УДК 62-05

© Н. Л. Лукина, ассистент

© В. М. Челнокова, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: lukina.nataly@mail.ru, ver-m@list.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-3-148-154

© N. L. Lukina, assistant lecturer

© V. M. Chelnokova, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: lukina.nataly@mail.ru, ver-m@list.ru

СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ВЛИЯНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАЗВИТИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОФЕССИЙ

CREATING OF MATHEMATICAL MODEL OF INFLUENCE EFFICIENCY OF ORGANIZATION AND TECHNOLOGY FACTORS ON THE CONSTRUCTION PROFESSIONS DEVELOPMENT

Статья посвящена формированию и обоснованию математической модели посредством анализа и обработки внешних и внутренних организационно-технологических факторов, а также получению математической модели в виде уравнения регрессии второго порядка, оценивающей влияние организационно-технологических факторов на развитие строительных профессий в регионе исследования с использованием метода экспертных оценок. Примером подтверждается правильность выбора групп факторов, показывающих, что одни из них изменяются, а другие остаются стабильными.

Ключевые слова: внешние и внутренние организационно-технологические факторы, математическая модель, уравнение регрессии, полиномиальное уравнение второго порядка.

The article presents the formation and substantiation of a mathematical model obtained by means of analyzing and processing of external and internal organization and technology factors. The mathematical model in the form of a second-order regression equation allows estimating the influence of these factors on the development of construction professions in the region where the study was carried out using the expert assessment method. The authors provide an example confirming the correct choice of groups of factors showing that some of them change, while others remain stable.

Keywords: external and internal organization and technology factors, mathematical model, regression equation, second-order polynomial equation.

В России одной из наиболее динамично развивающихся отраслей является строительное производство, которое представляет собой осуществление совместной деятельности строительно-монтажных, транспортных, специализированных и прочих организаций строительного комплекса, реализуемое через непосредственную организацию и выполнение производственных строительных процессов, направленных на осуществление строительной деятельности [7, 9].

Для анализа результативности влияния организационно-технологических факторов на развитие строительных профессий в регионе исследования разрабатывается математическая мо-

дель с использованием метода экспертных оценок. В качестве региона исследования принимаем город Мурино (Всеволожский район), расположенный у северной границы Санкт-Петербурга. В настоящее время этот город — активно развивающаяся территория, на которой организованы строительные работы таких застройщиков, как Setl City, «Арсенал-Недвижимость», «Полис Групп», «Лидер Групп», «Петрострой», «Самолет ЛО», «ФСК Лидер Северо-Запад» и др. [8, 13].

Чтобы выявить значимость организационно-технологических факторов, сформированы 10 экспертных групп, имеющих опыт работы в строительных организациях исследуемого

региона. Каждой экспертной группой выполнялось ранжирование внутренних и внешних организационно-технологических факторов, способных оказать влияние на развитие строительных профессий в регионе исследования. Выполнено ранжирование факторов посредством выставления баллов от 1 до 10.

Полученные результаты отражены на рис. 1 и 2 [3, 10].

В ходе работы получаем таблицу с данными парной корреляции переменных [3, 4] (табл. 1).

На основании анализа данных матрицы интеркорреляции переменных определяем группы переменных [11, 12] (табл. 2).

Наш эксперимент является многофакторным, так как факторов, существенно влияющих на функцию отклика (Y), — четыре: Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 .

На начальном этапе эксперимента устанавливается необходимое число опытов и решается ряд задач: 1) определяются сочетания групп факторов и количество сочетаний, необходимых для определения функции отклика; 2) определяются точности представленной функции отклика; 3) находятся коэффициенты регрессионного уравнения $b_0, b_1, \dots, b_k$ [1].

Для построения математической модели необходимо определить диапазоны изменения

факторов, за которые принимается факторное пространство, образованное координатными осями каждого фактора.

Преобразуем факторы в безразмерные (кодированные) величины согласно формуле

$$Z_i = \frac{z_i + z_0}{\Delta z},$$

где z_i — значение i -го фактора в натуральном масштабе; z_0 — натуральное значение основного уровня фактора, определяемое по формуле

$$z_0 = \frac{(z_{i\max} - z_{i\min})}{2},$$

Δz — интервал варьирования; Z_i — кодированное значение фактора.

Таким образом областью планирования будет гиперкуб с параметрами $1 \leq Z_i \leq 1$, где $i = 1, 2, 3, 4$ (каждый кодированный фактор Z_i принимает одно из значений: (-1) — «нижний», (0) — «основной», $(+1)$ — «верхний») [6] (табл. 3).

Так как мы изначально не знаем аналитическое выражение функции отклика, то рассмотрим не саму функцию, а ее разложение — полином второй степени [1]:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i,j=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ij} x_i^2,$$

Рис. 1. Диаграмма значимости внешних организационно-технологических факторов x_1-x_{10} : x_1 — нормативная продолжительность строительства; x_2 — развитие технологии строительного производства; x_3 — развитие современных методов календарного планирования; x_4 — экономическое стимулирование в регионе строительства; x_5 — развитие инфраструктуры; x_6 — развитие системы менеджмента качества; x_7 — оптимизация нормативной строительной документации; x_8 — строительные риски; x_9 — осуществление СМР в климатических условиях региона строительства; x_{10} — потребители строительной продукции

Рис. 2. Диаграмма значимости внутренних организационно-технологических факторов $x_{11}-x_{20}$: x_{11} — технологический уровень строительной организации; x_{12} — процесс взаимодействия строительной организации с внутренними и внешними субъектами строительства; x_{13} — степень концентрации капитальных вложений; x_{14} — организация материально-технического обеспечения строительства; x_{15} — качество организационно-технологической документации; x_{16} — календарное планирование; x_{17} — фактические сроки окончания строительства; x_{18} — анализ потерь времени; x_{19} — укомплектованность квалифицированными рабочими; x_{20} — конкурентоспособность

где b_0 — свободный член; b_i — линейные эффекты, эффекты парного взаимодействия; b_{ij} — квадратичные эффекты; x_i, x_j — влияющие факторы.

Кроме аналитического выражения, функция отклика может быть определена через кодированные факторы $Y = f(Z_1, Z_2, Z_3, Z_4)$ и записана в полиномиальном виде [1]:

$$Y = B_0 + b_1 Z_1 + \dots + b_n Z_n + b_n Z_n^2 + b_{nm} Z_n Z_m.$$

Отметим, что $B_0 \neq b_0$, однако в то же время

$$Y = F(x_1 x_2 x_3 x_4) = f(Z_1 Z_2 Z_3 Z_4),$$

то есть функция отклика Y может быть описана разными параметрами в разных простран-

ствах — в натуральном и факторном (влияние каждого фактора i на функцию отклика для полинома, записанного в кодированных факторах, возможно оценить по величине коэффициента b_i . Для полинома в натуральных факторах величина коэффициента b_i однозначно не свидетельствует о степени влияния этого фактора i на функцию) [6].

В нашей работе в качестве модели выбираем полиномиальное уравнение второго порядка.

Преобразовываем квадратичные параметры модели стандартного регрессионного уравнения

Таблица 1

Матрица интеркорреляции переменных

	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{19}	x_{20}
x_1	0,45	0,28	-0,07	-0,32	0,48	0,64	0,05	-0,22
x_2	0,82	-0,19	0,23	0,07	0,35	-0,31	0,49	-0,08
x_3	0,43	0,42	0,91	0,04	-0,11	0,34	-0,01	0,51
x_4	-0,41	0,13	0,49	-0,36	0,27	0,21	0,08	0,85
x_6	0,37	-0,09	0,12	0,18	0,31	0,42	0,79	0,56
x_7	-0,27	0,51	-0,24	0,53	0,26	0,32	-0,39	0,08
x_8	0,09	0,17	0,23	0,14	-0,54	-0,29	0,19	-0,12
x_9	0,18	0,14	0,51	0,07	0,39	0,43	0,61	-0,17

Таблица 2

Группы переменных

Наименование	Состоит из переменных	Значение корреляции	Характеризует развитие строительных профессий
Группа Z_1	x_2 (развитие технологии строительного производства) и x_{11} (технологический уровень строительной организации)	$rx_2 x_{11} = 0,82$	Через развитие технологического уровня как самой строительной организации, так и строительной отрасли в целом
Группа Z_2	x_3 (развитие современных методов календарного планирования) и x_{13} (степень концентрации капитальных вложений)	$rx_3 x_{13} = 0,91$	Через инвестиции в основные средства строительной организации посредством развития современных методов планирования в строительной отрасли
Группа Z_3	x_4 (экономическое стимулирование в регионе строительства) и x_{20} (конкурентоспособность)	$rx_4 x_{20} = 0,85$	За счет усиления конкурентоспособности строительных организаций посредством экономического стимулирования строительной отрасли в исследуемом регионе
Группа Z_4	x_6 (развитие системы менеджмента качества) и x_{19} (укомплектованность квалифицированными рабочими)	$rx_6 x_{19} = 0,79$	Путем укомплектования рабочими высокой квалификации рабочих мест в строительных организациях посредством учета требований системы менеджмента качества

специальным образом для устранения асимметрии [5]:

$$Y = B_0 + b_1 Z_1 + b_2 Z_2 + b_3 Z_3 b_n Z_n^2 + \\ + b_4 Z_4 + \dots + b_n Z_n + b_{12} Z_1 Z_2 + \\ \dots + b_{11} (Z_1^2 - \beta) + \dots + b_{22} (Z_2^2 - \beta) + \\ + b_{33} (Z_3^2 - \beta) + b_{44} (Z_4^2 - \beta).$$

Коэффициент β определяем по формуле

$$\beta = \frac{2^{n-p} + \alpha^2}{N},$$

где 2^{n-p} — число точек ядра композиционного плана, размер «звездного плеча» определяется по формуле

$$\alpha = \sqrt{\frac{N_0 \cdot N - N_0}{2}},$$

общее число опытов определяем по формуле

$$N = N_0 + 2k + n_0,$$

где N_0 — число опытов полного факторного эксперимента; k — число переменных (факторов); n_0 — число в центре плана.

Таблица 3

Кодированные значения групп факторов

	«Нижний уровень» (-1)	«Основной уровень» (0)	«Верхний уровень» (+1)
Группа Z_1 — развитие строительных профессий через развитие технологического уровня как самой строительной организации, так и строительной отрасли в целом	Недостаточное использование программного обеспечения в строительном производстве отрасли. Недостаточная механизация строительных компаний исследуемого региона	Полное использование программного обеспечения в строительном производстве отрасли. Достаточный для качественной работы объем механизации строительных компаний исследуемого региона	Максимально возможное использование программного обеспечения в строительном производстве отрасли. Максимальный объем механизации строительных компаний региона
Группа Z_2 — развитие строительных профессий через инвестиции в основные средства строительной организации посредством развития современных методов планирования в строительной отрасли	СМР по периодам строительства в организациях исследуемого региона чаще проводятся с задержками. В строительных организациях прослеживается недостаток инвестиций в основные средства производства	СМР по периодам строительства в организациях исследуемого региона проводятся с незначительными задержками или в соответствии с планом. В строительных организациях инвестирование в основные средства производства достаточное, но не максимально возможное	СМР по периодам строительства проводятся строго по плану или с опережением запланированных сроков. Инвестиции в основные средства производства строительных организаций максимально возможные
Группа Z_3 — развитие строительных профессий за счет усиления конкурентоспособности строительных организаций посредством экономического стимулирования строительной отрасли в исследуемом регионе	Недостаточное экономическое стимулирование строительной отрасли в регионе исследования. Рейтинг строительных компаний занимает нижние позиции в линейке конкурентоспособных организаций	Достаточное, но не максимальное стимулирование строительной отрасли в регионе исследования. Строительные компании занимают ведущие позиции на строительном рынке	Максимально возможное стимулирование строительной отрасли в регионе исследования. Строительные компании занимают лидирующие позиции на строительном рынке
Группа Z_4 — развитие строительных профессий путем укомплектования рабочими высокой квалификации рабочих мест в строительных организациях посредством учета требований системы менеджмента качества	Качество продукции строительной отрасли в целом недостаточно стабильно (потребитель не удовлетворен качеством строительной продукции). Строительный персонал состоит из неопытных сотрудников (средний стаж работы менее 2 лет)	Качество продукции строительной отрасли в целом достаточно стабильно на определенном временном промежутке. Строительный персонал состоит из достаточно опытных сотрудников (средний стаж работы от 2 до 5 лет)	Качество продукции строительной отрасли в целом достаточно стабильно (потребитель удовлетворен качеством строительной продукции в регионе исследования). Строительный персонал состоит из опытных сотрудников (средний стаж работы более 5 лет)

Чтобы получить уравнение регрессии, вычисляем коэффициенты при линейных, квадратичных и взаимовлияющих членах уравнения.

Свободный член уравнения

$$b_0 = \frac{\sum(Z_0 Y_u)}{25} - 0,73b_{11} - 0,73b_{22} - 0,73b_{33}.$$

Коэффициенты при линейных членах уравнения:

$$b_i = \frac{\sum(Z_i Y_u)}{\sum Z_i^2}.$$

Коэффициенты при квадратичных членах уравнения:

$$b_i = \frac{\sum(Z_i^2 Y_u)}{\sum Z_i^2}.$$

Коэффициенты при взаимовлияющих членах уравнения:

$$b_i = \frac{\sum(Z_i Z_j Y_u)}{\sum Z_i Z_j},$$

где Y_u — выходной параметр в u -й строке плана; k — количество факторов; N — количество строк.

В уравнениях (11)–(13) $i = 1, \dots, k$; $j = 1, \dots, k$; $u = 1, \dots, N$ [2].

Искомое уравнение регрессии:

$$Y = 57,62 + 11,45X_1 + 10,10X_2 + 9,43X_3 + 5,98X_4 - 1,15X_1^2 - 2,13X_2^2 - 1,07X_3^2 - 2,65X_4^2 - 1,72X_1X_2 - 1,12X_1X_3 - 1,04X_1X_4 - 0,32X_2X_3 - 1,25X_2X_4 - 0,72X_3X_4.$$

Уравнение регрессии второго порядка, полученное в ходе исследовательской работы, является искомой математической моделью, однако

в связи с тем что переменными данного уравнения являются группы факторов, полученные методом парной корреляции, оно имеет вероятностный характер. Полученное уравнение регрессии представлено на рис. 3 в форме графика.

В качестве примера — апробация полученной модели на группе организационно-технологических факторов Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 — имеют фиксированное положение (рис. 4):

- $Z_1 = 0,28 \dots 0,50$ и $Z_2 = 0,09 \dots 0,12$ — незначительная нелинейность поверхности (серый цвет);
- $Z_1 = 0,60 \dots 0,72$ и $Z_2 = 0,1 \dots 0,44$ — поверхность приобретает ярко выраженный линейный характер (желтый цвет);
- $Z_1 = 0,78 \dots 0,91$ и $Z_2 = 0,46 \dots 0,61$ — эффект нелинейности поверхности (синий цвет).

Абсолютная величина меняется от 56 до 62 при изменении Z_1 и Z_2 от минимальных до максимальных значений.

Данным примером подтверждена правильность выбора групп факторов, показывающих, что одни факторы изменяются, а другие остаются стабильными.

Вывод

В процессе работы создана математическая модель, оценивающая влияние организационно-технологических факторов на развитие строительных профессий в городе Мурино. Примером подтверждена правильность выбора групп факторов, показывающих, что одни из них изменяются, а другие остаются стабильными.

Рис. 3. Графическое изображение уравнения регрессии

Рис. 4. Трехмерный график поверхности уравнения регрессии в зависимости от факторных групп Z_1 , Z_2

Библиографический список

1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
2. Александров В. А., Петрова Л. Г., Фомина Ю. Г. Планирование эксперимента и обработка результатов исследований по азотированию сталей в аммиачно-воздушных атмосферах // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 4. С. 48–51.
3. Болотин С. А. Конвергенция организационно-технологического и архитектурно-строительного проектирования, ориентированного на энергоресурсосбережение при строительстве и эксплуатации зданий / под общ. ред. С. А. Болотина. СПб.: СПбГАСУ, 2011. 200 с.
4. Болотин С. А., Дроздов А. Д., Неведова В. К. Некоторые практические аспекты применения BIM-технологии в образовательном процессе // Педагогические параллели: материалы V Междунар. науч.-практ. конф. 14–20 мая 2018 года. СПб.: СПбГАСУ, 2018. С. 72–77.
5. Гаврбов Т. А. Моделирование производства строительно-монтажных работ на основе обобщенных матрично-сетевых моделей: дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 140 с.
6. Говоруха П. А. Формирование организационно-технологического потенциала возведения ограждающих конструкций многоэтажных жилых зданий: автореф. дис.... канд. техн. наук. М., 2018. 23 с.
7. Дикман Л. Г. Организация строительного производства. М.: АСВ, 2017. 588 с.
8. Лукина Н. Л. Влияние особенностей применения SWOT-анализа для строительной организации «Полис Групп» // Организация строительного про-

изводства: материалы Всерос. науч. конф. 4 февраля 2019 г. СПб.: СПбГАСУ, 2019. С. 146–150.

9. Лукина Н. Л. Психологические исследования выбора рабочих профессий // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 5–(52). С. 343–350.

10. Любушин Н. П., Бригач Г. Е. Использование обобщенной функции желательности в многопараметрических экономических задачах // Экономический анализ: теория и практика. 2014. № 18 (369). С. 2–10.

11. Челнокова В. М., Гуревич А. Б. Анализ организации комплексного освоения территории // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 1 (60). С. 161–166.

12. Челнокова В. М., Секерина А. С., Бублева Е. А. Организация строительства жилых комплексов с учетом требований энергоэффективности // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6 (65). С. 140–146.

13. Челнокова В. М. Особенности календарного планирования комплексного освоения территорий девелопментской организацией // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 3 (56). С. 136–141.

References

1. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskiy Yu. V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy* [Planning an experiment when searching for optimal conditions]. Moscow, Nauka, 1976, 279 p.
2. Aleksandrov V. A., Petrova L. G., Fomina Yu. G. *Planirovanie eksperimenta i obrabotka rezul'tatov issledovaniy po azotirovaniyu staley v ammiachno-vozdushnykh atmosferakh* [Planning an experiment and processing the results of research on nitriding of steels in ammonia-air atmospheres]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya – Hardening technologies and coatings*, 2007, no. 4, pp. 48–51.
3. Bolotin S. A. *Konvergentsiya organizatsionno-tekhnologicheskogo i arkhitekturno-stroitel'nogo proektirovaniya, orientirovannogo na energoresursosberezhenie pri stroitel'stve i ekspluatatsii zdaniy* [Convergence of organizational-technological and architectural-construction design focused on energy saving in the construction and operation of buildings]. Ed. by Bolotin S. A. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2011, 200 p.
4. Bolotin S. A., Drozdov A. D., Nefedova V. K. *Nekotorye prakticheskie aspekty primeneniya BIM-tekhnologii v obrazovatel'nom protsesse* [Some practical aspects of applying BIM technology in the educational process]. *Trudy V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 14–20 maya 2018 goda «Pedagogicheskie paralleli»* [Proc. of the V Int. sci.-pract. conf., May 14–20, 2018 “Pedagogical parallels”]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2018, pp. 72–77.
5. Gavrbov T. A. *Modelirovanie proizvodstva stroitel'no-montazhnykh rabot na osnove obobshchennykh matrichno-setevykh modeley*. Diss. kand. tekhn. nauk [Modeling of

construction and installation works based on generalized matrix-network models. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2017, 140 p.

6. Govorukha P. A. *Formirovanie organizatsionno-tekhnologicheskogo potentsiala vozvedeniya ograzhdayushchikh konstruktivnykh mnogoetazhnykh zhilykh zdaniy. Avtoref.diss .kand.tekhn.nauk* [Formation of organizational and technological potential for the construction of enclosing structures of multi-storey residential buildings. Autho's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2018, 23 p.

7. Dikman L. G. *Organizatsiya stroitel'nogo proizvodstva* [Organization of construction production]. Moscow, ASV Publ., 2017, 588 p.

8. Lukina N. L. *Vliyanie osobennostey primeneniya SWOT-analiza dlya stroitel'noy organizatsii «Polis Grupp»* [Influence of SWOT analysis application features for the construction organization "Polis Group"]. *Trudy Vseros. nauch. konf., 4 fevralya 2019 g., «Organizatsiya stroitel'nogo proizvodstva»* [Proc. of the All-Russia sci. conf., February 4, 2019, "Organization of construction production"]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2019, pp. 146–150.

9. Lukina N. L. *Psikhologicheskie issledovaniya vybora rabochikh professiy* [Psychological research of choosing working professions]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2015, no. 5(52), pp. 343–350.

10. Lyubushin N. P., Brigach G. E. *Ispol'zovanie obobshchennoy funktsii zhelatel'nosti v mnogoparametricheskikh ekonomicheskikh zadachakh* [Using the generalized desirability function in multi-parameter economic problems]. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika – Economics analysis, theory and practice*, 2014, no. 18 (369), pp. 2–10.

11. Chelnokova V. M., Gurevich A. B. *Analiz organizatsii kompleksnogo osvoeniya territorii* [Analysis of the organization of complex development of the territory]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 1(60), pp. 161–166.

12. Chelnokova V. M., Sekerina A. S., Buleva E. A. *Organizatsiya stroitel'stva zhilykh kompleksov s uchetom trebovaniy energoeffektivnosti* [Organization of residential complexes construction with due account of energy efficiency requirements]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 6 (65), pp. 140–146.

13. Chelnokova V. M. *Osobennosti kalendarnogo planirovaniya kompleksnogo osvoeniya territoriy developmentskoy organizatsiei* [Features of calendar scheduling of complex development of the territory by the development organization]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 3 (56), pp. 136–141.