

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО МОДУЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

С.А. Сычев

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербурга

Изучены технические решения из объемных модулей различных типов и модификаций повышенной заводской готовности из комбинированных конструкций, что объясняется большим разнообразием проектов строительства. Формирование скоростного метода монтажа заключается, прежде всего, в поиске рациональных решений методами последовательного анализа организационно-технологической структуры. В статье количественно описаны составляющие данной структуры и формализован процесс выбора самых эффективных решений в соответствии с принятыми в исследовании критериями и рассматривается задача выбора оптимального решения из конечного числа технологий методом экспертных оценок. В результате исследования решены две научные задачи: во-первых, выявлены факторы, влияющие на совершенствование технологии скоростного возведения полносборных зданий; во-вторых, оценены важность и приоритетность данных факторов, влияющих на монтаж зданий из высокотехнологичных модулей.

Ключевые слова: быстровозводимые сооружения, скоростное строительство, блок-комнаты, блок-модули, модульные здания.

Рассматривается задача выбора оптимального экспертного решения из конечного числа технологий. Каждый эксперт имеет свою функцию предпочтения на множестве технологий. Для любой технологии X фиксировано некоторое число f , такое, что если за него подано голосов не меньше, чем это число, то она и будет исходом голосования. Это число будем далее называть критическим числом этой технологии.

Задача выбора оптимальной экспертной технологии имеет вид $R = (N, X)_{N_j}$ (f_j^m), где $N = \{1, \dots, n\} \in N$ – множество экспертов, $X = \{x_1, \dots, x_m\}$ – множество альтернативных технологий.

Для $i \in N$ $x_i > x_k$ означает, что для эксперта i технология x_k не лучше технологии x_i , $f_j \in \{0, \dots, n-1\}$; f_j – критическое число технологии x_j . Если за технологии x_j голосуют не меньше чем f_j экспертов, то x_j – коллективный выбор технологии [1–16].

Оптимальное решение из многообразия вариантов объемно-планировочных решений зданий может быть достигнуто по направлениям: вид и конструкция здания, технология, организация и механизация работ по его возведению полносборных зданий.

Каждый вариант представляет множество различных характеристик, таких как показатели эффективности (стоимость m^2 , оперативность монтажа, степень заводской готовности, трудозатраты по монтажу, затраты по транспортировке), критерии оптимальности (перекрываемый пролет, долговечность, удельный вес $1 m^2$ каркаса, удельный вес $1 m^2$ покрытия, геометрические размеры) и др.

В исследовании есть многокритериальная задача, основная трудность решения которой заклю-

чается в многообразии единиц измерения критериев строительства, поэтому задача исследования также устранить полидименсию и перейти к безразмерным единицам.

Переход в расчетах к безразмерным единицам, или так называемое нормирование показателей, может приводиться трансформацией шкалы по формулам:

$$\bar{x}_{ij} = \left(\frac{x_{ij}}{x_j^*} \right)^2, \text{ при } x_j^* = \max ; \quad (1)$$

$$\bar{x}_{ij} = \left(\frac{x_j^*}{x_{ij}} \right)^2, \text{ при } x_j^* = \min ,$$

где x_j^* – оптимальное значение для каждого показателя эффективности; x_{ij} – исходное значение каждого показателя; \bar{x}_{ij} – нормализованное значение.

Аналогично нормирование может быть произведено методом нормализации векторов:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, \quad (i=1, m; j=1, n). \quad (2)$$

Полученные по выражениям (1)–(2) значения не имеют размерностей, поэтому можно сравнивать нормализованные значения различных показателей.

Наилучшей величиной каждого разноразмерного показателя эффективности является наи-

большая. Преобразование может быть осуществлено по формулам (1), (2). Далее проводится преобразование матрицы решений, при котором определяются показатели

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}, \quad (\forall ij, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}). \quad (3)$$

Уровень энтропии E_j определяется для каждого показателя эффективности по следующей формуле:

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij}, \quad (i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}), \quad (4)$$

Уровень изменчивости j -го показателя на множестве выбираемых технологических решений строительного производства определяется:

$$d_j = 1 - E_j, \quad (j = \overline{1, n}). \quad (5)$$

Если все разноразмерные показатели эффективности одинаково важны, то весомость разноразмерных показателей эффективности определяется по формуле:

$$q_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}, \quad (j = \overline{1, n}). \quad (6)$$

Алгоритм определения весомости показателей представлен следующей последовательностью: преобразование исходных данных в матрицу принятия решений $P \rightarrow$ нормализация матрицы решения в матрицу $\bar{P} \rightarrow$ определение уровня энтропии E_j для всех показателей эффективности \rightarrow определение уровня изменчивости d_j показателей \rightarrow определение значимости (весомости) показателей эффективности q_j .

После всех преобразований матриц М1 и М2 результаты записываются в третью матрицу (М3) по закону сравнительных суждений: нормальным распределением обладают разности между оценками. Используя таблицу нормированного нормального распределения можно обратить наблюдаемые отношения P_{ij} (матрицу М2) в ожидаемые Z_{ij} :

$$G(Z_{ij}) = P_{ij} = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt + \int_{-\infty}^{Z_{ij}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (7)$$

Таким образом, в матрице М3, приравняв сумму $Z_{iоценок}$ единице, определяют величины значимости показателей эффективности.

Автор считает необходимым проверку согласованности оценки различных привлеченных специалистов, для достаточной надежности предложенного метода при необходимости исключать значения с большой несогласованностью. Блок-схема алгоритма приводится на рисунке.

Коэффициентом конкордации проверяется надежность экспертизы:

$$W = \frac{4}{k(k-1)} \sum_{i,j=1}^n \frac{C_{pij}^2}{n-(n-1)}, \quad (8)$$

где k – число экспертов; n – количество показателей эффективности;

$$Q = \sum_{ij} X_{ij}^2 - k \sum_{ij} X_{ij} + C_k^2 C_n^2, \quad (9)$$

$$\text{где } C_k^2 = \frac{K!}{2((K-1)!)}; \quad C_n^2 = \frac{N!}{2((N-1)!)}.$$

Значения коэффициента конкордации W от 0 до 1; $W=1$, если мнения экспертов полностью согласованы, если $W=0$, считается, что мнения экспертов не согласованы, и следует обратить на это внимание, либо заменить эксперта.

Расчет коэффициента можно произвести на ЭВМ, например в программах SPSS или Statistica. Автор может сделать вывод о том, что эксперты сходятся или расходятся в необходимости включения показателей отобранных вариантов.

При этом коэффициент конкордации не позволяет точно ответить на вопрос, какие из отобранных показателей оставить, а какие исключить, для ответа на этот вопрос автор рекомендует в дальнейшем дополнительно использовать значения коэффициента вариации.

Представленным исследованием определены направления совершенствования монтажа зданий из высокотехнологичных модулей и оценены важность и приоритетность данных факторов.

Автором в качестве экспертов привлекались преподаватели строительных вузов и высококвалифицированные технические специалисты. Согласованность, весомость факторов, достоверности оценок имеют постоянную динамику и требуют проверки.

Результаты анкетирования специалистов по определению первой задачи и определению факторов влияния приведены в таблице.

Выявлены система значимых факторов и их весомость, которые представлены в таблице. Приведенные наиболее важные факторы, по мнению опрошенных специалистов, показывают ценность способов монтажа полносборных зданий из объемных модулей с учетом выявленных показателей.

Факторы по результатам (см. таблицу) совершенствования технологий возведения полносборных зданий из объемных модулей:

- время монтажа;
- стоимость;
- трудозатраты по монтажу;
- долговечность.



Алгоритм метода экспертной оценки

Факторы, влияющие на совершенствование технологии возведения полносборных зданий, и их весомость

№ п/п	Технико-экономические показатели	Весомость
1	Трудозатраты монтажа, чел.-ч/м ²	0,15
2	Стоимость м ² (цены 2015 г.), \$/м ²	0,15
3	Время монтажа (100 м ²), дн.	0,15
4	Кол-во рабочих (100 м ²), чел.	0,05
5	Максимальная высота этажа, м	0,05
6	Перекрываемый пролет, м	0,05
7	Удельный вес 1 м ² каркаса, кг	0,03
8	Удельный вес 1 м ² покрытия, кг	0,05
9	Количество кранового оборудования, шт.	0,1
10	Затраты по транспортировке, балл	0,07
11	Долговечность, лет	0,15
		Σ = 1

Предложенный перечень факторов для разработки перспективной технологии монтажа зданий из высокотехнологичных модулей отражает наиболее важные из них. Весомость приведенных факторов – это научно-обоснованная база для совершенствования технических решений.

Выводы

1. Анализ весомости факторов технологичности на основе уровня энтропии рассмотренных показателей показал согласованность с результатами оценок экспертов, количественная оценка факторов влияния практически получена экспертным путем по данным таблицы, при этом значения весомости могут меняться от конкретных условий строительства.

2. Представленным исследованием определены направления совершенствования монтажа зданий из высокотехнологичных модулей и оценены важность и приоритетность данных факторов.

Литература

1. Верстов, В.В. Особенности проектирования и строительства зданий и сооружений в Санкт-Петербурге / В.В. Верстов, Г.М. Бадьин // *Вестник гражданских инженеров*. – 2010. – №1(22). – С. 96–105.
2. Адам, Ф.М. Совершенствование технологии строительства модульных быстровозводимых малоэтажных зданий: дис. ... канд. техн. наук / Ф.М. Адам. – СПб.: СПбГАСУ, 2001. – 154 с.
3. Байбурин, А.Х. Качество и безопасность строительных технологий: моногр. / А.Х. Байбурин, С.Г. Головнев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 453 с.
4. Матвеев, Е.П. Теория, методы и технологии реконструкции жилых зданий различных периодов постройки: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Е.П. Матвеев. – М.: МГСУ, 2000. – 48 с.
5. Афанасьев, А.В. Организация строительства быстровозводимых зданий и сооружений. Быстровозводимые и мобильные здания и сооружения: перспективы использования в современных условиях / А.В. Афанасьев, В.А. Афанасьев. – СПб.: Стройиздат, 1998. – С. 226–230.
6. Сычев, С.А. Технология ускоренного возведения мансард. Высокотехнологичный способ надстройки зданий и сооружений / С.А. Сычев. – LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, Germany, 2011. – 151 p.
7. Теория и практика использования быстровозводимых зданий / А.Н. Асаул, Ю.Н. Казаков, В.Л. Быков и др. – СПб.: Гуманитика, 2004. – 463 с.
8. Бадьин, Г.М. Современные технологии строительства и реконструкции зданий / Г.М. Бадьин, С.А. Сычев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2013. – 288 с.
9. Бадьин, Г.М. Технология монтажа быстровозводимых конструкций / Г.М. Бадьин, С.А. Сычев // *Вестник гражданских инженеров*. – 2008. – № 3. – С. 56–61.
10. Fudge, J. Prefabricated modular concrete construction / J. Fudge, S. Brown // *Building engineer*. – 2011. – 86(6). – P. 20–21.
11. Staib, G. Components and systems: Modular construction: Design, structure, new technologies / G. Staib, A. Dörrhöfer, M. Rosenthal. – Institut für internationale Architektur-Dokumentation, München, 2008. – 34 p.
12. Knaack, U. Prefabricated systems: Principles of construction / U. Knaack, Sh. Chung-Klatte, R. Hasselbach. – De Gruyter, 2012. – 67 p.
13. Wang, Y. Cost-effectiveness assessment of insulated exterior wall of residential buildings in cold climate / Y. Wang, Z. Huang, L. Heng // *International Journal of Project Management*. – 2007. – 25(2). – P. 143–149.
14. Head, P.R. Construction materials and technology: A Look at the future / P.R. Head // *Proceedings of the ICE – Civil Engineering*. 2001. – 144(3). – P. 113–118.
15. Swamy, R.N. Holistic design: key to sustainability in concrete construction / R.N. Swamy. – *Proceedings of the ICE – Structures and Buildings*. – 2001. – 146(4). – P. 371–379.
16. Lawson, R.M. Modular design for high-rise buildings / R.M. Lawson, J. Richards // *Proceedings of the ICE – Structures and Buildings*. – 2010. – 163(3). – P. 151–164.

Сычев Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Санкт-Петербург), sasychev@ya.ru

Поступила в редакцию 5 октября 2015 г.

THE ANALYSIS OF FACTORS OF HIGH-SPEED UNIT CONSTRUCTION TECHNOLOGY ADVANCEMENT

S.A. Sychev, tsp@spbgasu.ru

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russian Federation

The paper deals with engineering solutions from modules of different types and modifications of advanced factory readiness from composite structures. It's explained by a large variety of construction projects. The formation of a time-saving method of construction consists in the search of rational solutions by time-series techniques on the organizational and technological structure. The author describes in terms of quantity components of this structure. The process of selecting the most effective solutions according to the accepted in the study criteria is formalized. The problem of choosing an optimal solution from the finite number of technologies by the expert evaluation method is considered. As a result of the research study two scientific problems are solved. First of all, the factors which influence the advancement of high-speed erection of prefabricated buildings are specified. Secondly, the importance and priority of these factors effecting the building installation from high-tech units are appreciated.

Keywords: prefabricated structures, rapid construction, room units, block-modules, modular buildings.

References

1. Verstov V.V., Bad'in G.M. [Features of the design and construction of buildings and structures in St. Petersburg]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of civil engineers]. St. Petersburg, 2010, no. 1(22), pp. 96–105. (in Russ.).
2. Adam F.M. *Sovershenstvovanie tekhnologii stroitel'stva modul'nykh bystrovozvodimykh maloetazhnykh zdaniy*. Kand. diss. [Improving the technology of modular construction of prefabricated low-rise buildings. Cand. sci. diss]. St. Petersburg, 2001. 154 p.
3. Bayburin A.Kh., Golovnev S.G. *Kachestvo i bezopasnost' stroitel'nykh tekhnologiy: monografiya* [Quality and safety in construction industry technologies: monography]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2006. 453 p.
4. Matveev E.P. *Teoriya, metody i tekhnologii rekonstruktsii zhilykh zdaniy razlichnykh periodov postroyki*. Avtoref. dokt. diss. [Theory, methods and technologies of reconstruction of residential buildings of different periods built. Abstract of doct diss.] Moscow, 2000. 48 p.
5. Afanas'ev A.V., Afanas'ev V.A. *Organizatsiya stroitel'stva bystrovozvodimykh zdaniy i sooruzheniy. Bystrovozvodimye i mobil'nye zdaniya i sooruzheniya: perspektivy ispol'zovaniya v sovremennykh usloviyakh*. [Organization of construction of prefabricated buildings and structures. Prefabricated and mobile buildings and structures: prospects of use in modern conditions]. St. Petersburg, Strojizdat Publ., 1998, pp. 226–230.
6. Sychev S.A. *Tekhnologiya uskorennoogo vozvedeniya mansard. Vysokotekhnologichnyi sposob nadstroiki zdaniy i sooruzheniy* [Mansard roof accelerated erection technique. High-tech way of superstructure of buildings and structures]. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011, 151 p. (in Russ.)
7. Asaul A.N., Kazakov Yu.N., Bykov V.L., Knyaz' I.P., Erofeev P.Yu. *Teoriya i praktika ispol'zovaniya bystrovozvodimykh zdaniy* [Theory and practice of using prefabricated buildings]. St. Petersburg, Gumanistika Publ., 2004. 463 p.
8. Bad'in G.M., Sychev S. A. *Sovremennye tekhnologii stroitel'stva i rekonstruktsii zdaniy* [Advanced technologies of buildings erection and reconstruction]. St. Petersburg, BHV-Saint Petersburg Publ., 2013. 268 p.
9. Bad'in G.M., Sychev S.A. [Technology of installation of pre-fabricated structures], *Nauchno-tekhnicheskii zhurnal «Vestnik grazhdanskikh inzhenerov»* [The Journal "Bulletin of civil engineers"]. St. Petersburg, 2008, no. 3, pp. 56–61. (in Russ.).
10. Fudge J., Brown S. Prefabricated modular concrete construction. *Building engineer*, 2011, no. 86(6), pp. 20–21.
11. Staib G., Dörrhöfer A., Rosenthal M. Components and systems: Modular construction: Design, structure, new technologies. *Institut für internationale Architektur-Dokumentation*. München, 2008, 34 p. DOI: 10.11129/detail.9783034615662.
12. Knaack U., Chung-Klatte Sh., Hasselbach R. Prefabricated systems: Principles of construction. *De Gruyter*, 2012, 67 p. DOI: 10.1515/9783034611404.

13. Wang Y., Huang Z., Heng L. Cost-effectiveness assessment of insulated exterior wall of residential buildings in cold climate. *International Journal of Project Management*, 25(2), 2007, pp. 143–149. DOI: 10.1016/j.ijproman.2006.09.007.
14. Head P.R. Construction materials and technology: A Look at the future. *Proceedings of the ICE. Civil Engineering*, 2001, no. 144(3), pp. 113–118. DOI: 10.1680/cien.2001.144.3.113.
15. Swamy R.N. Holistic design: key to sustainability in concrete construction. *Proceedings of the ICE. Structures and Buildings*, 2001, no. 146(4), pp. 371–379. DOI: 10.1680/stbu.2001.146.4.371.
16. Lawson R.M., Richards J. Modular design for high-rise buildings. *Proceedings of the ICE. Structures and Buildings*, 2010, no. 163(3), pp. 151–164. DOI: 10.1680/stbu.2010.163.3.151.

Received 5 October 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Сычев, С.А. Исследование факторов совершенствования технологий высокоскоростного модульного строительства / С.А. Сычев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 35–40. DOI: 10.14529/build160105

FOR CITATION

Sychev S.A. The Analysis of Factors of High-Speed Unit Construction Technology Advancement. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2016, vol. 16, no. 1, pp. 35–40. (in Russ.). DOI: 10.14529/build160105
