

УДК 621.9

## **Влияние величины припуска поковок на энергоемкость механической обработки**

Малькова Л. Д.<sup>1,\*</sup>

\* [ludmma@yandex.ru](mailto:ludmma@yandex.ru)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

Целью работы является разработка и анализ возможных мероприятий по энергосбережению при механической обработке поковок на основе анализа влияния припуска под обработку и его рассеивания. Исследования энергопотребления проводились для токарной обработки цилиндрической поверхности на поковках детали автомобильного производства. Для оценки рассеивания величины припуска контролировался радиальный размер. Величина выборки составила 600 значений. В результате аналитического расчета рекомендуемого диапазона припусков, установлено, что ему удовлетворяет 77% контролируемых точек. Проведенные расчеты энергопотребления показали, что исключение значений припусков, превышающих рекомендуемый расчетный диапазон, сокращает энергопотребление на 6%, а затраты электроэнергии на обработку замеренных поковок на 80% превышают минимально возможные.

**Ключевые слова:** энергопотребление, энергоемкость, механическая обработка, точение

---

### **Введение**

Современные тенденции развития технологий предполагают внедрение наиболее эффективных средств, направленных на повышение основных показателей производства, среди которых его энергоемкость. Актуальность проблемы энергосбережения и энергетической эффективности определена действующим Федеральным законом и комплектом Государственных стандартов России.

Согласно ГОСТ Р 51387-99, полная энергоемкость продукции - величина расхода энергии и (или) топлива на изготовление продукции, включая расход на добычу, транспортирование, переработку полезных ископаемых и производство сырья, материалов, деталей с учетом коэффициента использования сырья и материалов. Анализ литературных источников показывает, что задача сокращения энергоемкости решается авторами по двум принципиальным направлениям: организационно-экономическому и технологическому. Причем исследования представляют собой решения локальных задач, дающие определенный эффект и входящие в большую многоплановую систему энергосбережения. В технологическом направлении в области механообработки оптимизационные приемы могут быть применены ко всем составляющим

технологического комплекса: оборудованию, инструменту, заготовке, режимам эксплуатации.

В частности, большой структурированный подход к ресурсосбережению представлен в [1], где автор, перечисляя этапы подготовки производства, указывает выбор заготовки в технологической части. Но подходит к этому вопросу с точки зрения разработки норм потребления материалов и энергии и сравнения вариантов заготовок, не рассматривая их качественные характеристики.

Непосредственно повышение эффективности обработки резанием рассматривается в работах [2,3] путем ввода интегральной характеристики эффективности процесса резания в виде безразмерного энергетического показателя. Похожий подход с введением универсального коэффициента, основанного на энергоэффективной скорости резания, рассмотрен в [4]. Следует отметить, такой обобщенный подход не учитывает наличие изменяющихся характеристик заготовки.

Переменная толщина срезаемого припуска подробно рассмотрена в работах [5,6]. Принципиальным отличием подхода в указанных работах к этому вопросу является то, что снимаемый слой не является результатом случайных процессов, и решение задачи с криволинейной режущей кромкой позволяет заведомо точно математически его описать.

Представленная работа рассматривает возможные мероприятия по энергосбережению непосредственно при механической обработке, принимая, что объектом деятельности по энергосбережению, согласно ГОСТ Р 51541-99, может быть технологический процесс.

Целью работы является разработка и анализ возможных мероприятий по энергосбережению при механической обработке поковок на основе анализа влияния припуска под обработку и его рассеивания.

## 1. Экспериментальные и статистические исследования

Глубина резания  $t$  относится к параметрам обработки, влияние которых на результирующую силу резания и, как следствие, на энергоемкость механической обработки значительно, т.е. превышает 10% [7]. Рассматривая указанные параметры как переменные в функциональной зависимости энергопотребления, можно разделить их на три вида, определяющие характер влияния на целевую функцию:

- параметр является постоянным и не зависит от случайных факторов (подача  $S_0$ , скорость резания  $v$ , передний угол  $\gamma$ );
- параметр является переменным, изменяющимся по определенному закону (износ по задней поверхности  $h_3$ );
- параметр является случайным, имеющим рассеивание (твердость заготовки  $HB$ ).

Глубина резания  $t$  при различных условиях обработки может быть отнесена ко всем трем видам в зависимости от стабильности геометрических и физико-механических параметров заготовки. Наиболее сложный из них это механическая обработка поковок, при которой величина припуска есть результат работы заготовительного производства.

Исследования энергопотребления проводились для токарной обработки цилиндрической поверхности длиной 144 мм и диаметром  $\varnothing 33_{-0,5}^{+1,5}$  (окончательный размер

Ø28,4Н9 мм, шероховатостью  $R_a(0,32)$ ) на поковках детали "винт рулевого управления", изготавливаемый из стали 60ПП. Для оценки рассеивания величины припуска контролировался радиальный размер на указанной цилиндрической поверхности в пяти сечениях, находящихся на расстоянии 31 мм друг от друга и 10 мм от окончания поверхности. Заготовка устанавливалась в центрах. Измерения проводились с помощью индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм. Настройка индикатора на нулевую отметку осуществлялась по эталонному образцу диаметром Ø30. В каждом из сечений замерялось 6 точек по окружности. Количество исследуемых деталей составило 20 штук. Величина выборки замеров в контрольных точках составила  $n = 600$ . Результаты измерений представлены в виде гистограммы на рисунке 1. Массив разбит на интервалы в соответствии с рекомендациями [8].

Для дальнейшей обработки данных полученная выборка была проверена на принадлежность нормальному закону распределения по критериям среднего абсолютного отклонения, Пирсона, Колмогорова-Смирнова и асимметрии и эксцесса [8]. Принято предположение, что распределение 600 измерений отражает характер распределения припуска по всей поверхности. Полученные статистические характеристики распределения указывают на однородность выборки и имеют следующие значения:

- среднее значение  $z_{cp} = 1,63$  мм;
- дисперсия  $\sigma^2 = 0,077$ ;
- среднеквадратическое отклонение  $\sigma = 0,278$ ;
- коэффициент вариации  $V = 0,170$ .

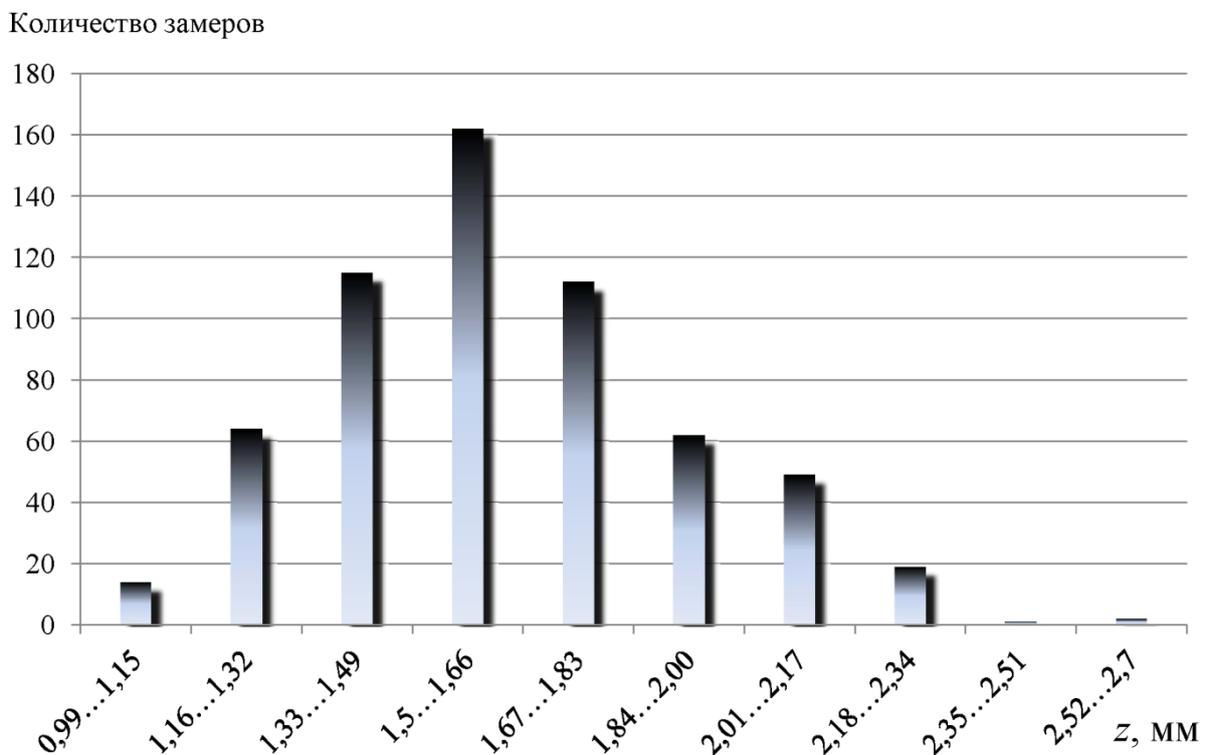


Рисунок 1. Гистограмма распределения величины припуска на поковках

## 2. Расчет энергопотребления при токарной обработке цилиндрической поверхности

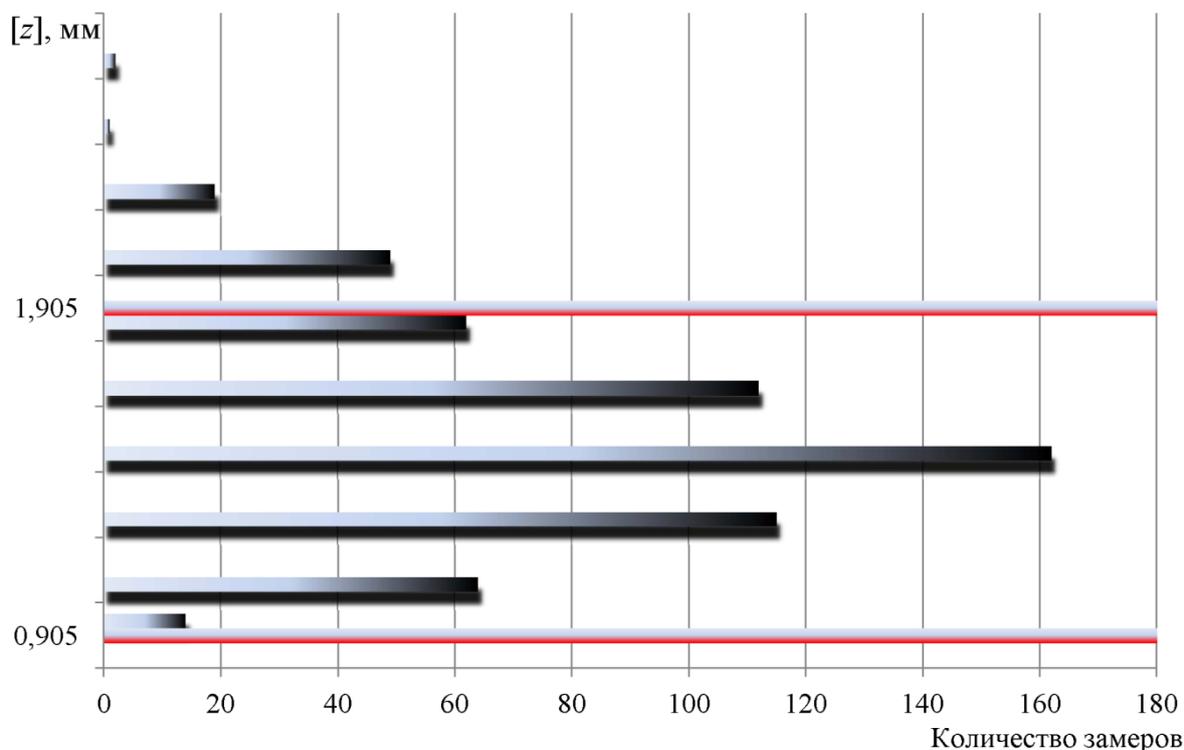
Для анализа результатов экспериментов был рассчитан диапазон припусков, назначаемых на данную деталь по методике, предложенной в [9], с использованием формулы:

$$2z_{i\min} = 2 \left[ (R_z + h)_{i-1} + \sqrt{\Delta_{\Sigma_{i-1}}^2 + \varepsilon_i^2} \right],$$

где  $2z_{i\min}$  - минимальный двусторонний припуск,  $R_{z_{i-1}}$  - высота неровностей профиля на предшествующем переходе,  $h_{i-1}$  - глубина дефектного поверхностного слоя на предшествующем переходе,  $\Delta_{\Sigma_{i-1}}$  - суммарные отклонения расположения и формы поверхности,  $\varepsilon_i$  - погрешность установки заготовки на выполняемом переходе.

В расчетах принято, что для получения диаметра 28,4Н9 используется черновое и чистовое точение и шлифование. Минимальный расчетный припуск на черновую токарную обработку  $2z_{\min}$  составил 1,81 мм, соответственно припуск на сторону  $z_{\min} = 0,905$  мм, максимальный расчетный припуск  $2z_{\max} = 3,81$  мм (припуск на сторону  $z_{\max} = 1,905$  мм).

В результате анализа проведенных контрольных замеров установлено, что 77% контролируемых точек лежат в расчетном диапазоне величин припуска (рис. 2). Причем точки не выходят за границу диапазона в меньшую сторону, что говорит об отсутствии неисправимого брака; но выходят в большую сторону, что потребует дополнительных затрат при выполнении заданной поверхности, в том числе, затрат электроэнергии.



**Рисунок 2.** Гистограмма распределения величины припуска на поковках по отношению к рекомендуемому расчетному припуску

Расчет энергопотребления для сравнительного анализа при переменной глубине резания  $t = var$  проведен при следующих исходных данных на основе рекомендованных заводских режимов:  $v = 90$  м/мин,  $S_0 = 0,3$  мм/об, НВ 200; резец токарный с СМП Т15К6; обрабатываемая поверхность диаметром  $d = 30$  мм, длиной  $l = 144$  мм. Поскольку коэффициент вариации нормального распределения припуска является удовлетворительным, следовательно, совокупность однородная и среднее значение является надежной характеристикой совокупности. Поэтому при расчете энергопотребления для обработки замеренных поковок глубина резания  $t$  принята равной среднему значению припуска  $z_{cp}$ .

Энергопотребление определялось по формуле:

$$E = \frac{N_э \cdot t_0}{60},$$

где  $E$  – энергопотребление, кВт·ч;  $N_э$  – эффективная мощность резания, кВт,  $t_0$  – основное технологическое время, мин. В свою очередь:

$$N_э = \frac{P_z \cdot v}{60000}, \quad t_0 = \frac{l \cdot d \cdot \pi}{1000 \cdot S_0 \cdot v},$$

где  $P_z$  – тангенциальная составляющая силы резания, Н, определенная по методике, предложенной в [9], являющаяся величиной, зависимой от глубины резания  $t$ .

Из представленных формул видно, что энергопотребление  $E$  является функцией случайной переменной глубины резания  $t$ , и, как следствие, случайной величиной, имеющей рассеивание. Это усложняет прогнозирование расхода электроэнергии на механическую обработку заданной поверхности. Следует отметить, что согласно [9],  $P_z$  линейно зависит от глубины резания, следовательно, энергопотребление  $E$  также подчиняется нормальному закону распределения [10].

Для сравнительного анализа проведено три расчета:

1. Расчет энергопотребления для обработки всей выборки поковок при среднем значении припуска (глубины резания)  $z_{cp} = t = 1,63$  мм.

2. Расчет энергопотребления для обработки поковок, чьи припуски входят в рекомендуемый расчетный диапазон припуска. В этом случае энергопотребление считалось как сумма затрат электроэнергии на обработку всех элементарных участков, каждый из которых имеет длину  $l / 30$  (т.к. на каждой поковке проведено 30 замеров), при различной глубине резания.

3. Расчет энергопотребления для обработки всей выборки поковок при минимальном значении припуска (глубине резания)  $z_{min} = t = 0,905$  мм.

Все результаты расчета приведены к одной поверхности и представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Результаты расчета энергопотребления при различных условиях задания припуска

№ п/п	Условия задания припуска	Глубина резания $t$ , мм	Энергопотребление $E$ , кВт·ч, приведенное к одной поверхности
1	Обработка замеренных поковок	1,63	0,01178
2	Обработка поковок, чьи припуски входят в рекомендуемый расчетный диапазон	<i>var</i>	0,01111
3	Обработка поковок с минимально допустимым значением припуска	0,905	0,00654

Поскольку общий экономический эффект зависит от объема производства, сравнительный анализ проведен в процентном отношении.

Установлено, что исключение значений припусков, превышающих рекомендуемый расчетный диапазон, позволяет уменьшить энергопотребление как минимум на 6%, а в целом затраты электроэнергии на обработку замеренных поковок на 80% превышают минимально возможные.

Проведенные исследования показали, что ужесточение технологических требований к размерам поковок позволит значительно снизить энергоемкость операций предварительной механической обработки и обеспечит возможность более точного прогнозирования энергозатрат.

### **Выводы**

1. Значения величины припуска на поковках имеет рассеивание, которое подчиняется закону нормального распределения.

2. Энергопотребление  $E$  является функцией случайной переменной глубины резания  $t$ , и, как следствие, случайной величиной, имеющей рассеивание. Повышение точности прогнозирования расхода электроэнергии на механическую обработку заданной поверхности требует сужения диапазона рассеивания припуска.

3. Исключение значений припусков, превышающих рекомендуемый расчетный диапазон, позволяет уменьшить энергопотребление как минимум на 6%, а в целом затраты электроэнергии на обработку замеренных поковок на 80% превышают минимально возможные.

### **Список литературы**

1. Касимов Л.Н. Ресурсосберегающие технологии механической обработки труднообрабатываемых материалов: монография. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2003. 182 с.
2. Карпов А.В. К вопросу управления процессом резания на основе энергетических закономерностей деформации и разрушения твёрдых тел // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. 2011. № 1 (8). С. 37-49.

3. Карпов А.В., Соколик Н.Л., Соколик А.И. К вопросу снижения энергозатрат при обработке заготовок лезвийными инструментами // Новые материалы и технологии в машиностроении: сб. науч. тр. Вып. 2. Брянск: БГИТА, 2003. С. 48-51.
4. Адаменко В.М., Мрочек Ж.А. Энергоэффективность процесса резания поверхностей заготовок деталей на основе анализа энергопотребляющих показателей технологического оборудования // Наука и техника. 2012. № 4. С. 3-6.
5. Мелкерис Т. В., Виноградов Д. В. Определение силы резания для криволинейного сечения срезаемого слоя // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 12. С. 124-135. DOI: [10.7463/1214.0745856](https://doi.org/10.7463/1214.0745856)
6. Потапова М.С., Виноградов Д.В. Обзор фрез с криволинейной режущей кромкой // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 11. С. 21-33. DOI: [10.7463/1114.0740472](https://doi.org/10.7463/1114.0740472)
7. Древаль А.Е., Малькова Л.Д. Совместное влияние параметров механической обработки на величину составляющих силы резания // Известия ВУЗов. Сер. Машиностроение. 2007. № 8. С. 53-61.
8. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: учеб. пособие для втузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1988. 239 с.
9. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1985. 656 с.
10. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учеб. пособие для втузов. 2-е изд., стер. М.: Высшая школа, 2000. 383 с.

## Effect of Forging Allowance Value on the Power Consumption of Machining Process

L.D. Mal'kova<sup>1,\*</sup>

[\\*ludmma@yandex.ru](mailto:ludmma@yandex.ru)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** energy consumption, machining, turning

---

The paper aim is to develop and study possible energy-efficiency measures for machined forgings drawing on analysis of the impact of the allowance for machining and its scatter.

The most sophisticated option to take into consideration the effect of the cut depth is the work-piece machining in which the forging allowance value results from the blank production.

Research of power consumption was conducted for turning the cylindrical surface of 144 mm length and  $\varnothing 33_{-0,5}^{+1,5}$  diameter on forgings of the work-pieces "screw of steering control" made from steel 60PP. A radial dimension allowance at said cylindrical surface at six points of the five sections was sized to assess the allowance value dispersion. The size of the sample measurements at the control points was  $n = 600$ . Statistic processing has shown normal law of distribution and sample homogeneity.

To analyze the results of experiments was calculated a range of allowances for this work-piece. Calculated minimum and maximum allowance per one side for rough lathing were, respectively, 0.905 mm and 1.905mm. It was found that 77% points under control lie in calculated range of allowance values. And there are no points out of the range on lesser side that proves a lack of rejects; but there are points out of the range on the bigger side, that will require additional costs for machining the specified surface, including the cost of electricity.

There were three power consumption calculations based on factory- recommended duty: for processing the entire sample of forgings with an average allowance, for machining forgings allowances of which are within the recommended design range of allowance, and for processing the entire sample of forgings with a minimum value of allowance.

It was found that elimination of allowance values which are outside the recommended range enables to reduce the power consumption, at least, by 6%, and the overall power consumption for processing the measured forgings exceeds the minimum possible one by 80%.

## References

1. Kasimov L.N. *Resursosberegayushchie tekhnologii mekhanicheskoi obrabotki trudnoobrabatyvaemykh materialov* [Resource-saving technologies of machining of hard-to-machine materials]. Ufa, DizainPoligrafServis Publ., 2003. 182 p. (in Russian).
2. Karpov A.V. To the question of management of cutting process on the basis of power laws of deformation and destruction of solid materials. *Mashinostroenie i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = Engineering industry and life safety*, 2011, no. 1, pp. 37-49. (in Russian).
3. Karpov A.V., Sokolik N.L., Sokolik A.I. On question of reducing energy consumption during the machining of workpieces with blade tools. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii: sb. nauch. tr. Vyp. 2* [New materials and technologies in mechanical engineering: collection of scientific papers. Iss. 2]. Bryansk, BGITA Publ., 2003, pp. 48-51. (in Russian).
4. Adamenko V., Mrochek Zh. Energy Efficiency in Cutting Process of Component Billet Surface on Analysis Basis for Energy-Consumption Indices of Technological Equipment. *Nauka i tekhnika = Science and Technique*, 2012, no. 4, pp. 3-6. (in Russian).
5. Melceris T.V., Vinogradov D.V. Determining a Cutting Force for Curved Section of Cutting Layer. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 12, pp. 124-135. DOI: [10.7463/1214.0745856](https://doi.org/10.7463/1214.0745856) (in Russian).
6. Potapova M.S., Vinogradov D.V. Overview of Curved Cutting Edge Mills. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 11, pp. 21-33. DOI: [10.7463/1114.0740472](https://doi.org/10.7463/1114.0740472) (in Russian).
7. Dreval' A.E., Mal'kova L.D. Mutual influence of parameters of machining on the value of the principal cutting force. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2007, no. 8, pp. 53-61. (in Russian).
8. L'vovskiy E.N. *Statisticheskie metody postroeniya empiricheskikh formul* [Statistical methods of constructing of empirical formulas]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 239 p. (in Russian).
9. Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K., eds. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya. V 2 t. T. 1* [Handbook of technologist-mechanician. In 2 vols. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 656 p. (in Russian).
10. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya sluchaynykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya* [Theory of random processes and its engineering applications]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 383 p. (in Russian).