционально антиградиенту функции, выражение которого в координатной форме имеет вид

$$v_{k+1} = v_k - \alpha_v \partial L(v_k, s_k, r_k) / \partial v;$$

$$s_{k+1} = s_k - \alpha_s \partial L(v_k, s_k, r_k) / \partial s;$$

где k — номер итерации (для каждой k -й итерации частные производные рассчитаны численно или аналитически); α_v, α_s — коэффициенты, регулирующие шаги по соответствующим переменным.

На рис. 2 показаны линии уровня заданной шероховатости, стойкости, себестоимости, а также траектория градиентного спуска из начальной точки в точку минимума. Линия себестоимости проходит через оптимальную точку с координатами: скорость резания $v = 81,1$ м/мин, подача $s = 0,186$ мм/об.

Для рассмотренных методов линейного и нелинейного программирования РИ находится

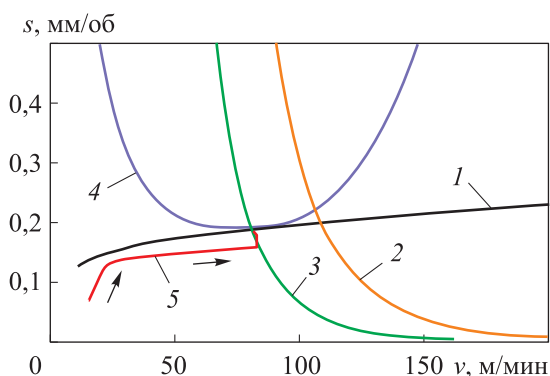


Рис. 2. Результаты оптимизации режимных параметров точения методом нелинейного программирования с минимизацией штрафной функции:
 1 — шероховатость $Ra = 2$ мкм;
 2 — стойкость $T = 15$ мин; 3 — стойкость $T = 38$ мин;
 4 — себестоимость $C = 222$ руб/шт.; 5 — траектория спуска

в фиксированном, начальном или изношенном состоянии. Вместе с тем процесс изнашивания РИ развивается во времени, изменяется износ РИ по задней поверхности, что оказывает влияние на режимные параметры и должно быть учтено в процедурах оптимизации.

Поэтому задача параметрической оптимизации в общем виде сформулирована как задача оптимального управления режимными параметрами (УРП), под которым понимают закономерное изменение параметров во времени, обеспечивающее соответствующее изменение скорости изнашивания РИ и выходных показателей обработки, и достижение принятых критериев оптимизации.

Решения задачи УРП лезвийной обработки получены на основе положений математической теории оптимальных процессов и управления [15] и проанализированы в учебнике [5] и других работах. В частности, выдвинуто положение о том, что можно найти такую траекторию фазовой координаты (линейного износа РИ по задней поверхности) и соответствующую кривую износа во времени, для которой принятый критерий в виде целевого функционала принимает наименьшее значение.

Для упрощения расчетных алгоритмов предложен и рассмотрен вариант УРП со стабилизацией скорости изнашивания РИ, который позволяет согласовать во времени процесс его изнашивания для различных условий обработки. Основное преимущество такого подхода заключается в отсутствии необходимости использования критерия оптимизации и его математического представления в виде уравнения.

Целевой функционал, включающий в себя только выражение для расчета скорости изнашивания РИ, принимает вид целевой функции

$$x_0 = \int_{t_0}^{T_v} |f_1(v, t, s, h_z) - f_{1z}| d\tau = \sum_{j=1}^{N_v} |f_1 - f_{1z}| t_{oj} \rightarrow \min, \quad (9)$$

где $f_1(v, t, s, h_z) = I_{nt}(v, t, s, h_z)$ — фактическая скорость изнашивания РИ; f_{1z} — заданная скорость изнашивания РИ; T_v — заданное время обработки; t_{oj} — шаг по времени обработки, определяющий число точек управления N_v ; τ — время обработки.

Далее использован расчетный алгоритм, включающий в себя следующие шаги:

- минимизацию функции (9) методом градиентного спуска;
- осуществление градиентного спуска с равномерным шагом относительно функции $f_R = Ra = \text{const}$ до выполнения условия $Ra \leq Ra_z$ (Ra_z — заданный параметр шероховатости), чтобы учесть ограничение по заданному параметру шероховатости обработанной поверхности из точки, соответствующей минимуму функции (9);
- фиксацию значения подачи в конечной точке фазовой траектории $s_{opt} = s_{nj}$, чтобы обеспечить заданный параметр шероховатости с целью замены переменных значений скорости резания и подачи постоянными;
- задание дискретных значений скорости v_i в пределах диапазона $v_{\min} \leq v_i \leq v_{\max}$; нахождение скорости резания, соответствующей минимальному значению средней себестоимости обработки деталей $C_i \rightarrow \min$.

Функция скорости изнашивания в уравнении (9) задана полиномиальным уравнением, которое содержит сорок один член и записывается в виде

$$y = \ln(I_{nt}) = b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_{41} x_2 x_3 x_5^2 \quad (10)$$

с процедурой кодирования переменных

$$x_1 = 1; \quad x_2 = C_{od}(v, v_{\max}, v_{\min}); \\ x_3 = C_{od}(t, t_{\max}, t_{\min});$$

$$x_4 = C_{od}(s, s_{\max}, s_{\min}); \\ x_5 = C_{od}(h_z, h_{z\max}, h_{z\min}).$$

Здесь C_{od} — функция кодирования, которая приводит размерные переменные к безразмерному виду

$$x_i = C_{od}(p_i, p_{i\max}, p_{i\min}) = 2 \frac{\ln p_i - \ln p_{i\max}}{\ln p_{i\max} - \ln p_{i\min}} + 1,$$

где p_i , $p_{i\max}$ и $p_{i\min}$ — соответственно текущее, максимальное и минимальное значение размерной переменной.

Аналогично можно записать, например, функцию для тангенциальной составляющей силы резания.

В табл. 7 приведены предельные значения переменных для двух пар ИМ и ОМ: твердый сплав ВК6М — коррозионно-стойкая сталь 12Х18Н10Т и твердый сплав ВК6 с износостойким покрытием AlCrN — коррозионно-стойкая сталь 12Х18Н10Т. Для обработки заготовки использован сборный резец с СМП формы WNUM-100412 ($\varphi = 90^\circ$).

В литературных источниках приведены данные по износу СМП с износостойкими покрытиями. Так, в статье [16] исследовано многослойное покрытие TiCN-Al₂O₃-TiN общей толщиной 19 мкм в условиях точения с износом РИ по задней поверхности до 0,3 мм. Отмечено, что целостность износостойкого покрытия сохраняется до $h_z = 0,2$ мм, затем наблюдается его изнашивание совместно с твердосплавной основой.

Сборные резцы, оснащенные СМП формы VBMТ-160408 с износостойкими покрытиями AlCrN и TiAlN, при точении стальных заготовок доводили до износа по задней поверхности $h_z = 0,6$ мм [17, 18]. Приведены кривые износа в диапазоне скорости резания $v = 210...410$ м/мин при работе со смазочно-охлаждающей жидкостью и без нее. Анализ этих кривых показывает, что интенсивность изнашивания РИ резко возрастает, начиная с износа $h_z = 0,1$ мм вследствие нарушения целостности покрытия.

Таблица 7

Предельные значения переменных для полиномиальных уравнений

ИМ	Износостойкое покрытие	v_{\max} , м/мин	v_{\min} , м/мин	t_{\max} , м	t_{\min} , м	s_{\max} , мм/об	s_{\min} , мм/об	$h_{z\max}$, мм	$h_{z\min}$, мм
ВК6М	–	280	40	4	0,7	0,5	0,10	0,5	0,02
ВК6	AlCrN	330	60	4	0,7	0,5	0,10	0,1	0,02

На основании изложенного максимальное значение износа твердосплавной СМП с износостойким покрытием ограничено $h_{z\max} = 0,1$ мм (см. табл. 7) для предотвращения нарушения целостности покрытия.

Матрицы полиномов и коэффициентов для уравнения $y = \ln I_{nt}$, аппроксимирующего скорость изнашивания сборного резца с СМП из твердого сплава ВК6М, приведены в учебнике [5].

Проиллюстрированы решения задачи параметрической оптимизации по алгоритму стабилизации скорости изнашивания РИ с целевой функцией (9) на примере обработки вала диаметром $d = 200$ мм и длиной $l = 100$ мм из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т резцом с СМП из твердого сплава ВК6М формы WNUM-100412 ($\varphi = 90^\circ$) на глубину резания $t = 2,0$ мм.

В качестве заданных краевых условий выступали: начальное значение износа РИ по задней поверхности (фазовой координаты) $h_{z0} = 0,02$ мм и его конечное значение $h_{z\max} = 0,3$ мм; ограничение по параметру шероховатости $Ra = 2$ мкм; время обработки $T_v = 15$ мин. Оптимальные режимные параметры, имеющие переменный характер во времени, сравнивали с параметрами стационарного режима, которые определяли по предложенной методике.

Зависимости скорости резания v , подачи s , износа РИ по задней поверхности h_z и параметра шероховатости поверхности Ra от времени точения τ гладкого вала при переменных и постоянных режимных параметрах приведены на рис. 3, а-г.

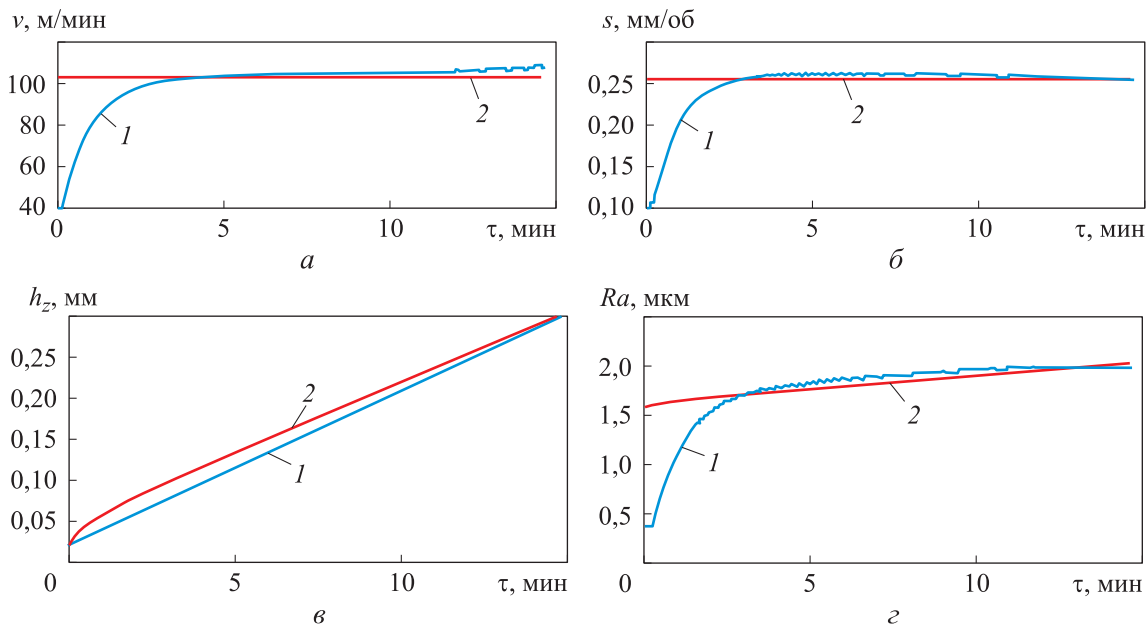


Рис. 3. Зависимости скорости резания v (а), подачи s (б), износа РИ по задней поверхности h_z (в) и параметра шероховатости Ra (г) от времени точения τ гладкого вала при переменных (1) и постоянных (2) режимных параметрах

Таблица 8

Значения показателей для различных вариантов оптимизации и расчета

Вариант расчета	Скорость v , м/мин	Подача s , мм/об	Штучное время $t_{шт}$, мин	Стойкость T , мин	Число деталей K_T , шт.	Себестоимость C , руб	Производительность Q , шт/мин
Нелинейное программирование с минимизацией штрафной функции (8)	81,1	0,186	7,41	38,2	9,200	222,3	0,135
УРП ($f_1 = \text{const}$)	var	var	4,67	14,7	5,983	175,3	0,214
УРП ($v = \text{const}, s = \text{const}$)	103,0	0,256	4,55	14,6	6,109	170,9	0,220

Примечание. var — скорость резания и подача изменяются во времени согласно рис. 3, а и б.

Полученные режимные параметры, в том числе постоянные во времени, обеспечивают заданное значение параметра шероховатости.

Для сравнения в табл. 8 приведены значения показателей для различных вариантов оптимизации и расчета: нелинейного программирования с минимизацией штрафной функции, УРП со стабилизацией скорости изнашивания РИ ($f_1 = \text{const}$) и УРП с фиксированной подачей в конечной точке фазовой траектории и постоянной скоростью резания ($v = \text{const}$, $s = \text{const}$), обеспечивающей минимальное значение критерия — себестоимости обработки. Лучшие результаты по средней себестоимости и технологической производительности показали два последних варианта, что можно объяснить учетом

изменения износа РИ по задней поверхности во времени обработки.

Анализ результатов исследования показал, что рассчитанные по предложенной методике постоянные значения режимных параметров имеют достаточно высокие выходные показатели, в том числе по стойкости и износу РИ по задней поверхности, себестоимости, производительности, и могут быть рекомендованы для применения при проектировании технологических процессов на операциях механической обработки.

Одним из примеров операции является точение сборным резцом ступенчатого вала. Рассмотрена последовательная обработка заготовки — ступенчатого вала из коррозионно-

Таблица 9

Исходные данные для обработки ступенчатого вала сборным резцом из твердого сплава ВК6М

Параметр	Ступень вала		
	первая	вторая	третья
Диаметр вала d , мм	100	150	200
Длина вала l , мм	100	100	100
Глубина резания t , мм	2	2	2
Параметр шероховатости поверхности Ra , мкм	3	3	3

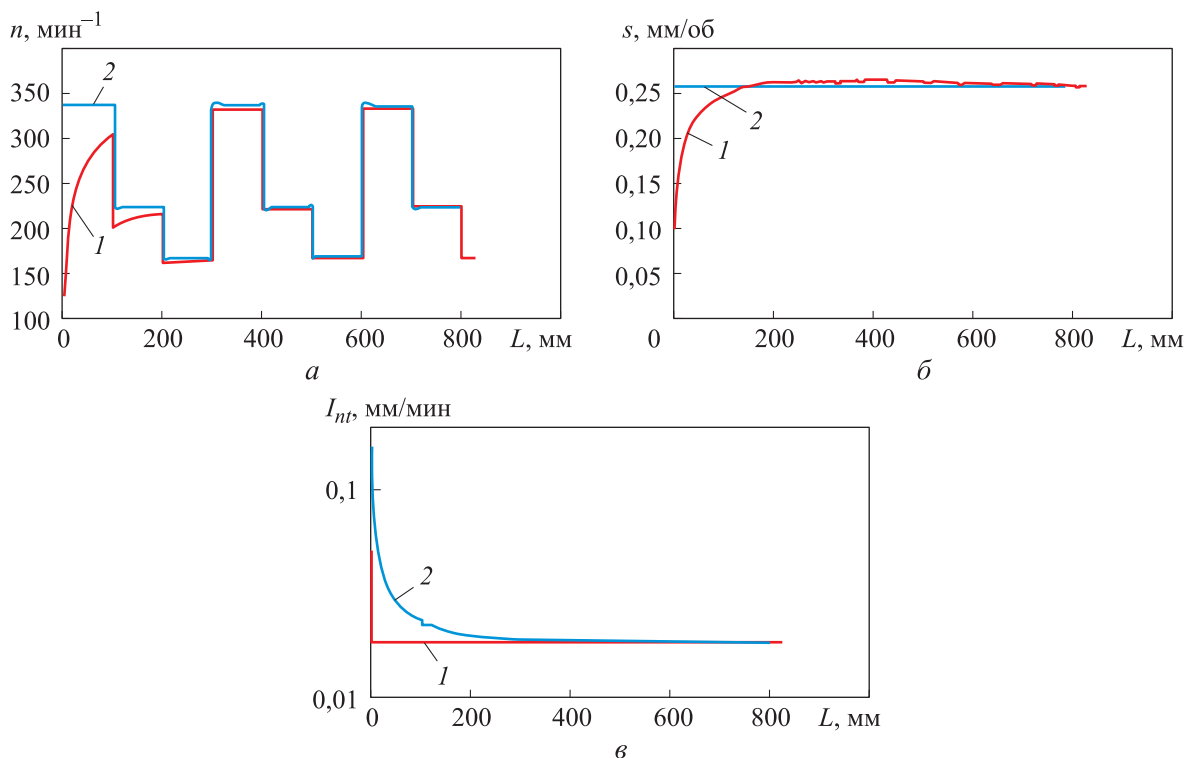


Рис. 4. Зависимости частоты вращения шпинделя n (а), подачи s (б) и скорости изнашивания РИ I_{nt} (в) от длины обработки L ступенчатого вала для переменных (1) и постоянных (2) режимных параметров

Таблица 10

Показатели обработки ступенчатого вала сборным резцом с СМП из твердого сплава без износостойкого покрытия и с ним

ИМ	v , м/мин	s , мм/об	Частота вращения n , мин ⁻¹ , для ступеней вала			T , мин	C , руб.	Q , шт/мин	Ra , мкм
			1	2	3				
<i>При отсутствии износостойкого покрытия СМП</i>									
ВК6М	106	0,258	337,4	224,9	168,7	13,33	364,9	0,107	2,033
	85	0,209	270,6	180,4	135,3	28,65	393,3	0,074	1,44
	88	0,176	280,1	186,7	140,1	29,30	449,1	0,065	1,03
<i>При наличии износостойкого покрытия СМП</i>									
ВК6–AlCrN	287	0,300	913,5	609,0	456,8	15,1	111,0	0,335	1,80

стойкой стали 12Х18Н10Т — одним сборным резцом с СМП из твердого сплава ВК6М формы WNUM-100412 ($\varphi = 90^\circ$) при следующих крайних условиях: $h_{z0} = 0,02$ мм; $h_{z\max} = 0,3$ мм. Для расчета скорости изнашивания РИ использовано полиномиальное уравнение (10). Исходные данные по размерам и условиям обработки ступенчатого вала указаны в табл. 9.

Оптимизацию режимных параметров со стабилизацией скорости изнашивания РИ для ступенчатого вала выполняют аналогично таковой для гладкого вала по целевой функции (9). Затем назначают постоянное значение подачи в конце фазовой траектории и рассчитывают постоянное значение скорости резания, обеспечивающее минимальную себестоимость обработки. Значения скорости резания и подачи не зависят от диаметра и длины отдельных поверхностей ступенчатого вала. Далее для каждой поверхности определяют частоту вращения шпинделя и через общую длину точения — число обработанных деталей за период стойкости.

Зависимости частоты вращения шпинделя станка, подачи и скорости изнашивания РИ от

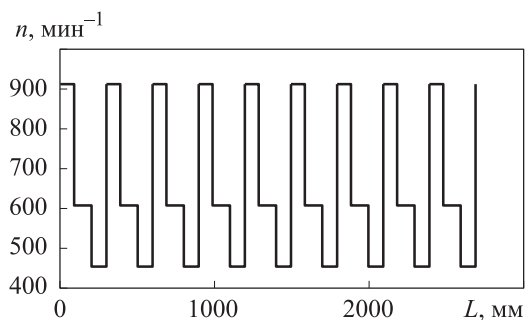


Рис. 5. Зависимость частоты вращения шпинделя n от длины обработки L ступенчатого вала сборным резцом с СМП с износостойким покрытием, при постоянных скорости резания и подаче

длины обработки L для переменных и постоянных режимных параметров приведены на рис. 4, а–в.

С уменьшением заданной шероховатости, т. е. с ужесточением уровня ограничения, выходные показатели обработки снижаются.

Показатели точения ступенчатого вала из коррозионно-стойкой стали сборным резцом с СМП из твердого сплава без износостойкого покрытия и с ним, рассчитанные по варианту с постоянными значениями скорости резания и подачи при различных значениях стойкости РИ и параметра шероховатости поверхности, приведены в табл. 10.

Использование сборного резца с СМП из твердого сплава ВК6 с износостойким покрытием значительно повышает эффективность обработки по рассмотренным показателям. Изменение частоты вращения шпинделя по ступеням вала (см. табл. 9) в зависимости от общей длины обработки сборным резцом с СМП из твердого сплава ВК6 с износостойким покрытием при постоянных скорости резания и подаче показано на рис. 5.

Соответствующие показатели приведены в табл. 10. До предельного износа $h_{z\max} = 0,1$ мм обработано девять деталей, значения себестоимости значительно ниже, а технологическая производительность выше, чем у аналогичных параметров при использовании СМП без износостойкого покрытия.

Выводы

1. Расчеты режимных параметров точения по степенным уравнениям из справочных литературных источников не учитывают влияние износа РИ. По методике, приведенной в рабо-

те [5], можно рассчитать режимные параметры степенных уравнений для принятого износа РИ по задней поверхности и проанализировать его влияние на них.

2. Последовательный расчет режимных параметров точения и оптимизация методом линейного программирования дают близкие значения по штучному времени обработки, технологической производительности, средней себестоимости с небольшим преимуществом оптимизации.

3. Полиномиальные уравнения для функций скорости изнашивания РИ и тангенциальной составляющей силы резания учитывают как

влияние режимных параметров, так и износа РИ по задней поверхности.

4. Оптимизация по алгоритму управления режимными параметрами со стабилизацией скорости изнашивания РИ и результирующий стационарный режим резания имеют преимущества перед нелинейным программированием методом штрафной функции по себестоимости и технологической производительности.

5. Использование СМП с износостойким покрытием позволяет существенно повысить скорость резания, тем самым значительно улучшить выходные показатели обработки.

Литература

- [1] Грубый С.В. *Расчет режимов резания для операций механической обработки*. Москва, Вологда, Инфра-Инженерия, 2021. 200 с.
- [2] Безъязычный В.Ф., Аверьянов И.Н., Кордюков А.В. *Расчет режимов резания*. Рыбинск, РГАТА, 2009. 185 с.
- [3] Гуревич Я.Л., Горохов М.В., Захаров В.И. и др. *Режимы резания труднообрабатываемых материалов*. Москва, Машиностроение, 1986. 240 с.
- [4] Гузев В.И., ред. *Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением*. Москва, Машиностроение, 2007. 364 с.
- [5] Грубый С.В. *Математическое моделирование и оптимизация механической обработки*. Москва, Вологда, Инфра-Инженерия, 2022. 212 с.
- [6] Коротченко А.Г., Кумагина Е.А., Сморякова В.М. *Введение в многокритериальную оптимизацию*. Нижний Новгород, ННГУ, 2017. 55 с.
- [7] Ногин В.Д. *Принятие решений при многих критериях*. Санкт-Петербург, ЮТАС, 2007. 104 с.
- [8] Пестрецов С.И. *Компьютерное моделирование и оптимизация процессов резания*. Тамбов, Изд-во ТГТУ, 2009. 104 с.
- [9] Пестрецов С.И., Алтунин К.А., Соколов М.В. и др. *Концепция создания системы автоматизированного проектирования процессов резания в технологии машиностроения*. Москва, Спектр, 2012. 212 с.
- [10] Васильев А.С., Кутин А.А., ред. *Справочник технолога-машиностроителя*. Т. 2. Москва, Инновационное машиностроение, 2018. 818 с.
- [11] Заикин П.В., Погореловский М.А., Микшина В.С. Аппроксимация эмпирических функций полиномами высших порядков. *Вестник кибернетики*, 2015, № 4, с. 129–134.
- [12] Петрянин Д.Л., Юрков Н.К. *Повышение точности моделей аппроксимации. Надежность и качество сложных систем*, 2016, № 2, с. 59–66.
- [13] Масловская А.Г. *Аппроксимация функций в задачах обработки экспериментальных данных*. Благовещенск, Амурский гос. ун-т, 2021. 51 с.
- [14] Зарубин В.С., Крищенко А.П., ред. *Методы оптимизации*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 440 с.
- [15] Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В. и др. *Математическая теория оптимальных процессов*. Москва, Наука, 1983. 392 с.
- [16] Lin Y.J., Agrawal A., Fang Y. Wear progressions and tool life enhancement with AlCrN coated inserts in high-speed dry and wet steel lathing. *Wear*, 2008, no. 264, no. 3–4, pp. 226–234, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.03.007>
- [17] Khrais S.K., Lin Y.J. Wear mechanisms and tool performance of TiAlN PVD coated inserts during machining of AISI 4140 steel. *Wear*, 2007, no. 262, no. 1–2, pp. 64–69, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.052>
- [18] Park K.H., Kwon P.Y. Flank wear of multi-layer coated tool. *Wear*, 2011, vol. 270, no. 11–12, pp. 771–780, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.030>

References

- [1] Grubiy S.V. *Raschet rezhimov rezaniya dlya operatsiy mekhanicheskoy obrabotki* [Calculation of cutting regimes for operation of mechanical processing]. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2021. 200 p. (In Russ.).
- [2] Bez'yazychnyy V.F., Aver'yanov I.N., Kordyukov A.V. *Raschet rezhimov rezaniya* [Calculation of cutting regimes]. Rybinsk, RGATA Publ., 2009. 185 p. (In Russ.).
- [3] Gurevich Ya.L., Gorokhov M.V., Zakharov V.I. et al. *Rezhimy rezaniya trudnoobrabatyvaemykh materialov* [Cutting modes of hard-to-cut materials]. Moscow, Mashinostroenie, 1986. 240 p. (In Russ.).
- [4] Guzeev V.I., ed. *Rezhimy rezaniya dlya tokarnykh i sverlilno-frezerno-rastochnykh stankov s chislovyim programmnyim upravleniem* [Cutting modes for numerically controlled lathes and milling and boring machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 364 p. (In Russ.).
- [5] Grubiy S.V. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya mekhanicheskoy obrabotki* [Mathematical modelling and optimization of machining]. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2022. 212 p. (In Russ.).
- [6] Korotchenko A.G., Kumagina E.A., Smoryakova V.M. *Vvedenie v mnogokriterial'nyuyu optimizatsiyu* [Introduction into multicriteria optimization]. Nizhnyy Novgorod, NNGU Publ., 2017. 55 p. (In Russ.).
- [7] Nogin V.D. *Prinyatie resheniy pri mnogikh kriteriyakh* [Multicriteria decision making]. Sankt-Petersburg, YuTAS Publ., 2007. 104 p. (In Russ.).
- [8] Pestretsov S.I. *Kompyuternoe modelirovanie i optimizatsiya protsessov rezaniya* [Computer modelling and optimization of cutting processes]. Tambov, Izd-vo TGTU Publ., 2009. 104 p. (In Russ.).
- [9] Pestretsov S.I., Altunin K.A., Sokolov M.V. et al. *Kontseptsiya sozdaniya sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya protsessov rezaniya v tekhnologii mashinostroeniya* [Concept of computer-aided design system for cutting processes in mechanical engineering technology]. Moscow, Spektr Publ., 2012. 212 p. (In Russ.).
- [10] Vasilyev A.S., Kutin A.A., eds. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya*. T. 2 [Handbook of mechanical engineering technologist. Vol. 2]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2018. 818 p. (In Russ.).
- [11] Zaikin P.V., Pogorelovskiy M.A., Mikshina V.S. Approximation of experimental data functions by high order polinomial. *Vestnik kibernetiki* [Proceedings in Cybernetics], 2015, no. 4, pp. 129–134. (In Russ.).
- [12] Petryanin D.L., Yurkov N.K. Increasing the precision of approximation models. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability & Quality of Complex Systems], 2016, no. 2, pp. 59–66. (In Russ.).
- [13] Maslovskaya A.G. *Approksimatsiya funktsiy v zadachakh obrabotki eksperimental'nykh dannykh* [Function approximation in problems of experimental data processing]. Amurskiy gos. un-t Publ., 2021. 51 p. (In Russ.).
- [14] Zarubin V.S., Krishchenko A.P., eds. *Metody optimizatsii* [Optimization methods]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2001. 440 p. (In Russ.).
- [15] Pontryagin L.S., Boltyanskiy V.G., Gamkrelidze R.V. et al. *Matematicheskaya teoriya optimalnykh protsessov* [Mathematical theory of optimum processes]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 392 p. (In Russ.).
- [16] Lin Y.J., Agrawal A., Fang Y. Wear progressions and tool life enhancement with AlCrN coated inserts in high-speed dry and wet steel lathing. *Wear*, 2008, no. 264, no. 3–4, pp. 226–234, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.03.007>
- [17] Khrais S.K., Lin Y.J. Wear mechanisms and tool performance of TiAlN PVD coated inserts during machining of AISI 4140 steel. *Wear*, 2007, no. 262, no. 1–2, pp. 64–69, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.052>
- [18] Park K.H., Kwon P.Y. Flank wear of multi-layer coated tool. *Wear*, 2011, vol. 270, no. 11–12, pp. 771–780, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.030>

Информация об авторе

ГРУБЫЙ Сергей Витальевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: grusv_16@bmstu.ru).

Information about the author

GRUBYI Sergei Vitalievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Tools and Tooling Technology Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: grusv_16@bmstu.ru).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Грубый С.В. Оптимизация режимных параметров точения с использованием степенных и полиномиальных уравнений. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 10, с. 44–56, doi: 10.18698/0536-1044-2023-10-44-56

Please cite this article in English as:

Grubyi S.V. Optimization of the turning operating conditions using exponential and polynomial equations. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 10, pp. 44–56, doi: 10.18698/0536-1044-2023-10-44-56



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям сборник тезисов

«XLVII Академические чтения по космонавтике 2023»

В 4-х томах

В сборнике размещены материалы исследований актуальных проблем, относящихся к таким тематическим направлениям современной отечественной космонавтики, как научное наследие пионеров освоения космического пространства и конструкторские школы ракетно-космической техники; фундаментальные проблемы космонавтики и состояние развития отдельных ее направлений; место космонавтики в решении вопросов социально-экономического и стратегического развития современного общества; гуманитарные аспекты космонавтики; исследования по истории космической науки и техники. Перечисленные направления являются основой для формирования тематики секций по отдельным проблемам современной космонавтики.

Материалы представлены в форме тезисов докладов по тематике, являющейся предметом обсуждений в работе двадцати двух секций по соответствующим направлениям.

В первый том вошли материалы секций 1–5, 7, 8, во второй том — материалы секций 9–13, в третий том — материалы секций 14, 15, 17–19, в четвертый том — материалы секций 20–22.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>