УДК 69.003:658.012.22

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-2-122-127

© С. А. Болотин, д-р техн. наук, профессор

© А. Х. Дадар, канд. техн. наук, доцент

© А. Р. Мальсагов, аспирант

(Санкт-Петербургский государственный

архитектурно-строительный университет)

E-mail: sbolotin@mail.ru, daryi@mail.ru, inafr@mail.ru

© S. A. Bolotin, Dr. Sci. Tech., Professor

© A. Kh. Dadar, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© A. R. Malsagov, post-graduate student

(Saint Petersburg State University of Architecture

and Civil Engineering)

E-mail: sbolotin@mail.ru, daryi@mail.ru, inafr@mail.ru

ЭКСПЕРТНАЯ МЕТОДИКА УСРЕДНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗНЫМИ МЕТОДАМИ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМИ СРЕДСТВАМИ

EXPERT TECHNIQUE OF AVERAGING THE MEASUREMENT RESULTS OBTAINED BY VARIOUS METHODS AND TOOLS

Прогнозирование продолжительности строительства является актуальной задачей строительного производства, поскольку по результатам такого прогноза осуществляется регулирование хода строительства, что в конечном итоге определяет эффективность достижения намеченного срока сдачи объекта в эксплуатацию. В современной практике, ориентированной на решение подобного рода задач, используются различные методические подходы, но при этом результаты их решения характеризуются неоднородным качеством. Для принятия обобщенного вывода, основанного на использовании различных результатов, необходим обобщающий анализ существующих методов прогнозирования сроков строительства. Рассматриваются методические особенности современных подходов и анализируются связанные с ними достоинства и недостатки.

Ключевые слова: прогноз продолжительности строительства, несвоевременность выполнения работ, усреднение оценок прогноза строительства.

Forecasting the construction duration is an urgent task of construction production, as the regulation of the construction is done in accordance with its results. This ultimately determines the effectiveness of achieving the target date of the construction object's commissioning. In modern practice focused on solving such problems, various methodological approaches are used, but the results of applying them are characterized by heterogeneous quality. To adopt a generalized conclusion based on using different results, a generalized analysis is needed which would highlight the existing methods of forecasting the construction duration period. Methodical features of modern approaches are considered, and relevant advantages and disadvantages of these approaches are analyzed.

Keywords: construction duration forecasting, untimely execution of works, averaging the estimates of construction forecast.

Инструментальные средства измерения являются наиболее объективным видом контроля качества работ, выполняемых в процессе реализации строительного производства. Однако выбор адекватного средства измерения зависит от многих факторов, в частности, от меры ответственности, связанной с использованием конкретных

результатов измерений. Технический регламент по безопасности зданий¹ предписывает обеспечение механической безопасности здания как в процессе его эксплуатации, так и при организации строительного производства. Поэтому для

¹ Федеральный закон Российской Федерации от 30 декабря 2009 г. «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» № 384-ФЗ.

оценки прочности бетона разработан ГОСТ, который регламентирует правила проведения соответствующего инструментального контроля². При контроле прочности бетона могут быть использованы различные методы, например, методы определения прочности по контрольным образцам³, или различные способы неразрушающего контроля⁴. При этом в ходе строительства фиксируются параметры процессов, связанных с производством бетонных работ, а их регламентация должна соответствовать нормативам по ведению исполнительной документации [1], которые определяют формы журналов.

Может иметь место и другая цель измерений. Считается, что требование прочности бетона удовлетворено, если его измеренное значение будет не меньше требуемого. Однако общеизвестно, что чем больше оказалось значение фактической прочности, тем больше было затрачено соответствующих ресурсов. В результате возникла неоправданно высокая прочность, и это обстоятельство, как правило, должно быть доказано разными методами измерений. Анализ организации строительства в США, представленный в монографии [2], показывает, что подобного рода факты являются недопустимыми и зачастую рассматриваются как предмет хозяйственного спора между участниками строительства.

Измерительные задачи, связанные с анализом выбора средств измерения, возникают и при эксплуатации зданий и сооружений. Так, например, в положении по техническому обследованию жилых зданий⁵ представлен целый список альтернативных средств измерений для таких характеристик внутреннего воздуха, как температура, влажность и подвижность. Например, для измерения влажности воздуха могут быть применены либо гигрометр, либо психрометр, которые до проведения измерений должны пройти метрологическую поверку [3]. Однако несмотря на это, работают они все же на разных физических принципах и поэтому потенциально могут давать разные показания. Аналогичная с точки

зрения усреднения показаний измерительная проблема имеет место и при определении подвижности воздуха, которая осуществляется либо крыльчатым анемометром, либо с помощью термоанемометра. При измерении теплового потока, величина которого определяет термическое сопротивление ограждающей строительной конструкции, разница результатов применяемых методов еще более ощутима. Часть таких приборов основана на непосредственном кондуктометрическом способе фиксации теплового потока. Другая часть приборов, объединенных под общим термином «тепловидение», основана на дистанционной фиксации инфракрасного излучения. И если условия измерения не позволяют использовать более точный прибор, возникает необходимость в некотором усреднении разнородных измерений, субъективная степень доверия к которым может существенно отличаться.

Таким образом, в ряде практических случаев при оценке качества строительных работ и конструкций результаты измерения, полученные в разных местах, разными методами и инструментальными средствами, требуют разработки дополнительной методики усреднения. Специфика обсуждаемых условий измерений такова, что усреднение обычно проводится для небольшого числа используемых методов. Поэтому методика усреднения должна быть ориентирована на малую выборку, и это переводит поставленную задачу в категорию задач непараметрической статистики⁶. С учетом сделанных замечаний предлагается построить конструктивное решение данной задачи на основе экспертной оценки значимостей результатов, полученных на основе применения разных измерительных методов.

В настоящее время экспертная оценка значимостей различных объектов строительной отрасли достаточно широко представлена в научной литературе, например, общие вопросы применения экспертных систем в Великобритании [4], измерительная система, связанная с оценкой знаний на основе экспертного индекса [5], сложность многокритериальной оценки в области реновации недвижимых объектов [6]. Более ранняя монография одного из авторов последней упомянутой статьи посвящена экспертным ме-

² ГОСТ 18105–2010. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.

³ ГОСТ 10180–2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.

⁴ ГОСТ 22690–88. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля.

⁵ ВСН 57–88(р). Положение по техническому обследованию жилых зданий.

⁶ URL: <http://hr-portal.ru/statistica/gl13/gl13.php> (дата обращения: 10.12.2017).

тодам, используемым в проблеме комплексной оценки и выборе ресурсосберегающих решений в строительстве [7]. Обобщение различных по содержанию методов экспертных оценок можно найти в работе [8]. Однако для решения поставленной нами задачи требуется выбор более конкретного и адекватного подхода, который, в частности, позволил бы оценить дополнительную погрешность, связанную с результатами экспертизы. Поэтому в качестве основы излагаемой ниже методики укажем на следующую базовую научную статью [9].

В данной статье приведена формула расчета усредненного показателя качества K для некоторого объекта организационного проектирования, оцениваемого множеством показателей. В усредненную оценку качества организационного объекта входят частные (дифференциальные) показатели качества K_i и соответствующие им весовые множители W_i , определяемые с помощью экспертного оценивания:

$$K = \sum_{i=1}^n K_i W_i, \quad (1)$$

где i, n — порядковый индекс и общее число показателей качества.

Аналогия по отношению к поставленной нами задаче заключается в том, что входящие в формулу (1) отдельные показатели качества могут рассматриваться в качестве измеренных величин, полученных на основе разных методов. В этом случае экспертные оценки весов будут показывать значимости этих величин, измеренных разными способами. При рассмотрении вопроса, связанного с экспертной оценкой весов отдельных показателей качества, используются различные измерительные шкалы [10]. Обычно каждый отдельный показатель может быть сопоставлен некоторой норме таким образом, что при сравнении с ней он может быть оценен в лингвистической шкале типа «лучше — хуже».

В научной статье [11] при расчете значимостей отдельных показателей используется шкала отношений, а экспертная вербальная оценка этих отношений осуществляется в порядковой шкале, которая при парном сравнении весов [12] позволяет оценить соотношения весов в виде неравенств. Такое представление как раз и является источником погрешности аддитивного показателя качества, представленного в работе [9].

В практическом плане определение погрешностей оценки дает возможность корректного представления усредненной оценки измерения, проведенного разными методами и средствами.

Рассмотрим следующую ситуацию. Допустим, что эксперт оценивает результаты, полученные по трем методам измерения. Его ответы соответствуют следующему ранговому ряду: $W_1 \geq W_2 \geq W_3$. Используя нормировку на сумму весов $W_1 + W_2 + W_3 = 1$ в качестве уравнения, исключающего неизвестное W_3 , на рис. 1 показана двумерная геометрическая интерпретация приведенных выше ответов.

Согласно рис. 1, область допустимых значений весов ограничена тремя неравенствами, образующими соответствующий треугольник. Очевидно, что для четырех весов область допустимых решений определится тетраэдром с четырьмя вершинами, а для пяти и более весов число вершин будет определяться числом оцениваемых показателей.

В представленной графической интерпретации ответов эксперта важным является то, что все вершины области допустимых решений представляют собой выпуклое множество.

Допустим, имеются следующие численные значения результатов измерения прочности бетона на сжатие. Прочность, определенная по отрыву со скалыванием, соответствует $K_1 = 32,3$ МПа, прочность, определенная на кернах, $K_2 = 35,9$ МПа, а прочность по ультразвуковому методу $K_3 = 30,8$ МПа. При этом эксперт оценил, что самым значимым является измерение по первому методу, затем по второму и третьему. Тогда, определяя значения усредненного показателя в вершинах треугольника по формуле (1), получаем следующее множество результатов: $K(1,0,0) = 32,3$ МПа, $K(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0) = 34,1$ МПа, $K(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}) = 33,0$ МПа. Полученный вариационный ряд изменяется от $K_{\min} = 32,3$ до $K_{\max} = 34,1$ МПа. Заметим при этом, что при данной экспертной оценке относительных значимостей каждого метода измерений диапазон возможных изменений оказался меньше исходного размаха средних значений, представляющих каждый метод.

Следует отметить, что приведенные выше расчетные значения можно получить, решая две задачи линейного программирования, одна из

Рис. 1. Графическая интерпретация ответов эксперта

которых максимизирует функционал, определяемый формулой (1), а другая минимизирует тот же функционал. Поэтому на рис. 1 штриховыми линиями показаны два крайних положения целевой функции, а представленная система ограничений остается инвариантной по отношению к разным целевым функциям и для рассмотренного примера будет иметь вид:

$$\begin{aligned} W_1 &\geq W_2; \\ W_1 + W_2 &\leq 1; \\ W_1 + 2W_2 &\geq 1. \end{aligned} \quad (2)$$

Несмотря на потенциально точное определение границ экспертного оценивания усредненного показателя прочности бетона, его среднее значение будет зависеть от функции распределения. На определенных выше границах плотность распределения целевой функции равна нулю, а в промежуточной точке $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$ плотность распределения целевой функции достигает максимума, образуя треугольное распределение [13]. Максимальное значение функции плотности данного распределения определяется его размахом:

$$\max \langle f(K) \rangle = \frac{2}{K_{\max} - K_{\min}}. \quad (3)$$

Возрастающая и убывающая части будут определяться соответствующими линейными функциями. Важным является то, что в зависимости от значений измеренных величин параметры функции плотности распределения могут меняться от крайней левой асимметрии до крайней правой асимметрии. Однако в среднем можно использовать равномерное распределение, так как именно оно имеет максимальную энтро-

пию [14], которая в итоге ориентирует предлагаемую методику усреднения на получение предельно возможной погрешности. С учетом этого результат оценки может быть представлен в следующем виде: $K = 33,2 \pm 0,9$ (при доверительной вероятности, равной 1).

Дополним задачу ответами второго эксперта, которые соответствуют обратному (по отношению к ответам первого эксперта) ранговому ряду: $W_3 \geq W_2 \geq W_1$. На рис. 2 показаны области допустимых значений весов, определенных обоими экспертами.

Одно из трех неравенств $W_1 + W_2 \leq 1$ отражает факт того, что $W_3 \geq 0$, является общим, остальные же неравенства являются прямо противоположными и отражают объективный факт наличия противоречий в высказываниях экспертов.

Наличие противоречий, в частности, приводит к тому, что составная область допустимых значений весов уже не является выпуклой и к ней формально нельзя применить аппарат линейного программирования. Из этого следует, что необходима независимая обработка результатов оценки каждым экспертом, и только после нее можно переходить к сведению полученных результатов в единый показатель.

Определяя значения усредненного результата по ответам 2-го эксперта, получаем следующие величины: $K^{(2)}(0,0,1) = 30,8$, $K^{(2)}(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}) = 33,35$, $K^{(2)}(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}) = 33,0$ МПа. В результате ответов 2-го эксперта полученный вариационный ряд

Рис. 2. Геометрическая интерпретация ответов двух экспертов

изменяется от $K_{\min}^{(2)} = 30,8$ до $K_{\max}^{(2)} = 33,35$, а общий результат может быть представлен в виде $K^{(2)} = 32,1 \pm 1,3$ МПа.

Качество проведенной экспертизы можно оценить исходя из теоретических основ информационных процессов [14]. Начальная неопределенность измеренных значений определяется размахом исходных показаний $K_{\max} - K_{\min} = 35,9 - 30,8 = 5,1$ МПа. Первый эксперт уменьшил этот диапазон до 1,8 МПа, следовательно, он внес в систему объем информации, рассчитанный по следующей формуле:

$$I_1 = \frac{\ln \frac{5,1}{1,8}}{\ln 2} = 1,50 \text{ бит.} \quad (4)$$

Второй эксперт уменьшил исходный диапазон неопределенности до 2,6 МПа, следовательно, он внес в систему $I_2 = 0,97$ бит информации. Следовательно, для расчета общего среднего по результатам обработки оценочных мнений нескольких экспертов можно представить в виде средневзвешенного арифметического значения, рассчитываемого по следующей формуле:

$$\bar{K} = \frac{\sum_{j=1}^m K_j I_j}{\sum_{j=1}^m I_j}, \quad (5)$$

где j, m — порядковый индекс и общее число экспертов.

Для представленного демонстрационного примера общее среднее значение прочности бетона будет $(33,2 \cdot 1,50 + 32,1 \cdot 0,97) / (1,50 + 0,97) = 32,8$ МПа. Среднее значение объема информации $I_{\text{ср}}$, полученной от экспертов, рассчитывается как простое среднеарифметическое, и оно равно 1,24 бит. Тогда окончательная погрешность оценки средней прочности бетона будет определяться по формуле

$$\Delta = \frac{K_{\max} - K_{\min}}{2} \exp(-I_{\text{ср}} \ln 2). \quad (6)$$

Расчет погрешности для представленных выше данных дает величину погрешности $\Delta = 1,1$ МПа. В результате окончательный результат измерения прочности бетона с учетом мнений двух экспертов: $K_{\text{ср}} = 32,8 \pm 1,1$ МПа.

Таким образом, предлагаемая методика расчета усреднения результатов измерения, полученных разными методами и инструментальными

средствами, основанная на дополнительном учете экспертных оценок, позволяет получить среднее значение результатов измерения, его погрешность и количество информации, полученное в результате экспертизы.

Научная новизна изложенной в статье методологии заключается в комбинированном подходе к обработке результатов неравнозначных измерений, субъективные веса которых определяются экспертно, то есть субъективно, а использованный в методологии метод экспертной оценки дополнительно позволяет оценить качество экспертной оценки с помощью применения аппарата линейного программирования и информационной энтропии.

Библиографический список

1. Исполнительная документация в строительстве: справочное пособие / авт.-сост. А. Н. Летчфорд, В. А. Шинкевич. СПб.: Санкт-Петербургское отделение ООФ «Центр качества строительства», 2008. 586 с.
2. Дикман Л. Г., Дикман Д. Л. Организация строительства в США. М.: АСВ, 2004. 377 с.
3. Селиванов М. Н., Фридман А. Э., Кудряшова Ж. Ф. Качество измерений. Л.: Лениздат, 1987. 296 с.
4. Laptali E., Bouchlaghem N. M. Expert systems within the construction industry in the UK // Automation in Construction. 1995. Vol. 3. № 4. Pp. 321–325.
5. Park M., Lee H.-S., Kwon S. Construction knowledge evaluation using expert index // Journal of Civil Engineering and Management. 2010. Vol. 16. № 3. Pp. 401–411.
6. Tupenaite L., Zavadskas E. K., Turskis Z., Kaklauskas A., Seniut M. Multiple criteria assessment of alternatives for built and human environment renovation // Journal of Civil Engineering and Management. 2010. Vol. 16. № 2. Pp. 257–266.
7. Завадскас Э. К. Комплексная оценка и выбор ресурсосберегающих решений в строительстве. Вильнюс: Моклас, 1987. 210 с.
8. Орлов А. И. Организационно-экономическое моделирование: учебник. Ч. 2. Экспертные оценки. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 486 с.
9. Болотин С. А. Универсальная эмпирическая методика взвешивания показателей в организационном проектировании СМР // Строительство и архитектура. 1991. № 4. С. 65–70.
10. Болотин С. А., Дадар А. Х. Выбор чувствительности шкалы для оценки качества организации строительства // Строительство. 2010. № 9. С. 34–38.

11. Болотин С. А., Дадар А. Х. Определение погрешности квалитетической оценки весов аддитивных показателей качества календарных планов строительства // Строительство. 2010. № 2. С. 29–33.

12. Дэвид Г. Метод парных сравнений. М.: Статистика, 1978. 144 с.

13. Гусаков А. А., Ильин И. И., Куликов Ю. А., Журавлев О. Г. Руководство по разработке и применению вероятностных сетевых моделей в строительстве. М.: Госстрой СССР, ЦНИПИАС, 1979. 56 с.

14. Куликовский Л. Ф., Мотов В. В. Теоретические основы информационных процессов. М.: Высшая школа, 1987. 248 с.

References

1. Letchford A. N., Shinkevich V. A. *Ispolnitel'naya dokumentatsiya v stroitel'stve. Spravochnoe posobie* [Executive documentation in construction. Reference manual]. St. Petersburg, Tsentr kachestva stroitel'stva Publ., 2008, 586 p.

2. Dikman L. G., Dikman D. L. *Organizatsiya stroitel'stva v SShA* [Organization of construction in the USA]. Moscow, ASV Publ., 2004, 377 p.

3. Selivanov M. N., Fridman A. Eh., Kudryashova Zh. F. *Kachestvo izmereniy* [Quality of measurements]. Leningrad, Lenizdat Publ., 1987, 296 p.

4. Laptali E., Bouchlaghem N. M. Expert systems within the construction industry in the UK. *Automation in Construction*, 1995, vol. 3, no. 4, pp. 321–325.

5. Park M., Lee H.-S., Kwon S. Construction knowledge evaluation using expert index. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2010, vol. 16, no. 3, pp. 401–411.

6. Tupenaite L., et al. Multiple criteria assessment of alternatives for built and human environment renovation. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2010, vol. 16, no. 2, pp. 257–266.

7. Zavadskas Eh. K. *Kompleksnaya otsenka i vybor resursosberegayushchikh resheniy v stroitel'stve* [Complex

estimation and selection of resource saving solutions in construction]. Vil'nyus, Mokslas Publ., 1987, 210 p.

8. Orlov A. I. *Organizatsionno-ehkonomicheskoe modelirovanie. Uchebnik. Ch. 2. Ehkspertnye otsenki* [Organizational and economic modeling. Textbook. Part 2. Expert estimations]. Moscow, MGTU im. N. Eh. Baumana Publ., 2011, 486 p.

9. Bolotin S. A. *Universal'naya ehmpiricheskaya metodika vzveshivaniya pokazateley v organizatsionnom proektirovanii SMR* [Universal empirical method of calculating the indicators in SMR organizational design]. *Stroitel'stvo i arkhitektura – Construction and Architecture*, 1991, no. 4, pp. 65–70.

10. Bolotin S. A., Dadar A. Kh. *Vybor chuvstvitel'nosti shkaly dlya otsenki kachestva organizatsii stroitel'stva* [Selecting the sensitivity of the scale to assess the construction organization quality]. *Stroitel'stvo – Construction*, 2010, no. 9, pp. 34–38.

11. Bolotin S. A., Dadar A. Kh. *Opreделение pogreshnosti kvalimetricheskoy otsenki vesov additivnykh pokazateley kachestva kalendarnykh planov stroitel'stva* [Definition of errors in quality assessment scales of the additive indicators of construction project scheduling quality]. *Stroitel'stvo – Construction*, 2010, no. 2, pp. 29–33.

12. Dehvid G. *Metod parnykh sravneniy* [Method of paired comparisons]. Moscow, Statistika Publ., 1978, 144 p.

13. Gusakov A. A., Il'in I. I., Kulikov Yu. A., Zhuravlev O. G. *Rukovodstvo po razrabotke i primeneniyu veroyatnostnykh setevykh modeley v stroitel'stve* [Manual for development and application of probabilistic network models in construction]. Moscow, Gosstroy SSSR Publ., TsNIPIAS Publ., 1979, 56 p.

14. Kulikovskiy L. F., Motov V. V. *Teoreticheskie osnovy informatsionnykh protsessov* [Theoretical bases of information processes]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987, 248 p.