

УДК 004.9:519.254

О ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕГРЕССИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МНОГОФАКТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПИЩЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ И СМЕЖНЫХ ОБЛАСТЯХ

Е.Д. Проскурнин

VISUALIZATION OF THE REGRESSION DEPENDENCE ACCORDING TO THE RESULTS OF MULTIFACTOR STUDIES IN FOOD TECHNOLOGY AND RELATED FIELDS

E.D. Proskurnin

Аннотация. Выполнен анализ визуализации регрессионных зависимостей по результатам многофакторных экспериментальных исследований в диссертациях по пищевой технологии, выполненных в Калининградском государственном техническом университете. Показано, что использование формата «Графики поверхности» позволяет лишь качественно оценить полученные функции. Найти количественные различия не представляется возможным. Применение 3D-графиков в формате «Линии уровня» позволяет не только наглядно представить регрессионные зависимости в пищевой технологии и смежных областях, но и оценить их числовые характеристики.

Ключевые слова: пищевые технологии; многофакторный эксперимент; регрессионные зависимости, 3D-визуализация.

Abstract. The analysis of regression dependences visualization based on the results of multivariate experimental studies in the dissertations on food technology performed at the Kaliningrad State Technical University was performed. It is shown that the use of the "Surface graphics" format allows only a qualitative assessment of the obtained functions. It is not possible to find quantitative differences. The use of 3D-graphs in the "Level line" format allows not only to visualize the regression dependences in food technology and related areas, but also to evaluate their numerical characteristics.

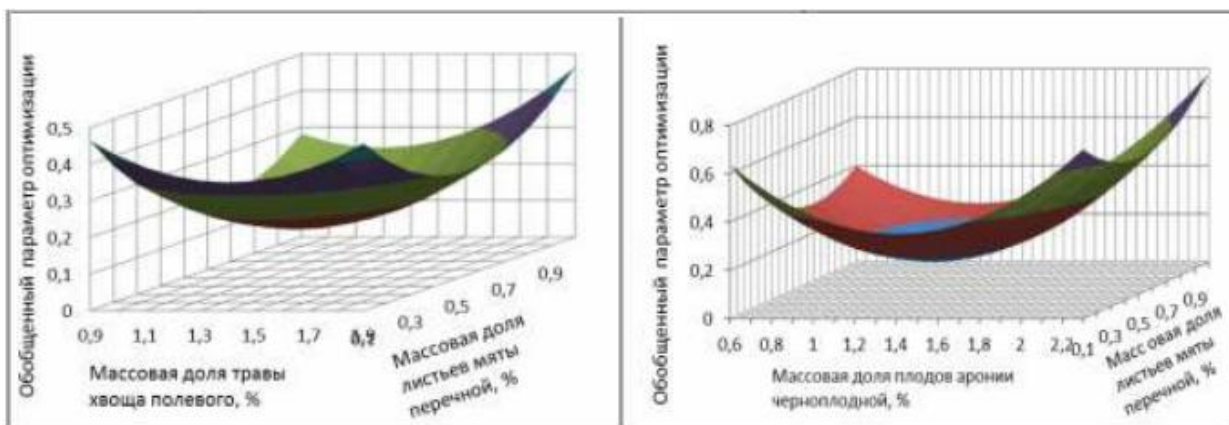
Keywords: food technology; multiple-factor experiment; regression curves; 3D-visualization.

Введение

В ходе экспериментальных исследований процессов различной природы получается огромный объем цифровой информации, который требует адекватных способов её представления. Визуализация результатов экспериментальных исследований с помощью компьютерной техники позволяет использовать наглядные образы, облегчающие их полноценное осмысление (см. [1, 2] и библиографию в них). Визуализации широко применяется при изучении процессов пищевой технологии и в смежных областях. Однако потенциал этого метода используется далеко не полностью.

На рис. 1-4 представлены рисунки из диссертаций по пищевой технологии [3-7], выполненных в Калининградском государственном техническом университете (КГТУ). Регрессионные модели функций двух переменных (факторов), построенные в них по результатам экспериментальных исследований $y = f(x_1, x_2)$, как правило, представляют собой полиномы второго порядка:

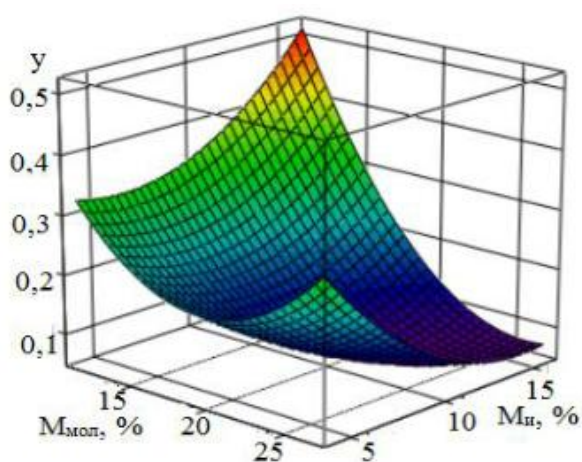
$$f(x_1, x_2) = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1^2 + a_4x_2^2 + a_5x_1x_2. \quad (1)$$



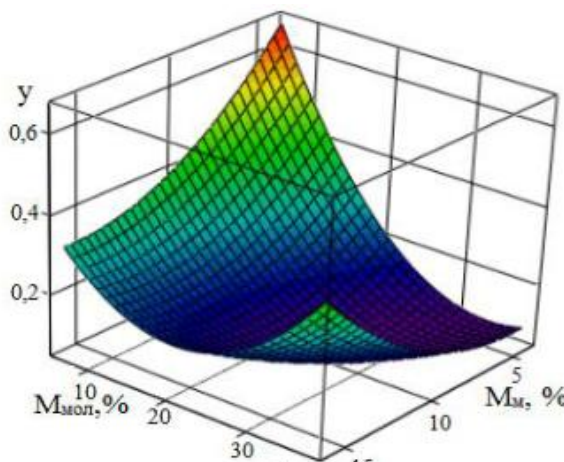
a

б

Рисунок 1 – Геометрическая интерпретация моделей рецептов фитоэкстрактов [3]:
a – фитоэкстракт № 1, *б* – фитоэкстракт № 2

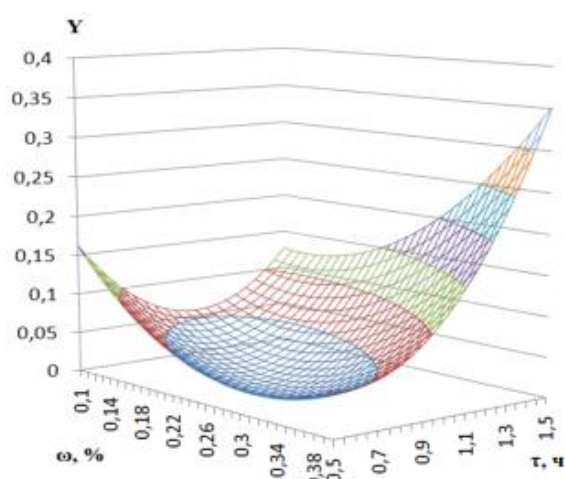


a

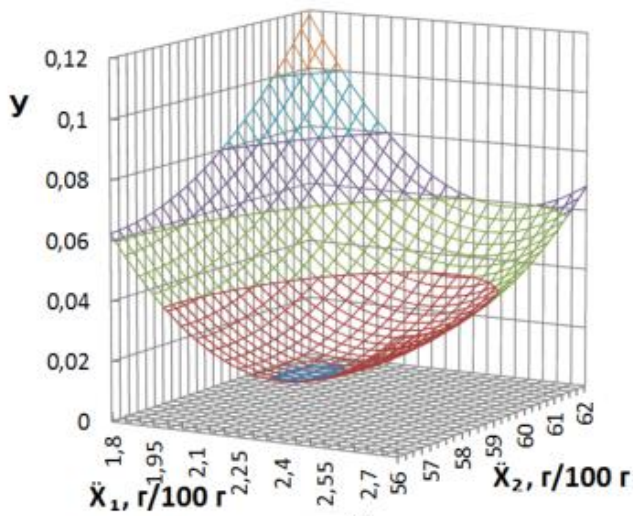


б

Рисунок 2 – Геометрическая интерпретация математической модели процесса приготовления плавленого сыра с икрой (*a*) и молоками (*б*) салаки [4]



a



б

Рисунок 3 – Геометрическая интерпретация математических моделей:
a – ферментализации рыбного сырья [5]; *б* – оптимизации рецептуры желитированного биопродукта для спортивного питания [6]

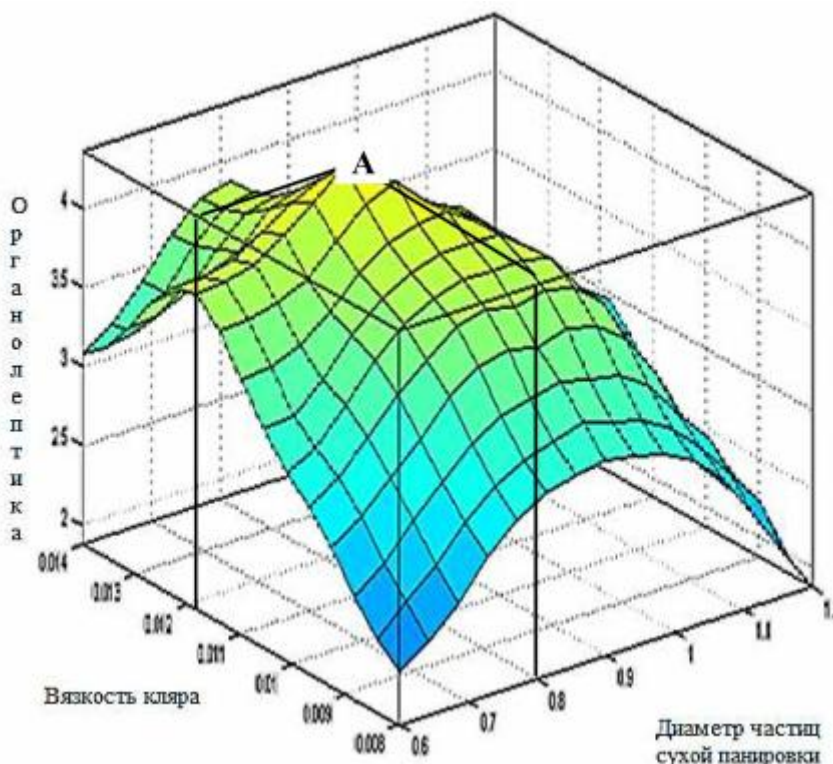


Рисунок 4 – Визуализация результатов математического моделирования органолептических характеристик рыбных полуфабрикатов [7]

По рис. 1-4 можно судить лишь о качественном характере зависимости целевой функции от исследованных факторов. Например, есть ли экстремум $y = f(x_1, x_2)$, внутри области определения. Но найти точки экстремумов ни на одном из графиков не получится. А ведь именно это является целью решения оптимизационной задачи.

Так автор [7, с. 100] утверждает: «Из рисунка видно, что наилучшие органолептические характеристики рыбных полуфабрикатов (точка А) достигаются при вязкости кляра 0,012 Па*с и размере частиц панировки 0,8 мм». По рис. 4 можно лишь указать примерную область максимума функции двух переменных, но невозможно найти указанные числовые значения аргументов (факторов). Видимо, они были найдены в [7] другим способом.

Цель данной статьи – подобрать метод визуализации эмпирической функции двух переменных, позволяющий интерпретировать результаты экспериментальных исследований не только качественно, но и количественно.

Сравнение форматов 3D-графиков

В статье [8] были предложены пути усовершенствования регрессионной модели [9] содержания редуцирующих сахаров в гидролизате. Показано, что точность модели может быть повышена путем использования полинома третьей степени:

$$y = \varphi(x_1, x_2) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1^2 + b_4x_2^2 + b_5x_1x_2 + b_6x_1^3 + b_7x_2^3 + b_8x_1^2x_2 + b_9x_1x_2^2. \quad (2)$$

где факторы x_1 и x_2 представляют собой дозировку ферментного препарата и рН, соответственно, а y – содержание редуцирующих веществ, накопившееся в гидролизате.

На рис. 5, как и на рис. 1-4 использован формат «Графики поверхности». По графикам этого формата можно лишь сказать, что результаты расчета по регрессионной модели второго и третьего порядка существенно различаются. Найти количественные различия в зависимости от значений факторов не представляется возможным. Не улучшает ситуацию

использование форматов «Векторное поле», «Столбчатая диаграмма», «Лоскутный график», «Точки данных».

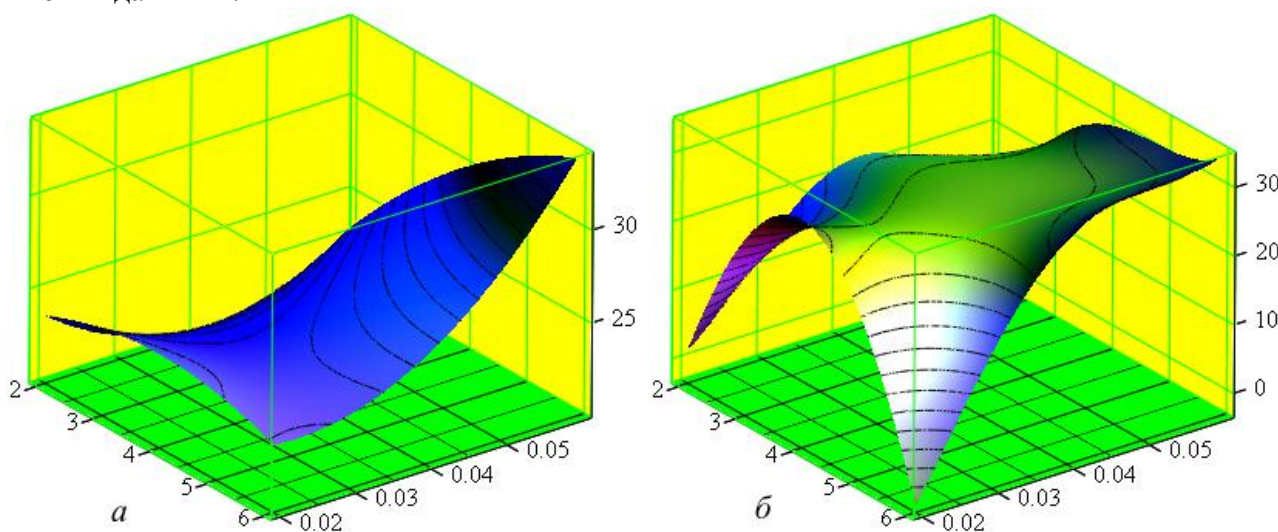


Рисунок 5 – Содержание редуцирующих веществ в гидролизате, рассчитанное в зависимости от дозировки ферментного препарата и pH, в формате «Графики поверхности»: а – по формуле (1), б – по формуле (2)

На рис. 6-7 представлены результаты визуализации тех же моделей, что на рис. 5, но в формате «Линии уровня». По ним можно определить характерные области содержания редуцирующих веществ в гидролизате количественно, а не только качественно. Причем густоту сетки линий уровней можно при необходимости увеличивать или уменьшать. Для примера она нанесена на рис. 7 через 5 единиц, а на рис. 6 – через одну единицу.

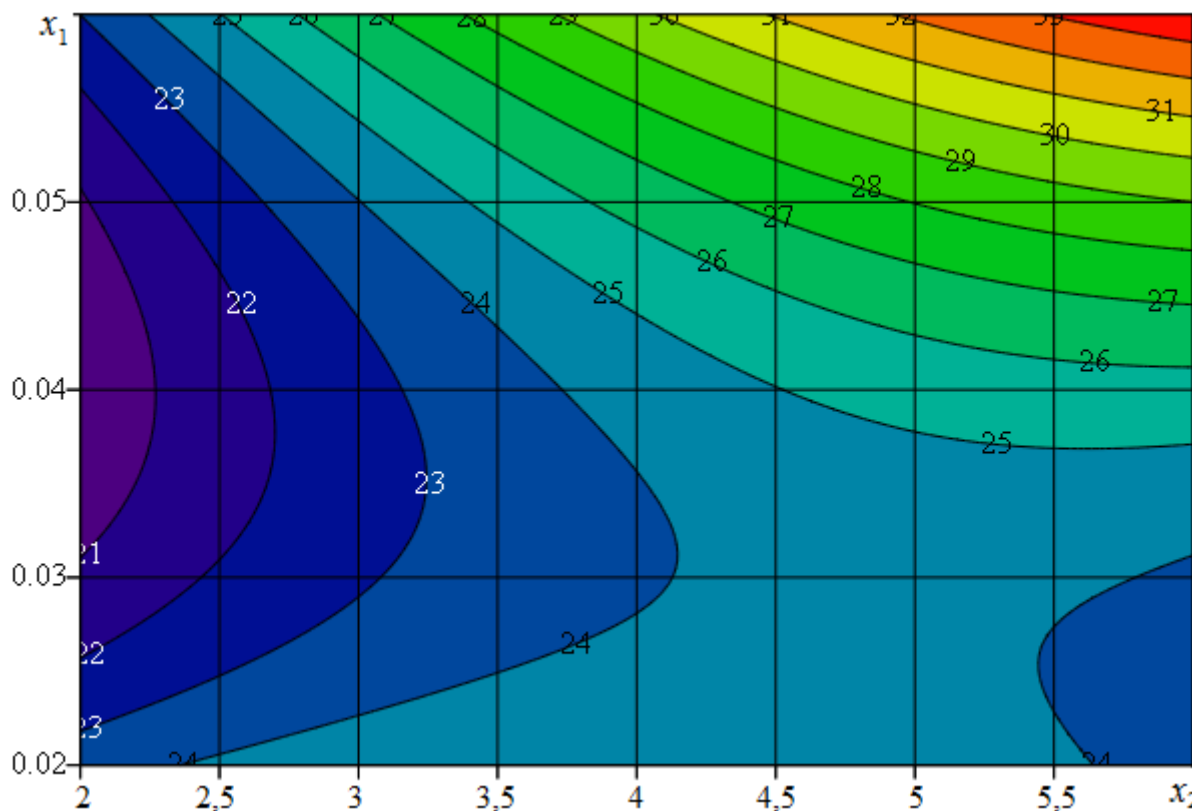


Рисунок 6 – Содержание редуцирующих веществ, рассчитанное по формуле (1) в зависимости от дозировки ферментного препарата и pH, в формате «Линии уровня»

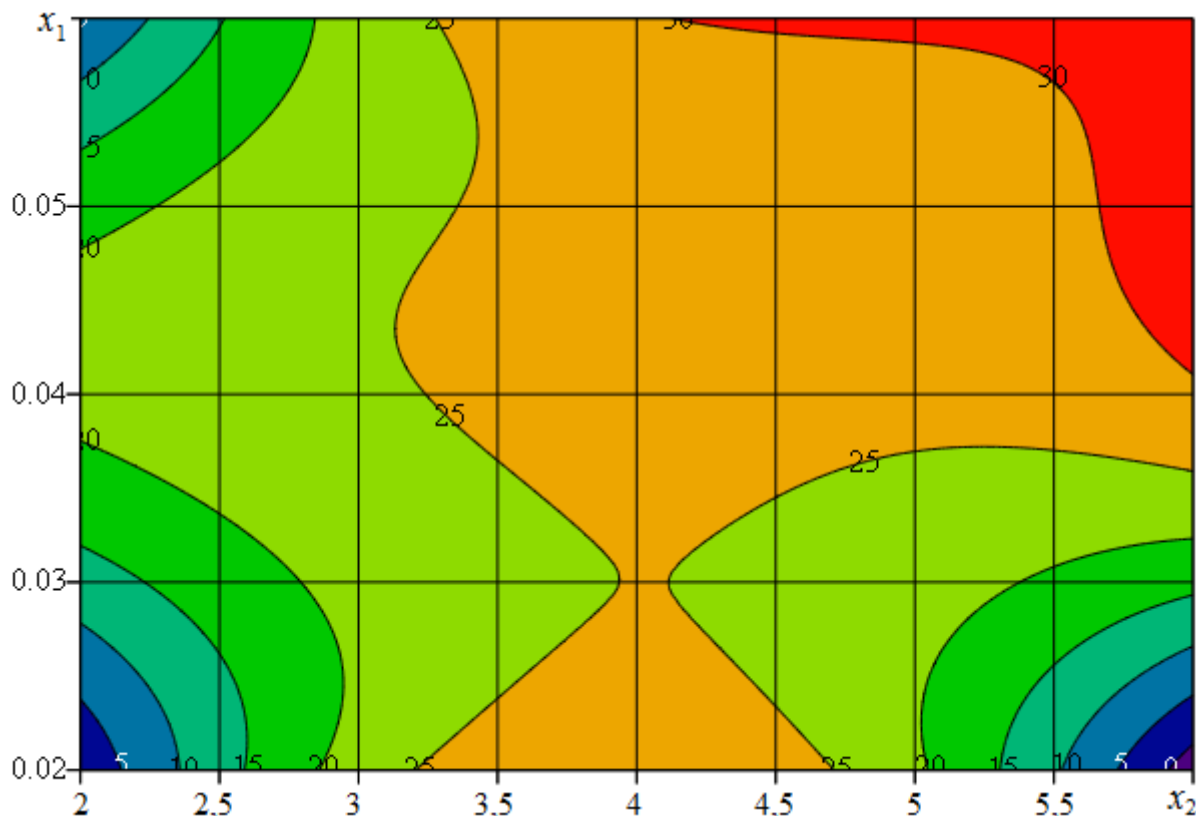


Рисунок 7 – Содержание редуцирующих веществ, рассчитанное по формуле (2) в зависимости от дозировки ферментного препарата и рН, в формате «Линии уровня»

Визуализация результатов многофакторных экспериментальных исследований

В статье [10] результатов экспериментальных исследований элементов сетей из синтетических материалов, приведенные в работах [11-19], были использованы для корреляционного анализа системы 9 факторов, приведенных к безразмерному виду:

$$Y = \frac{C_x - C_x^{\min}}{C_x^{\max} - C_x^{\min}}, \quad X_1 = \frac{\alpha - \alpha_{\min}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}, \quad X_2 = \frac{\omega - \omega_{\min}}{\omega_{\max} - \omega_{\min}}, \quad X_3 = \frac{Re_d - Re_d^{\min}}{Re_d^{\max} - Re_d^{\min}}, \dots \quad (3)$$

Общий объем выборки составил $n = 278$. Таблица 1 показывает насколько стохастическая связь между Y и X_i близка к линейной функциональной зависимости.

Таблица 1 – Соответствие значения факторов и коэффициентов парной корреляции [10]

	C_x	α	ω	Re_d	Re_L	δ	s	Fr	Str	θ
	Y	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
r	1	0,774	0,363	-0,315	-0,017	-0,068	0,322	-0,005	0,074	0,012

Наибольший коэффициент парной корреляции у Y с первым фактором (X_1 соответствует углу атаки α). С тремя факторами получились близкие по модулю коэффициенты корреляции $X_2 - \omega$, $X_3 - Re_d$, $X_6 - s$; величина коэффициента множественной корреляции равна 0,951 и, практически, не снижается при уменьшении факторов, учитываемых в модели, до четырех [10]:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_6). \quad (4)$$

Для визуализации рассмотрим функции двух аргументов (полагая два других равными 0,5):

$$\varphi_1(x_1; x_2) = f(x_1; x_2; 0,5; 0,5); \quad (5)$$

$$\varphi_2(x_1; x_3) = f(x_1; 0,5; x_3; 0,5); \quad (6)$$

$$\varphi_3(x_1; x_6) = f(x_1; 0,5; 0,5; x_6). \quad (7)$$

На рис. 8-10 представлено графическое представление регрессионных зависимостей (5)-(6) в формате «Линии уровня».

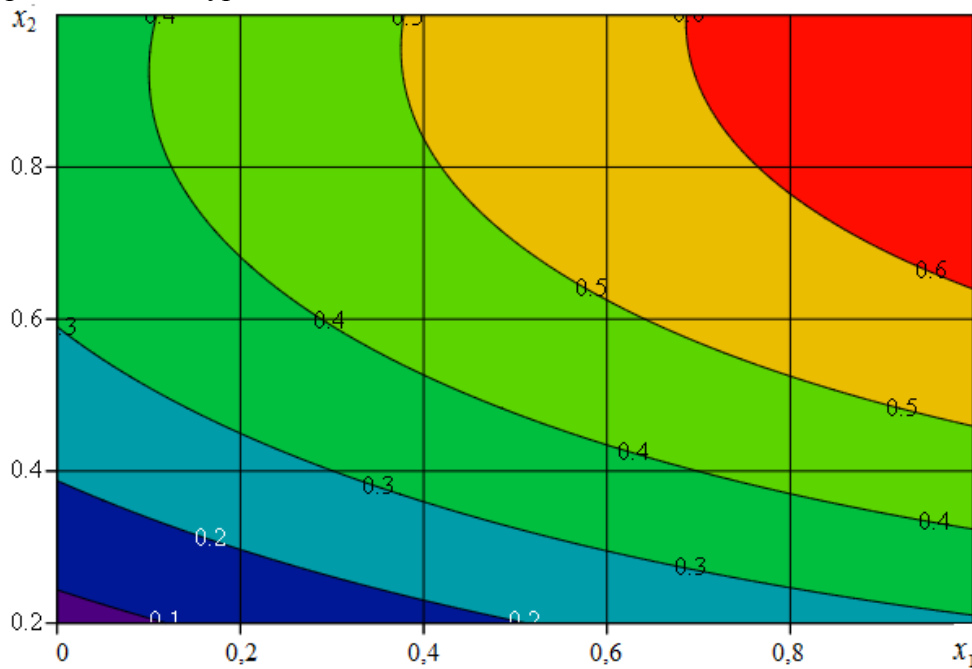


Рисунок 8 – Визуализация полинома регрессии второго порядка по формуле (5)

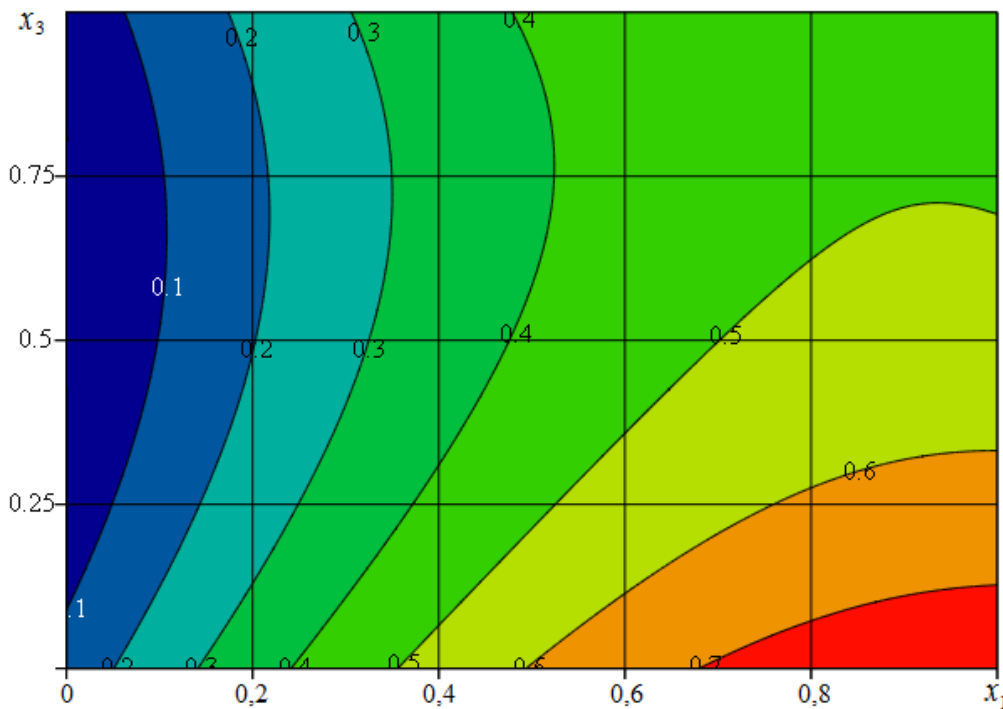


Рисунок 9 – Визуализация полинома регрессии второго порядка по формуле (6)

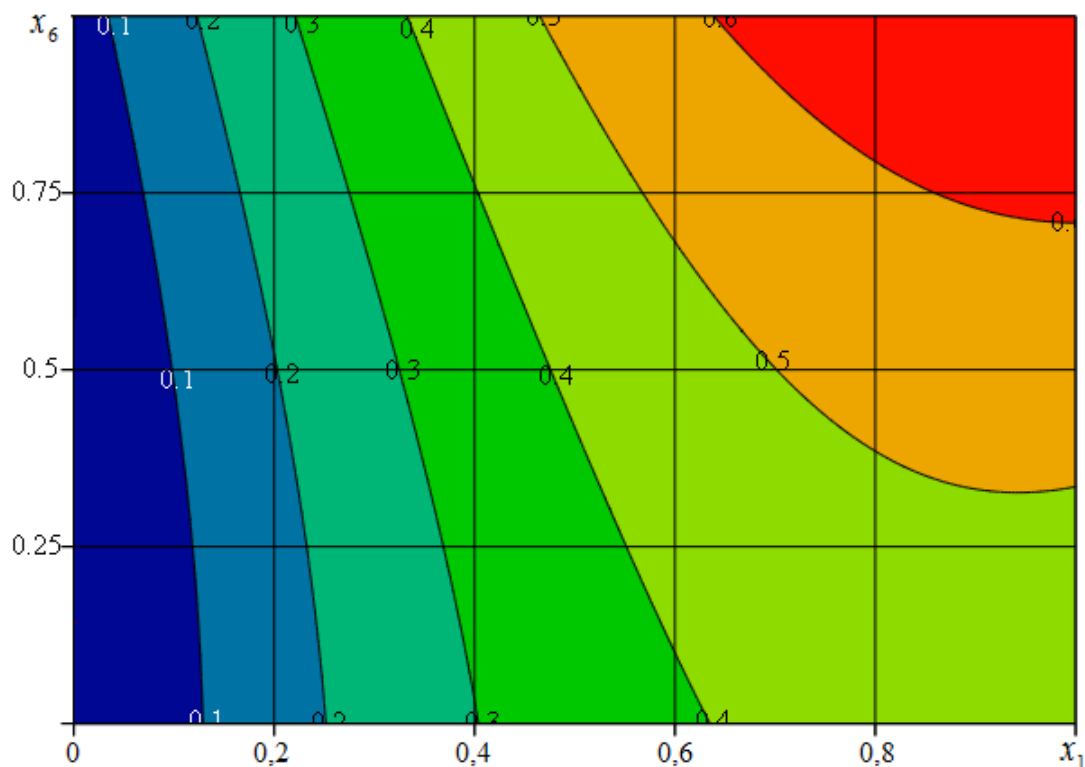


Рисунок 10 – Визуализация полинома регрессии второго порядка по формуле (7)

По рис. 8-10 видно, что наибольшие значения Y (красная область на всех рисунках) наблюдаются при максимальных значениях аргумента x_1 , если x_2 и x_6 увеличивать, а x_3 – уменьшать.

Заключение

Показано, что визуализации по результатам многофакторных исследований в пищевой технологии с помощью формата «Графики поверхности» позволяет лишь качественно характеризовать регрессионные зависимости. В частности, с их использованием не удастся отыскать экстремальные точки. Рекомендуется для применения 3D-графики в формате «Линии уровня». Они позволяют не только наглядно представить регрессионные зависимости в пищевой технологии и смежных областях, но и оценить их числовые характеристики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зиновьев А. Ю. Визуализация многомерных данных. Красноярск: Изд-во Красноярского государственного технического университета, 2000. 180 с.
2. Шаропин К.А., Берестнева О.Г., Марухина О.В. Визуализация результатов экспериментальных исследований // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 316, № 5. С. 172-176.
3. Наумова Э.А. Разработка технологии пресервов из кильки Балтийского моря, обогащенных фитокомпонентами с гипотензивными свойствами: дисс. ... канд. техн. наук. Калининград: КГТУ, 2015. 200 с.
4. Лютова Е.В. Совершенствование технологии плавленого сыра, обогащенного икрой и молоками сельди балтийской (*Clupea harengus membras*): дисс. ... канд. техн. наук. Калининград: КГТУ, 2015. 212 с.

5. Агафонова С.В. Разработка технологии функционального продукта на основе полиненасыщенных жирных кислот сырья водного происхождения: дисс. ... канд. техн. наук. Калининград: КГТУ, 2016. 174 с.
6. Мезенова Н.Ю. Разработка технологии биопродукта для спортивного питания с использованием биомодифицированного коллагенсодержащего рыбного сырья: дисс. ... канд. техн. наук. Калининград: КГТУ, 2017. 223 с.
7. Науменко Е.А. Совершенствование рецептуры панировок на основе растительного сырья для замороженных рыбных полуфабрикатов: дисс. ... канд. техн. наук. Калининград: КГТУ, 2015. 194 с.
8. Наумов В.А. О регрессионной модели для оптимизации способа получения сахаросодержащего сырья из картофеля // Агропромышленные технологии Центральной России. 2018. Вып. 1 (№ 7). С. 29-35.
9. Березина Н.А., Матвеева И.В., Орлова А.М. Оптимизация способа получения сахаросодержащего сырья из картофеля // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 3 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.processes.ihbt.ifmo.ru>.
10. Ахмедов И.М., Наумов В.А. Корреляционный анализ результатов многофакторных экспериментальных исследований // Вестник науки и образования Северо-Запада России: электронный журнал, 2018. Т. 4, № 1. С. 114-120. URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2018/01/2018-N1-AhmedovNaumov.pdf>.
11. Miyazaki Y., Takahashi T. Basic investigations on the resistances of fishing nets. The resistance of plane nets. Journal Tokyo University of Fisheries. 1964. V.50, No 2, pp. 96-103.
12. Фридман А.Л. Теория и проектирование орудий промышленного рыболовства: учебник. Москва: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 238 с.
13. Imai T., Nakamura T. Fluid dynamical drag coefficient on the weaver's-knot netting relative to Reynolds number. Nippon Suisan Gakkaishi. 1989. No 55, pp. 1753-1757.
14. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Кикот А.В., Бояринова Н.А. Методика определения гидродинамического сопротивления плоских элементов рыболовных сетей при поперечном обтекании // Рыбное хозяйство. 2010. № 4. С. 72-75.
15. Наумов В.А., Бояринова Н.А. Эмпирические формулы для коэффициента сопротивления плоских рыболовных сетей при поперечном обтекании // Известия КГТУ. 2012. № 24. С. 143-150.
16. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Кикот А.В., Бояринова Н.А. Гидродинамические силы сопротивления сетных частей орудий промышленного рыболовства при поперечном обтекании // Рыбное хозяйство. 2012. № 4. С. 109-111.
17. Наумов В.А. Математическая постановка краевой задачи о равновесии полосы сети ставного невода // Известия КГТУ. 2013. № 28. С. 182-187.
18. Недоступ А.А., Ражев А.О., Наумов В.А., Белов А.В. Математическое моделирование орудий и процессов рыболовства: монография. Ч. 1. Калининград: Изд-во ФГОУ ВПО «КГТУ», 2013. 253 с.
19. Наумов В.А., Агиевич Н.А. Эмпирическая формула для коэффициента гидродинамического сопротивления плоской рыболовной сети при продольном обтекании в автомодельной области Известия КГТУ. 2014. № 32. С. 238-244.

REFERENCES

1. Zinov'ev A.Yu. *Vizualizaciya mnogomernyh dannyh* [Visualization of multidimensional data]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Technical University, 2000. 180 p.
2. Sharopin K.A., Berestneva OG, Marukhina O.V. *Vizualizaciya rezul'tatov ehksperimental'nyh issledovaniy* [Visualization of the results of experimental research]. *Izvestiya Tomsk Polytechnic University*. 2010. V. 316, No. 5, pp. 172-176.

3. Naumova E.A. *Razrabotka tekhnologii preservov iz kil'ki Baltijskogo morya, obogashchennykh fitokomponentami s gipotenzivnymi svojstvami* [Development of technology of preserves from sprat Baltic Sea, enriched with phytochemicals with hypotensive properties]: diss. ... cand. tech. sciences. Kaliningrad: KSTU, 2015. 200 p.
4. Lyutova E.V. *Sovershenstvovanie tekhnologii plavlennogo syra, obogashchennogo ikroy i molokami sel'di baltiyskoj* [Improving the technology of processed cheese enriched with caviar and Baltic herring (*Clupea harengus* membras)]: diss. ... cand. tech. sciences. Kaliningrad: KSTU, 2015. 212 p.
5. Agafonova S.V. *Razrabotka tekhnologii funkcional'nogo produkta na osnove polinenasyshchennykh zhirnykh kislot syr'ya vodnogo proiskhozhdeniya* [Development of technology of a functional product on the basis of polyunsaturated fatty acids of raw materials of water origin]: diss. ... cand. tech. sciences. Kaliningrad: KSTU, 2016. 174 p.
6. Mezenova N.Yu. *Razrabotka tekhnologii bioprodukta dlya sportivnogo pitaniya s ispol'zovaniem biomodificirovannogo kollagensoderzhashchego rybnogo syr'ya* [Development of bioproduct technology for sports nutrition using biomodified collagen-containing fish raw materials]: diss. ... cand. tech. sciences. Kaliningrad: KSTU, 2017. 223 p.
7. Naumenko E.A. *Sovershenstvovanie receptury panirovok na osnove rastitel'nogo syr'ya dlya zamorozhennykh rybnykh polufabrikatov* [Improving the formulation of breadings based on plant raw materials for frozen fish semi-finished products]: diss. ... cand. tech. sciences. Kaliningrad: KSTU, 2015. 194 p.
8. Naumov V.A. *O regressionnoj modeli dlya optimizacii sposoba polucheniya saharosoderzhashchego syr'ya iz kartofelya* [On the regression model for optimization of the method for obtaining sugar-containing raw materials from potatoes] *Agropromyshlennye tekhnologii Central'noj Rossii*. 2018. V. 1 (No.7), pp. 29-35.
9. Berezina N.A., Matveeva I.V., Orlova A.M. *Optimizaciya sposoba polucheniya saharosoderzhashchego syr'ya iz kartofelya* [Optimization of the method for obtaining sugar-containing raw materials from potatoes] *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Seriya «Processy i apparaty pishchevykh proizvodstv»*. 2013. No. 3 [Electronic resource]. URL: <http://www.processes.ihbt.ifmo.ru>.
10. Ahmedov I.M., Naumov V.A. *Korrelyacionnyj analiz rezul'tatov mnogofaktornykh ehksperimental'nykh issledovanij* [Correlation analysis of the results of multifactorial experimental research] *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii: ehlektronnyj zhurnal*, 2018. V. 4, No. 1, pp. 114-120. URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2018/01/2018-N1-AhmedovNaumov.pdf>.
11. Miyazaki Y., Takahashi T. Basic investigations on the resistances of fishing nets. The resistance of plane nets. *Journal Tokyo University of Fisheries*. 1964. V.50, No 2, pp. 96-103.
12. Fridman A.L. *Teoriya i projektirovanie orudij promyshlennogo rybolovstva: uchebnik* [Theory and design of commercial fishing gear: textbook]. Moskva: Legkaya i pishchevaya promyshlennost', 1981. 238 p.
13. Imai T., Nakamura T. Fluid dynamical drag coefficient on the weaver's-knot netting relative to Reynolds number. *Nippon Suisan Gakkaishi*. 1989. No 55, pp. 1753-1757.
14. Velikanov N.L., Naumov V.A., Kikot A.V., Boyarinova N.A. *Metodika opredeleniya gidrodinamicheskogo soprotivleniya ploskikh elementov rybolovnykh setey pri poperechnom obtekanii* [The method of determining hydrodynamic resistance of flat elements of fishing nets at a cross flow]. *Rybnoe khozyaystvo*. 2010. No. 4, pp. 72-75.
15. Naumov V.A., Boyarinova N.A. *Empiricheskie formuly dlya koeffitsienta soprotivleniya ploskikh rybolovnykh setey pri poperechnom obtekanii* [Empirical formula for the drag coefficient of a flat fishing nets at a cross flow]. *Izvestiya KGTU*. 2012. No. 24, pp. 143-150.
16. Velikanov N.L., Naumov V.A., Kikot A.V., Boyarinova N.A. *Gidrodinamicheskie sily soprotivleniya setnykh chastej orudij promyshlennogo rybolovstva pri poperechnom obtekanii*



[Hydrodynamic forces of resistance of the network parts of industrial fishing tools with transverse flow]. *Rybnoe hozyajstvo*. 2012. No. 4, pp. 109-111.

17. Naumov V.A. *Matematicheskaya postanovka kraevoy zadachi o ravnovesii poloski stavnogo nevoda* [Mathematical formulation of the boundary value problem on the equilibrium of the strips of stationary netting]. *Izvestiya KGTU*. 2013. No. 28, pp. 182-187.

18. Nedostup A.A., Razhev A.O., Naumov V.A., Belov A.V. *Matematicheskoe modelirovanie orudij i processov rybolovstva: monografiya* [Mathematical modeling of fishing tools and processes: monograph]. Part 1. Kaliningrad: KGTU Publ. 2013. 253 p.

19. Naumov V.A., Agievich N.A. *Empiricheskaya formula dlya koeffitsienta gidrodinamicheskogo soprotivleniya ploskoy rybolovnoy seti pri prodol'nom obtekanii v avtomodel'noy oblasti* [The empirical formula for hydrodynamic drag coefficient of flat fishing nets with longitudinal flow in self-similar region]. *Izvestiya KGTU*. 2014. No. 32, pp. 238-244.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Проскурнин Евгений Дмитриевич

Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, кафедра гуманитарных и естественно-научных дисциплин и сервиса, г. Калининград, Россия, кандидат физико-математических наук, доцент.

E-mail: proskurnin@zf.ranepa.ru

Proskurnin Evgeny Dmitrievich

Russian Academy of national economy and public administration under the President of the Russian Federation, Department of Humanities and natural Sciences and service, Kaliningrad, Russia, candidate of physical and mathematical Sciences, associate Professor.

E-mail: proskurnin@zf.ranepa.ru

Корреспондентский почтовый адрес и телефон для контактов с автором статьи:
236016, Россия, Калининград, ул. Артиллерийская, 62, ЗФ РАНХиГС, каб.205Г,
+7 (4012) 97-23-73