

### Библиографические ссылки

1. Ильин В. А. Интеллектуальные роботы: Теория и алгоритмы / Сиб. аэрокосмич. акад. Красноярск, 1995.
2. Лопатин П. К. Алгоритм управления динамическими системами в неизвестной статической среде // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2007. № 2. С. 9–13.
3. Сафиуллина Н. Ф. Управление манипуляционными роботами в неизвестной среде с использованием разделения областей: выпускная квалификационная работа на соискание степени магистра техники и технологий / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2008.
4. Baginski B. Motion Planning for Manipulators with Many Degrees of Freedom – The BB-Method [Electronic resource] : phys. dr dissertation / Munich Technical University, 1998. URL: [books.google.ru/books](http://books.google.ru/books).
5. Burns, B. Exploiting Structure: Guided Approach to Sampling-Based Robot Motion Planning [Electronic resource] : phys. dr dissertation / Graduate School of the University of Massachusetts. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/4209048/4209049/04209602.pdf>, 2007.
6. Chazelle B. Approximation and decomposition of shapes // Algorithmic and Geometric Aspects of Robotics / ed. J. T. Schwartz, C. K. Yap ; Lawrence Erlbaum Associates. Hillsdale, NJ, 1987. P. 145–185.
7. Chazelle B. Triangulating a simple polygon in linear time // Discrete Comput. Geom. 1991. № 6(5). P. 485–524.
8. Wavefront Method-Based Local-Path Planning for a Mobile Robot with a Vision System / J.-W. Kwon, D.-H. Yang, D. Chwa, S-K. Hong // SICE-ICASE Intern. Joint Conf. (18–21 Oct., 2006, Busan). Busan, 2006. P. 1250–1254.
9. Latombe J. C. Robot motion planning. Boston : Kluwer Academic Publishers, 1990.
10. LaValle S. M. Planning Algorithms [Electronic resource]. Cop. 1999–2006. URL: <http://msl.cs.uiuc.edu/planning>.
11. Lopatin P. K. Algorithm of a manipulator movement amidst unknown obstacles // Proc. of the 10th Intern. Conf. on Advanced Robotics (ICAR2001) (22–25th of August, 2001, Hungary). Hungary, 2001. P. 327–331.
12. Meikle S., Yates R., Harris A. Computer Vision Algorithms for Autonomous Mobile Robot Map Building and Path Planning // ITSC'97 : IEEE Conf. on Intelligent Transport. System (9–12 Nov. 1997, Boston). Boston, 1997. P. 99–109.
13. Principles of robot motion: theory, algorithms and implementation / H. Choset [et al.]. Cambr. dge : A Bradford book, 2005.
14. Zhang Y., Zhang L., Zhang X. Mobile Robot Path Planning base on the Hybrid Genetic Algorithm in Unknown Environment // ISDA'08 : VIII Intern. Conf. on Intelligent Systems Design and Applic. (26–28 Nov. 2008, Kaohsiung). Kaohsiung, 2008. P. 661–671.

N. F. Safiullina, P. K. Lopatin

### CELL DECOMPOSITION ALGORITHM FOR MANIPULATORS PATH PLANNING

*The authors use the well known approach to manipulators path planning in unknown environment, which is reduced to solution of final number path planning tasks in known environment. The new version of cell decomposition algorithm is applied to path planning in known environment in n-dimensional configuration space of generic coordinates. The results of the algorithms implementation are presented.*

*Keywords: manipulator, cell decomposition algorithm, path planning.*

© Сафиуллина Н. Ф., Лопатин П. К., 2012

УДК 621.89.-229.3

Л. В. Строк, В. С. Секацкий, Я. Ю. Пикалов, М. В. Брунгардт

### РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЗАМКНУТОГО ОСЕВОГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА С УЧЕТОМ ШЕРОХОВАТОСТИ ОПОРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

*Разработана математическая модель и проведены исследования влияния шероховатости опорных поверхностей на характеристики незамкнутого осевого гидростатического подшипника с дроссельной компенсацией расхода смазки. Показано влияние высоты и шага шероховатости на расходные и нагрузочные характеристики.*

*Ключевые слова: гидростатические подшипники, математическая модель, шероховатость опорных поверхностей.*

Качество конечного изделия зависит от качества проектирования, в частности, от точности и достоверности расчетов основных параметров изделия. Особенно это актуально при проектировании гидростати-

ческих опор (подшипников и направляющих). Традиционные методики расчета гидростатических опор основаны на использовании в качестве исходных параметров их номинальных значений. Однако откло-

нения этих параметров бывают соизмеримы с толщиной несущего слоя смазки, разделяющего опорные поверхности гидростатической опоры, и существенно влияют на выходные характеристики [1–3]. В работе [4] рассмотрено влияние круговой шероховатости поверхностей незамкнутого осевого гидростатического подшипника (ГСП) на характеристики слоя смазки. Данные результаты приемлемы для питания гидростатической опоры смазкой по схеме «насос-карман». Однако в большинстве случаев ГСП работают с дросселями постоянного сопротивления либо с регуляторами расхода смазки.

В данной работе на примере незамкнутого осевого ГСП с центральной несущей камерой при дроссельной компенсации расхода смазки (рис. 1) исследовано влияние круговой шероховатости опорной поверхности на характеристики подшипника. Входное сопротивление дросселя  $R_{др}$  при этом изначально рассчитывается по номинальным значениям параметров подшипника.

При нагнетании давления  $p_H$  в подшипник подвижная часть 2 поднимается на величину толщины несущего слоя  $h_0$ . Сопротивление дросселя  $R_{др}$  как правило рассчитывается исходя из условия  $P_{к0} / P_H = 0,5$ . Здесь  $P_{к0}$  – давление в несущей камере, соответствующее расчетной толщине слоя  $h_0$  при гладких опорных поверхностях,  $P_H$  – давление нагнетания смазки.

С учетом шероховатости усредненная толщина несущего слоя будет иметь вид

$$h_i = h_0 + 0,5Rz(1 - \sin x), \quad (1)$$

где  $x = \frac{2\pi \cdot m(r_i - r_k)}{r_n - r_k}$ , здесь  $m = (r_n - r_k) / Sm$  – количество волн шероховатости на опорной перемычке подшипника;  $Sm$  – средний шаг шероховатости;  $Rz$  – высота шероховатости.

Для большей общности результатов и для сокращения вычислений сравнительное исследование про-

водили в безразмерной форме. В математической модели размерные величины заменяли безразмерными:  $P_i = p_i / p_H$  – безразмерный параметр давления;  $H_i = h_i / h_0$  – безразмерный параметр толщины несущего слоя;  $R_i = r_i / r_n$  – безразмерный параметр радиальных размеров;  $RZ = Rz / h_0$  – безразмерный параметр высоты шероховатости;  $W = w / (\pi \cdot r_n^2 \cdot p_H)$  – безразмерный параметр несущей способности;  $Q = q \cdot \mu / (\pi \cdot h_0^3 \cdot p_H)$  – безразмерный параметр расхода смазки.

Для дальнейших исследований использовали основные характеристики слоя смазки, полученные в [4]:

– толщина несущего слоя смазки:

$$H_i = 1 + 0,5 \cdot Rz \cdot \left( 1 - \sin \left[ \frac{2\pi \cdot m(R_i - R_k)}{1 - R_k} \right] \right), \quad (2)$$

– расход смазки в слое подшипника

$$Q = -\frac{H_0^3 R_k}{6} \cdot \left[ \frac{-3P_k + 4P_1 - P_2}{2\Delta R} \right], \quad (3)$$

– несущую способность гидростатического подшипника, полученную решением с использованием численного метода Симпсона:

$$W = P_k \cdot R_k^2 + \frac{1 - R_k}{3n} \times [P_k + P_n + 2(P_2 + P_4 + \dots + P_{n-2}) + 4(P_1 + P_3 + \dots + P_{n-1})], \quad (4)$$

– уравнение Рейнольдса в конечно-разностном виде:

$$H_i \frac{P_{i+1} - P_{i-1}}{2\Delta R} + R_i \left[ H_i \frac{P_{i+1} - 2P_i + P_{i-1}}{\Delta R^2} + 3H_i' \cdot \frac{P_{i+1} - P_{i-1}}{2\Delta R} \right] = 0. \quad (5)$$

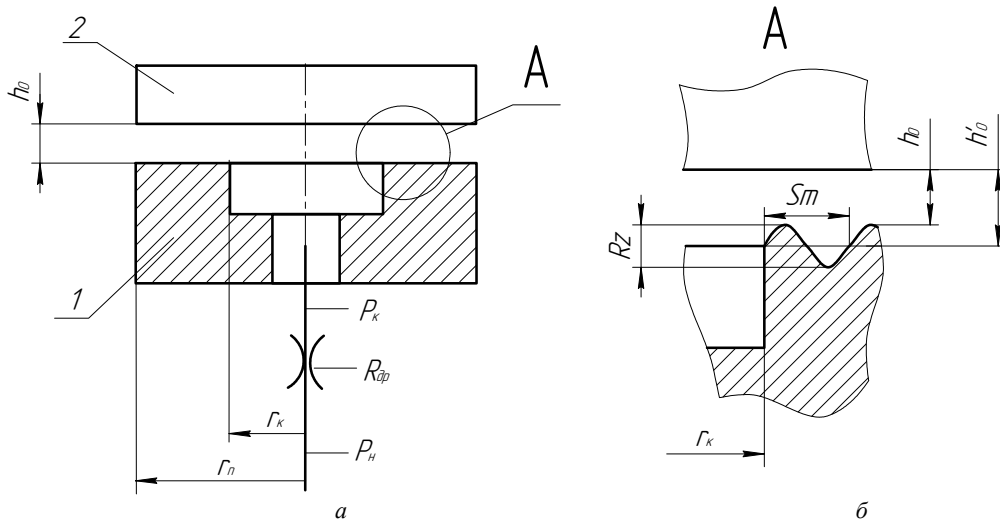


Рис. 1. Гидростатический подшипник: а – схема подшипника; б – форма опорной поверхности

Особенность решения данной задачи заключается в том, что в гидростатическом подшипнике давление в несущем кармане зависит от величины и направления внешней нагрузки. Текущее значение давления в несущем кармане определяется балансом расходов смазки через слой гидростатического подшипника и через дроссель постоянного сопротивления:  $Q_{др} = Q_n$ .

Расход через дроссель равен

$$Q_{др} = \frac{1 - P_k}{R_{др}}, \quad (6)$$

где  $R_{др} = \frac{(1 - P_{k0}) \cdot \ln R_1}{H_0^3 \cdot P_{k0}}$  – сопротивление дросселя,

которое рассчитывается при проектировании гидростатического подшипника и определяется номинальными параметрами опоры.

Решение системы (5) будет иметь вид

$$P_{i-1} = F_i P_i + V_i, \quad (7)$$

где  $F_{i+1}, V_{i+1}$  – рекуррентные формулы для вычисления прогоночных коэффициентов; здесь

$$F_{i+1} = \frac{A}{1 - BF_i}, \quad V_{i+1} = \frac{B \cdot V_i}{1 - BF_i}, \quad (8)$$

где

$$A = \left( \frac{\nu}{4R_i} + \frac{3(H_{i+1} - H_{i-1})}{8H_i} + \frac{1}{2} \right),$$

$$B = \left( -\frac{\nu}{4R_i} - \frac{3(H_{i+1} - H_{i-1})}{8H_i} + \frac{1}{2} \right).$$

Учитывая выражения (3) и (6), получим

$$\frac{1 - P_k}{R_{др}} = A_{щ} \cdot (-3 \cdot P_k + 4 \cdot P_1 - P_2), \quad (9)$$

где  $A_{щ} = \frac{H_1^3 \cdot R_1}{2 \cdot \Delta R}$ .

Решив (9) совместно с (5) для 1-й точки, определим формулы для нахождения первых прогоночных коэффициентов  $F_1$ , и  $V_1$ :

$$F_1 = \frac{b_2 \cdot c_1 - b_1 \cdot c_2}{a_1 \cdot c_2 - a_2 \cdot c_1}, \quad V_1 = \frac{c_2 \cdot d_1}{a_1 \cdot c_2 - a_2 \cdot c_1} \quad (10)$$

где

$$a_1 = -3A_{щ} + \frac{1}{R_{др}}; \quad b_1 = 4A_{щ}; \quad c_1 = -A_{щ}; \quad d_1 = \frac{1}{R_{др}};$$

$$a_2 = \frac{R_1 \cdot H_1}{\Delta R^2} - \frac{H_1}{2\Delta R} - \frac{3 \cdot H_1' \cdot R_1}{2\Delta R}; \quad b_2 = -\frac{2R_1 \cdot H_1}{\Delta R^2};$$

$$c_2 = \frac{R_1 \cdot H_1}{\Delta R^2} + \frac{H_1}{2\Delta R} + \frac{3 \cdot H_1' \cdot R_1}{2\Delta R}.$$

Воспользовавшись вторым граничным условием ( $P|_{R=1} = 0$ ) и известными прогоночными коэффициентами  $F_i, V_i$ , обратным ходом при  $i = n, n-1, \dots, 2, 1$  найдем недостающие неизвестные значения функции  $P_{n-1}, P_{n-2}, \dots, P_1$ .

Зная функцию распределения давлений  $P_i$  в несущем слое смазки рассматриваемого подшипника, определили несущую способность (4) и расход смазки (3).

Дальнейшее исследование проводили с использованием программной реализации, составленной на языке Object Pascal в среде Delphi.

Для корректного сравнения полученных результатов несущей способности и расхода смазки при различной шероховатости и установления рекомендаций по допустимой шероховатости была определена относительная погрешность расчетов, равная  $10^{-6}$ .

На величину и форму распределения давления в большей степени влияет количество шагов шероховатости. Это объясняется тем, что чем больше количество шагов шероховатости в пределах граничных условий (от  $P_k$  до 0), тем меньше перепад давления на каждом шаге (рис. 2). Однако величина шероховатости приводит к снижению давления в несущей камере, а это в свое время приведет к снижению несущей способности подшипника.

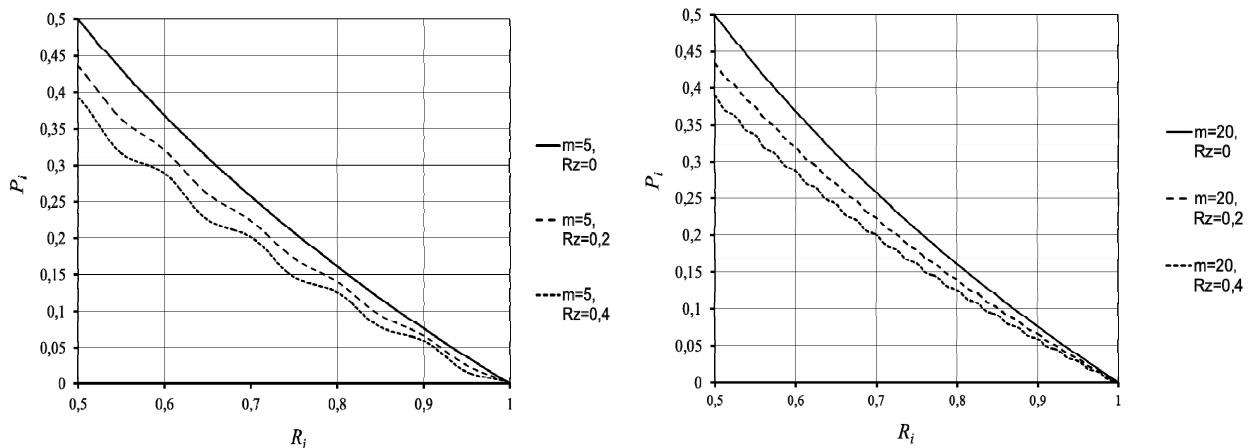


Рис. 2. Графики распределения давления по ширине опорной перемычки

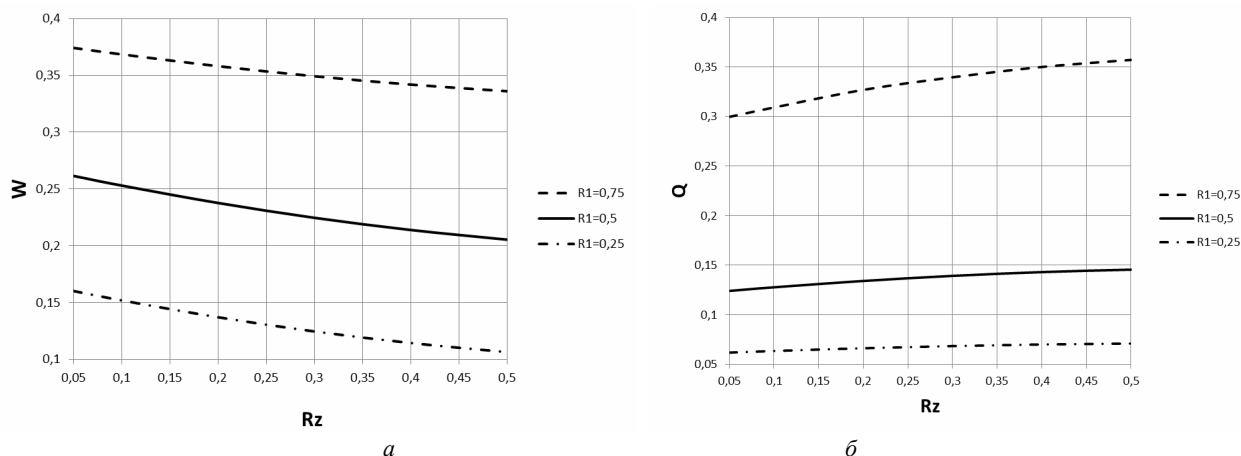


Рис. 3. Влияние шероховатости поверхности на несущую способность (а); расход смазки (б)

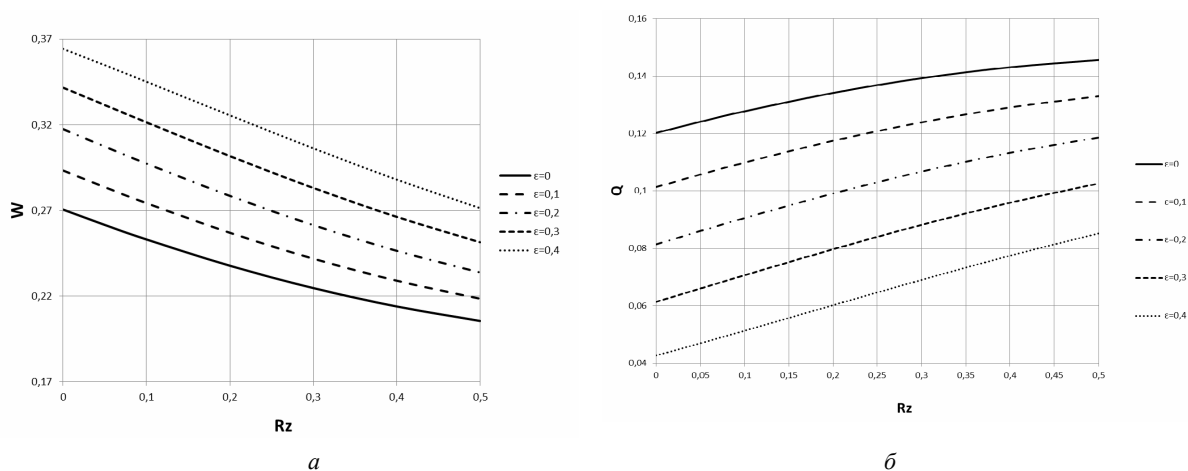


Рис. 4. Влияние шероховатости поверхности на нагрузочные (а) и расходные (б) характеристики подшипника

Расчеты показывают, что при величине шероховатости, равной половине толщины несущего слоя (при  $h_0 = 20$  мкм значение шероховатости составит  $Ra = 0,25$ ), несущая способность может отличаться от расчетного значения на 10–13 % в подшипниках с узкими перемычками ( $R_1 \geq 0,75$ ) и на 35–40 % в подшипниках с широкими перемычками ( $R_1 \geq 0,25$ ). Расход смазки при этом увеличивается (рис. 3).

При воздействии на подвижную часть подшипника нагрузки действительная величина зазора изменяется на величину  $\varepsilon$ :

$$H_0 = 1 - \varepsilon, \quad (11)$$

где  $\varepsilon$  – смещение подвижной части подшипника под действием нагрузки.

В нагруженных подшипниках влияние шероховатости на нагрузочные и расходные характеристики подшипника аналогично не нагруженным подшипникам (рис. 4).

Полученные зависимости позволяют проводить корректировку несущей способности и расхода смазки в зависимости от шероховатости опорных поверхностей на стадии проектирования гидростатических подшипников.

### Библиографические ссылки

1. Касьянова Л. В., Мерзликina Н. В., Секацкий В. С. Назначение классов точности гидростатических подшипников // сб. материалов V Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых : в 7 ч. Ч. 4. Красноярск : СФУ, 2009. С. 75–77.
2. Секацкий В. С., Мерзликina Н. В. К вопросу о нагрузочной способности осевых гидростатических подшипников // Перспективные материалы, технологии, конструкции : тез. докл. Всерос. научно-технич. конф. / Сиб. аэрокосмич. акад. Красноярск, 1998. С. 14–17.
3. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. Т. 2 / под ред. А. М. Дальского. 5-е изд., испр. М. : Машиностроение-1, 2003.
4. Строк Л. В., Пикалов Я. Ю., Секацкий В. С. Влияние шероховатости опорных поверхностей на характеристики незамкнутого осевого гидростатического подшипника // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. № 13 (39). С. 654–657.

L. V. Strok, V. S. Sekatskiy, Ya. Yu. Pikalov, M. V. Brungardt

## CALCULATION OF UNCLOSED AXIAL HYDROSTATIC BEARING CHARACTERISTICS WITH ACCOUNT OF BEARING SURFACE AREA ROUGHNESS

*The paper presents mathematical model and results of the research on influence of bearing surface area roughness on characteristics of unclosed axial hydrostatic bearing with flow metering valve compensating the oil flow. The influence of height and step of roughness on flow and load bearing characteristics is described.*

*Keywords: hydrostatic bearing, mathematical model, roughness of bearing surface area.*

© Строк Л. В., Секацкий В. С., Пикалов Я. Ю., Брунгардт М. В., 2012

УДК 004.67

А. С. Таскин, Е. М. Миркес

## ЛИНЕЙНАЯ РЕГРЕССИЯ С КЛАСТЕРИЗАЦИЕЙ ПО ПРИЗНАКУ НА ДАННЫХ С ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫМИ ВЕЛИЧИНАМИ

*Предложена модификация линейной регрессии, основанная на предварительной кластеризации по значениям признаков. Апробация метода на некоторых базах данных с действительными признаками показала существенно улучшенные результаты, по сравнению с классической линейной регрессией. Для перехода от действительных входных признаков к дискретным применен метод нечетких множеств.*

*Ключевые слова: анализ данных, линейная регрессия, кластеризация, нечеткие множества.*

Задача восстановления данных может считаться одной из наиболее сложных задач в области анализа данных, она требует тщательного исследования исходного набора данных и методов, подходящих для анализа. Следует отметить, что эта задача заведомо некорректна и не может быть решена без дополнительных предположений. В работе речь идет о числовых данных.

Существует множество методов анализа и восстановления данных. Они основаны на различных «технологиях»: деревья регрессии [1; 2], анализ и преобразование (или отбор) входных признаков [3; 4], кластеризация данных [5–7] и др. Выбор метода для решения конкретной задачи зависит прежде всего от характера обрабатываемых данных.

Большое распространение получили линейные методы анализа и восстановления данных. Их широкое применение обусловлено тем, что большое количество реальных процессов в экономике и бизнесе можно с достаточной точностью описать линейными моделями.

Можно выделить два типа восстановления данных: классификация и прогнозирование. Под классификацией будем понимать отнесение объектов (наблюдений, событий) к одному из заранее известных классов. Прогнозирование – это установление функциональной зависимости между зависимыми и независимыми переменными. В данной работе зависимые переменные будем называть «выходными» или «целевыми» признаками, а независимые – «входными». Заметим, что не все методы, пригодные для классификации, способны решать задачу прогнозирования. Однако

результаты прогнозирования всегда можно интерпретировать с позиции классификации.

В работе решается задача прогнозирования для трех различных выборок данных. Несмотря на то, что эти выборки относятся к разным областям, у них есть общие черты: малое количество признаков, очень большое количество объектов и непрерывные шкалы признаков. Рассматривается один из основных линейных методов прогнозирования – линейная регрессия. А также описывается модификация линейной регрессии, основанная на кластеризации данных, которая значительно увеличивает точность прогноза.

Существует множество методов кусочной линейной регрессии (или линейной регрессии с предварительной кластеризацией) – регрессии, в которой обучающее множество разбивается на подмножества, для каждого из которых строится своя линейная регрессия [5–8]. Эти методы различаются способом деления обучающего множества на подмножества. Существуют два разных подхода – разделение на непересекающиеся подмножества и разделение на перекрывающиеся подмножества. Для сравнения из всего многообразия методов было отобрано несколько.

Одним из наиболее известных методов разбиения обучающего множества на непересекающиеся подмножества является метод, основанный на методе кластеризации  $k$ -Means. Строится  $k$  классов, для каждого из которых описываются свое уравнение линейной регрессии.

Метод двойной регрессии является еще одним ярким представителем методов, разбивающих обучающее множество на непересекающиеся подмножества.