

УДК 630*4

UDC 630*4

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ
КОМБИНИРОВАННОЙ МАШИНЫ ДЛЯ
ТУШЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА
ОСНОВЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**OPTIMIZATION OF THE COMBINED
MACHINE FOR FOREST FIRES SUPPRESSION
PARAMETERS ON THE BASIS OF
THEORETICAL AND EXPERIMENTAL
RESEARCHES**

Бухтояров Леонид Дмитриевич
к.т.н., доцент

Bukhtoyarov Leonid Dmitriyevich
Cand.Tech.Sci., associate professor

Гнусов Максим Александрович
аспирант

Gnusov Maksim Aleksandrovich
postgraduate student

Шавков Михаил Викторович
аспирант
*Воронежская государственная лесотехническая
академия, Воронеж, Россия*

Shavkov Mikhail Victorovich
postgraduate student
Voronezh State Forestry Academy, Voronezh, Russia

Лепилин Дмитрий Владимирович
к.т.н., доцент
*Санкт-Петербургский государственный
лесотехнический университет, Санкт-Петербург,
Россия*

Lepilin Dmitriy Vladimirovich
Cand.Tech.Sci., associate professor
*St. Petersburg State Forest Technical University, St.
Petersburg, Russia*

Есков Дмитрий Владимирович
к.т.н., доцент
*Саратовский государственный аграрный
университет, Саратов, Россия*

Eskov Dmitry Vladimirovich
Cand.Tech.Sci., associate professor
Saratov State Agrarian University, Saratov, Russia

Подъяблонский Алексей Валерьевич
ассистент
*Рязанский государственный агротехнологический
университет, Рязань, Россия*

Podjyablonsky Aleksey Valeryevich
assistant
*Ryazan State Agrotechnological University, Ryazan,
Russia*

Описана методика моделирования процесса работы
грунтомета. Представлены результаты
оптимизации параметров комбинированной
машины для тушения лесных пожаров

The technique of the modeling of the process of a soil-
thrower work is described. The results of the
optimization of the parameters of the combined
machine for forest fires suppression are presented

Ключевые слова: ЛЕСНОЙ ПОЖАР,
ГРУНТОМЕТ, ГРУНТ, ЭКСПЕРИМЕНТ,
ОПТИМИЗАЦИЯ, ПАРАМЕТРЫ

Keywords: FOREST FIRE, SOIL-THROWER, SOIL,
EXPERIMENT, OPTIMIZATION, PARAMETERS

Введение. С целью моделирования процесса метания грунта комбинированной машиной для тушения лесных пожаров и дальнейшей оптимизации ее конструктивных и технологических параметров разработана математическая модель процесса подачи и выброса грунта рабочими органами грунтомета.

Постановка и решение задачи. Разработанная методика моделирования позволяет исследовать влияние большого количества

параметров машины для тушения лесных пожаров и условий ее работы на показатели ее эффективности. Оптимальной является двухэтапная стратегия теоретического исследования: на первом этапе необходимо изучить влияние отдельных параметров (факторов), на втором этапе, называемом оптимизацией, – влияние совокупности двух-трех наиболее важных параметров [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Процесс работы машины для тушения лесных пожаров является сложным и многофакторным. Схематично взаимосвязь входных параметров (факторов) и выходных характеристик математической модели (критериев) можно представить следующим образом (рисунок 1).

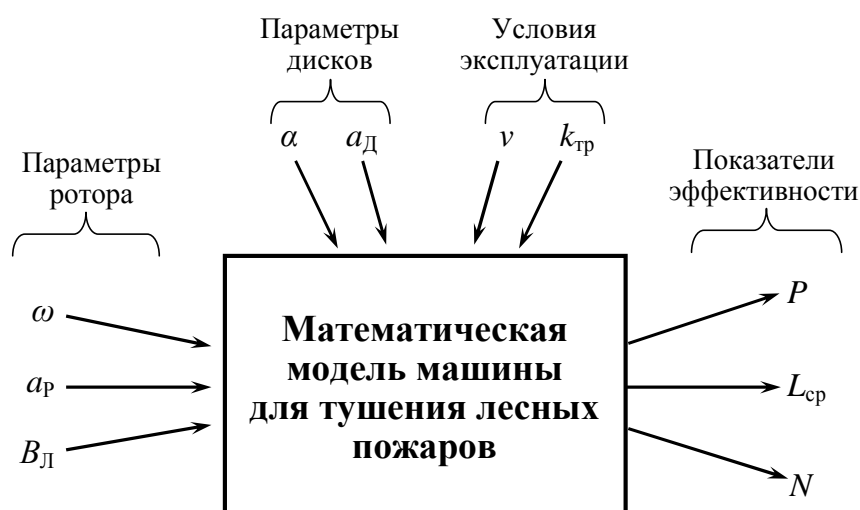


Рисунок 1 – Входные и выходные параметры математической модели

На схеме выделены четыре группы переменных, относящихся к модели [1]. К первой группе "Параметры ротора" относятся конструктивные и технологические параметры ротора. Из большого количества возможных параметров наибольший интерес представляют три параметра, оказывающие наиболее существенное влияние на эффективность процесса грунтометания:

ω – частота вращения ротора;

a_p – величина заглубления ротора в почву;

B_l – ширина лопатки ротора.

Ко второй группе "Параметры дисков" относятся два геометрических параметра дисков:

α – угол атаки дисков по отношению к поступательному направлению;

a_d – величина заглубления дисков в почву.

В процессе теоретического исследования необходимо найти оптимальные значения параметров ω , a_p , B_l , α , a_d .

К третьей группе "Условия эксплуатации" относятся такие параметры, как:

v – скорость поступательного движения машины для тушения лесных пожаров;

$k_{тр}$ – сила вязкого трения между элементом почвы и рабочей поверхностью машины.

К четвертой группе "Показатели эффективности" относятся характеристики процесса грунтометания, подлежащие измерению в ходе экспериментальных исследований. Обычно в качестве выходных факторов принимают величины, характеризующие производительность, качество работы и экономические затраты [4]. В соответствии с этим выбраны три выходных параметра:

P – производительность машины для тушения лесных пожаров (масса грунта, выброшенного за пределы машины, в единицу времени);

$L_{ср}$ – средняя дальность метания грунта;

N – средняя мощность, потребляемая машиной.

В процессе дальнейшего теоретического исследования необходимо определить такие диапазоны параметров машины, при которых показатели эффективности будут как можно лучше, то есть, P и $L_{ср}$ как можно больше, а N – как можно меньше. Кроме того, необходимо добиться, чтобы

эффективность машины как можно слабее зависела от условий эксплуатации. Таким образом, в полной постановке задача на теоретическое исследование выглядит следующим образом [5]

$$\left\{ \begin{array}{l} P(\omega, a_p, B_{\text{л}}, \alpha, a_{\text{д}}, v) \rightarrow \max; \\ L_{\text{ср}}(\omega, a_p, B_{\text{л}}, \alpha, a_{\text{д}}, v) \rightarrow \max; \\ N(\omega, a_p, B_{\text{л}}, \alpha, a_{\text{д}}, v) \rightarrow \min; \\ \left\{ \begin{array}{l} P \rightarrow \text{const}(k_{\text{мп}}); \\ L_{\text{ср}} \rightarrow \text{const}(k_{\text{мп}}); \\ N \rightarrow \text{const}(k_{\text{мп}}). \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (1)$$

С математической точки зрения поиск тройного оптимума в 6-факторном пространстве с тремя условиями постоянства является чрезвычайно сложной задачей. Поэтому первым этапом теоретического исследования является исследование влияния отдельных факторов. В рамках такой стратегии будем изменять по одному параметру, фиксируя все остальные параметры на наиболее естественных (базовых) значениях, и анализировать соответствующую зависимость. В качестве базовых выбраны следующие значения параметров: $\omega = 8$ об/с; $a_p = 15$ см; $B_{\text{л}} = 15$ см; $\alpha = 20^\circ$; $a_{\text{д}} = 15$ см; $v = 1,5$ м/с; $k_{\text{тр}} = 6$ Н·с/м.

В процессе теоретических исследований процесса грунтометания лесопожарной комбинированной машиной было изучено влияние отдельных параметров F_i (называемых факторами оптимизации) машины для тушения лесных пожаров на основные показатели эффективности (называемых критериями оптимизации). В частности, получены серии графиков $P(F_i)$, $L_{\text{ср}}(F_i)$ и $N(F_i)$. Однако однофакторные зависимости позволяют лишь оценить влияние каждого из факторов, но не дают информации об одновременном влиянии на критерий двух или большего количества факторов. Поэтому следующим закономерным этапом исследования является получение и анализ двухфакторных зависимостей вида $K(F_i, F_j)$ [1].

Оптимизация сложных систем в общем случае сводится к задаче отыскания экстремума функции нескольких переменных. В ходе решения задачи оптимизации необходимо определить такие области изменения входных параметров F_i , при которых выходные характеристики машины удовлетворяют некоторому принятому критерию, либо нескольким частным критериям [2]. В качестве критериев оптимизации обычно выступают показатели производительности, качества и экономических затрат [3, 4, 5].

Так как основная новизна предлагаемой машины связана с ротором, оптимизация выполнена для таких параметров ротора, как:

- частота вращения ротора ω ;
- заглубление ротора в почву a_p .

Эти параметры влияют на эффективность машины существенно и нетривиальным образом. Изучение их влияния в комплексе позволит найти оптимальные области, непрогнозируемые заранее, и сформулировать рекомендации по выбору соответствующих конструктивных параметров.

В ходе оптимизации производился поиск такого набора параметров (ω, a_p) , при которых являлись оптимальными следующие критерии:

- производительность машины P ;
- среднее расстояние выброса грунта L_{cp} ;
- средняя мощность, потребляемая машиной N .

В ходе оптимизации необходимо, чтобы производительность машины P была как можно большей, расстояние выброса грунта L_{cp} – как можно большим, а потребляемая мощность N была как можно меньшей. Поэтому задачу оптимизации можно записать аналитически следующим образом

$$\begin{cases} P(\omega, a_p) \rightarrow \max; \\ L_{cp}(\omega, a_p) \rightarrow \max; \\ N(\omega, a_p) \rightarrow \min. \end{cases} \quad (2)$$

Для установления взаимосвязи между параметрами ротора и показателями эффективности машины для тушения лесных пожаров

проведена серия из девяти экспериментов ($3 \times 3 = 9$), в которых фактор ω варьировали на уровнях 5,0, 7,5, 10,0 об/с, одновременно варьируя фактор a_p на уровнях 10, 15, 20 см (таблица 1).

Таблица 1 – Показатели эффективности машины для тушения лесных пожаров в зависимости от факторов ω и a_p

№ п/п	ω , об/с	a_p , см	P , кг/с	L_{cp} , м	N , кВт
1	5,0	10	24,4	3,8	2,7
2	5,0	15	43,7	3,0	5,1
3	5,0	20	77,9	2,3	8,9
4	7,5	10	18,1	13,5	3,6
5	7,5	15	49,7	9,9	9,0
6	7,5	20	94,0	5,5	16,0
7	10,0	10	15,6	4,3	3,2
8	10,0	15	35,3	9,1	8,7
9	10,0	20	68,5	9,9	16,6

Большую ценность представляли бы аналитические формулы, по которым можно рассчитать показатели эффективности P , L_{cp} , N по заданным параметрам ротора ω и a_p . Аналитические зависимости представим в виде полиномов второго порядка

$$P(\omega, a_p) = k_2 a_p^2 + k_2 \omega^2 + k_3 a_p \cdot \omega + k_4 a_p + k_5 \omega + k_6, \quad (3)$$

где P – рассчитываемый показатель (вместо производительности P может быть L_{cp} или N); $k_1...k_6$ – коэффициенты многочлена [6].

Для определения коэффициентов зависимостей $P(\omega, a_p)$ использована аппроксимация методом наименьших квадратов [7, 8]. Метод заключается в решении обратной задачи для определения таких коэффициентов $k_1...k_6$, при которых суммарное квадратичное отклонение

аналитической зависимости от экспериментальных данных будет минимальным

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{Д}}} \left(P_{\text{аналит.}}(\omega^i, a_P^i) - P_{\text{табл.}}^i(\omega^i, a_P^i) \right)^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

где i – номер компьютерного эксперимента; $N_{\text{Э}}$ – общее количество компьютерных экспериментов; $P_{\text{аналит.}}$ – аналитическая зависимость показателя P от факторов; $P_{\text{табл.}}$ – табличные значения показателя P для i -го компьютерного эксперимента.

Аппроксимация методом наименьших квадратов произведена с использованием математического пакета MathCAD 14. В результате аппроксимации получены следующие формулы

$$P(\omega, a_P) = -1,552 a_P^2 + 0,274 \omega^2 - 0,012 a_P \cdot \omega + 21,687 a_P - 2,053 \omega - 55,48; \quad (5)$$

$$L_{\text{ср}}(\omega, a_P) = -0,677 a_P^2 - 0,031 \omega^2 + 0,142 a_P \cdot \omega + 8,977 a_P - 0,255 \omega - 24,17; \quad (6)$$

$$N(\omega, a_P) = -0,320 a_P^2 + 0,036 \omega^2 + 0,144 a_P \cdot \omega + 3,427 a_P - 1,093 \omega - 6,67, \quad (7)$$

где P – производительность, кг/с; $L_{\text{ср}}$ – расстояние выброса, м; N – потребляемая мощность кВт.

Для оценки значимости коэффициентов полиномов использовали критерий Фишера [9]. Полученные аналитические формулы $P(\omega, a_P)$, $L_{\text{ср}}(\omega, a_P)$ и $N(\omega, a_P)$ могут быть использованы при конструировании машины для тушения лесных пожаров для оценки показателей эффективности.

При двухфакторной оптимизации появляется возможность графически изобразить поверхности отклика и провести их визуальный анализ (рисунок 2) [2]. Анализируя каждую из поверхностей отклика, представленную с помощью линий уровня (рисунок 3), можно условно разделить факторное пространство на две области: благоприятную (такие области затемнены на рисунке), в которой критерий оптимизации

принимает искомые оптимальные значения, и неблагоприятную. Выбор границы между благоприятной и неблагоприятной областью производится экспертным путем. При этом целесообразно руководствоваться следующими правилами: благоприятная область должна содержать искомые максимальные или минимальные значения функции, занимать значительную долю факторного пространства (10–30 %), и по возможности не включать области резкого изменения функции [10, 11]. Руководствуясь данными соображениями, в качестве границ между благоприятной и неблагоприятной областями выбраны следующие изолинии: для функции $P(\omega, a_p)$ изолинию 50 кг/с; для $L_{cp}(\omega, a_p)$ изолинию 10 м; для $N(h_y, l_y)$ изолинию 10 кВт.

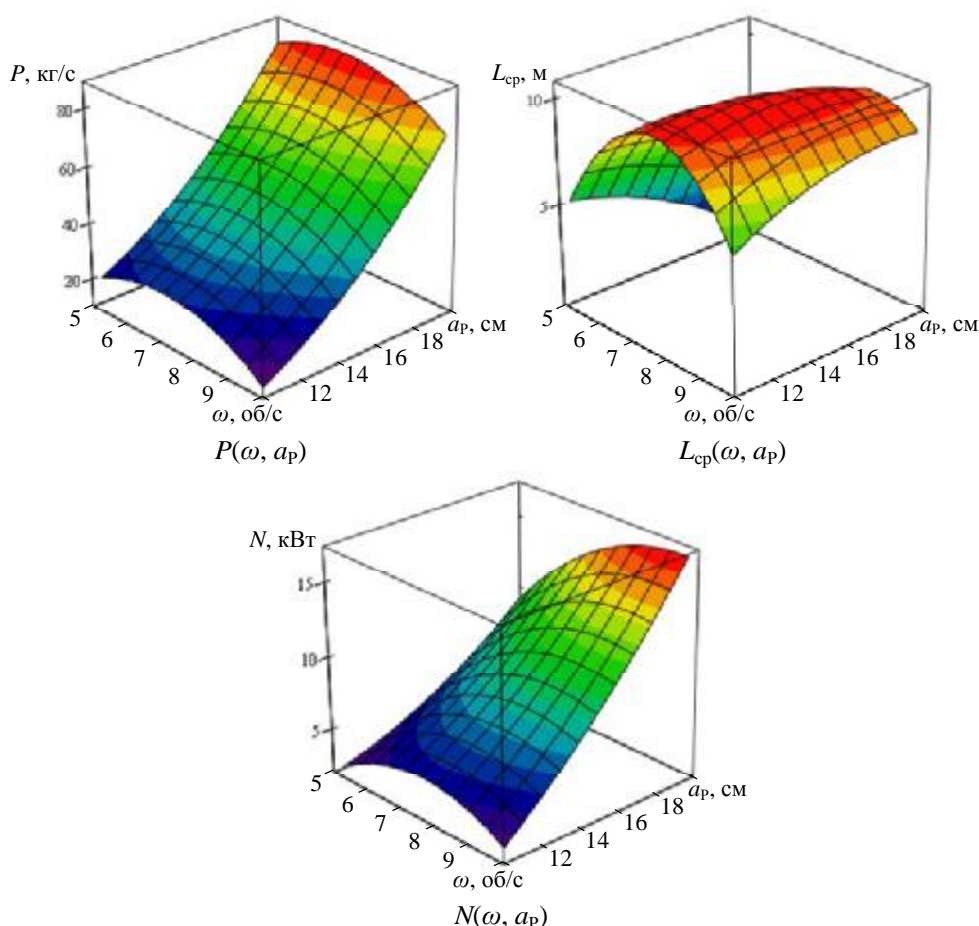


Рисунок 2 – Поверхности отклика к оптимизации параметров ротора машины для тушения лесных пожаров

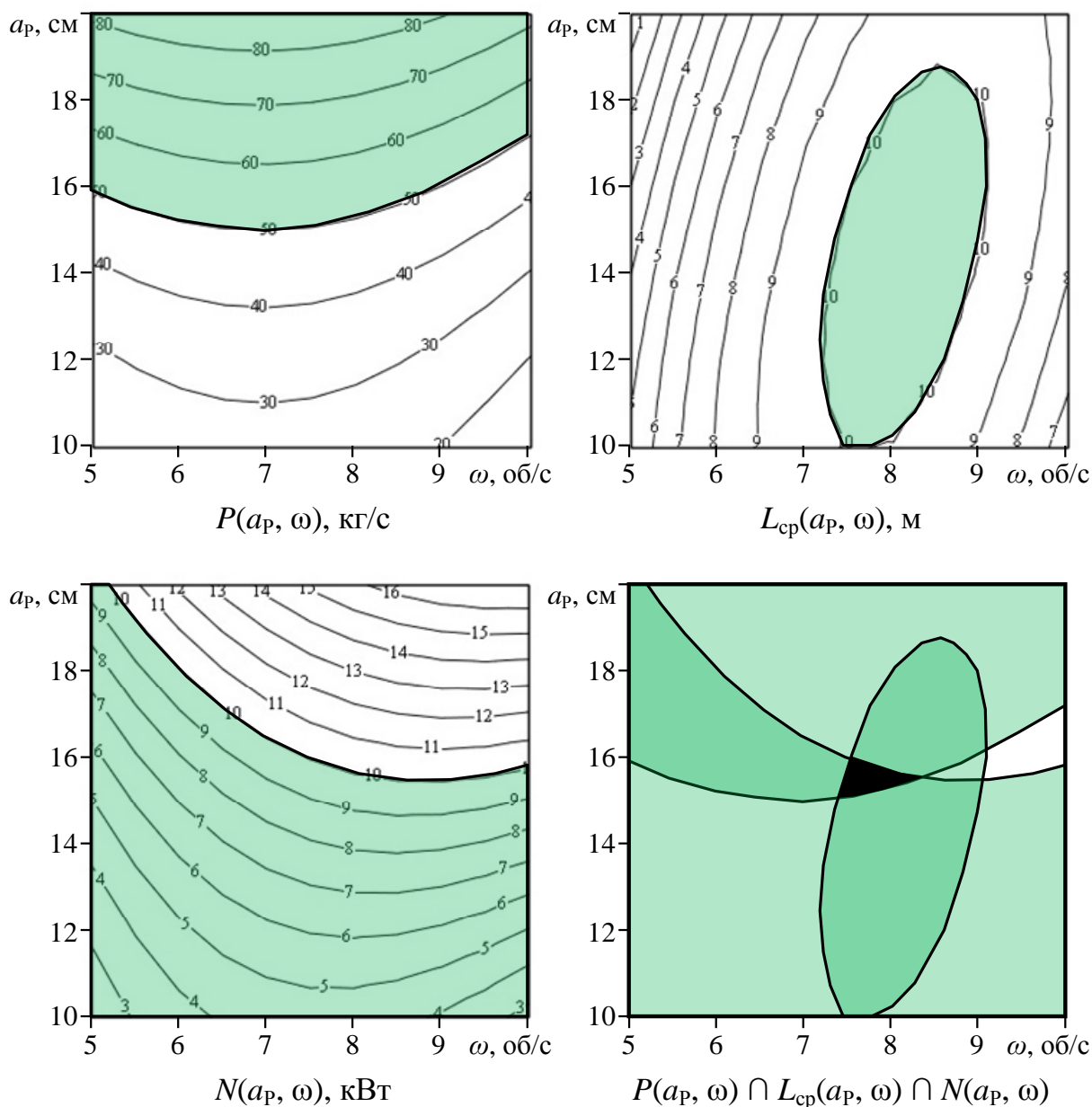


Рисунок 3 – Карты оптимизации (поверхности отклика, изображенные с помощью линий уровня) параметров ротора машины для тушения лесных пожаров. В факторном пространстве благоприятные области затемнены, а оптимальная область выделена черным цветом.

Выводы. Наложение благоприятных областей дает общую оптимальную область треугольной формы (рисунок 3, внизу справа). Оптимальной области соответствует диапазон частоты вращения ротора

7,5...8,0 об/с и диапазон величины заглубления 15...16 см.

Таким образом, на основе двухфакторной оптимизации сформулированы рекомендации по выбору параметров роторов машины. Частота вращения ротора должна составлять 7,5...8,0 об/с; величина заглубления 15...16 см. При этом машина обеспечивает производительность более 50 кг/с, дальность выброса более 10 м, потребляемую мощность менее 10 кВт.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по государственному соглашению № 14.В37.21.2095 в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы»

Список литературы

1. Мельников С.В., Алешкин В.Р., Рощин П.М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов: Учеб. Пособие. Л.: Колос, 1980. 168 с.
2. Дегтярев Ю.И. Методы оптимизации: Учеб. пособие для вузов. М.: Сов. радио, 1980. 272 с.
3. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений: Учеб. пособие. М.: Наука, 1976. 279 с.
4. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента. М.: ГРФМЛ изд-ва Наука, 1971. 312 с.
5. Финни Д. Введение в теорию планирования экспериментов: Пер. с англ. М.: ГРФМЛ изд-ва Наука, 1970. 287 с.
6. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: В 2-х кн. Кн. 2 / Пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1987. 351 с.
7. Королев Ю.Г. Метод наименьших квадратов в социально-экономических исследованиях. М.: Статистика, 1980. 112 с.
8. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М.: ГИФМЛ, 1958. 333 с.
9. Четыркин Е. Н. Статистические методы прогнозирования. М.: Статистика, 1975. 200 с.
10. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях: Учеб. пособие. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 288 с.
11. Адамов В.Е., Вергилес Э.В. Статистика промышленности: Учеб. пос. М.: Финансы и статистика, 2005. 326 с.