

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СТРОИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ

---

---

УДК 728.2

## МОДЕЛЬ ПОТЕНЦИАЛА ПРОИЗВОДСТВА КРОВЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЖИЛЫХ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ

*А. А. Ланидус, А. Н. Макаров*

*Московский государственный строительный университет (Россия)*

Потенциал эффективности организационно-технологических и управленческих решений строительного объекта позволяет оценить его состояние и развитие. Интегральный организационно-технологический потенциал – это сложная система. В настоящее время ведется исследование потенциала строительного объекта, для чего используются различные методы системного анализа. В представленной работе обозначены структура и модель потенциала производства кровельных конструкций жилых многоэтажных зданий. Первый уровень структуры содержит подсистемы: строительные-монтажные работы, проектные работы и управление проектом. На втором уровне расположены основные критерии оценки: объем работ, время, себестоимость, безопасность, гибкость, ресурсосбережение и качество. Третий уровень включает в себя параметры модели: климатические условия, информационная технология, подача и складирование материалов, строительный контроль, квалификация рабочих и инженеров, готовность фронта работ, количество и качество материальных ресурсов, количество рабочих. В ходе структурно-функционального анализа были исключены параметры «Складирование», «Подача» и «Готовность фронта работ». Обработка результатов эксперимента – квалиметрической экспертизы – подтвердила принятые решения, исключив дополнительно параметры «Количество рабочих», «Качество» и «Количество материальных ресурсов». Исходя из установленных корреляционных связей критерии «Объем», «Время» и «Себестоимость» были объединены в один – «Эффективность». Для формализации полученной системы использовались методики моделирования факторных систем и многокритериальной оптимизации. Установлен общий математический закон формирования потенциала, предложен переход от качественных характеристик показателей к числовым индексам. Следующий этап формализации системы – нахождение весовых коэффициентов критериев оценки строительного процесса, параметров модели относительно каждого критерия, а затем – относительно цели.

**Ключевые слова:** интегральный организационно-технологический потенциал, кровельные конструкции, модель, структура потенциала, критерий оценки, строительные-монтажные работы, квалиметрическая экспертиза, системный подход, оптимизация строительного процесса.

The efficiency potential of organizational, technological and management solutions of a construction object allows you to evaluate its condition and development. Integrated organizational and technological capabilities is a complex system. Currently under the research capacity building project, which uses various methods of system analysis. In this work indicated the structure and model of the production potential of roof structures of residential buildings. The first level of the structure contains subsystems: construction and Assembly works, design works and project management. The second level is the main evaluation criteria: amount of work, time, cost, security, flexibility, efficient use of resources and quality. The third level includes the model parameters: climatic conditions, information technology, supply and warehousing of materials, construction supervision, qualification of workers and engineers, the willingness of the scope of work, the quantity and quality of material resources, the number of workers. During the structural-functional analysis were excluded settings "Storage", "Supply" and "Ready front". Processing of the results of the former experiment – qualitative examination confirmed the decisions taken, excluding the advanced settings for "Number of workers", "Quality" and "Quantity of material resources". Based on the established correlation criteria "Volume", "Time" and "Cost" were combined into a single "Efficiency". To formalize the system, we used methods of modeling of factor systems and multi-criteria optimization. There is a General mathematical law of formation of the potential, the transition quality indicators to numeric indexes. The next stage of formalization systems – is finding the weights of the evaluation criteria of the construction process, the model parameters for each criterion, and then relative to the target.

**Keywords:** *integrated organizational and technological capabilities, roof structure, model, structure of potential, assessment criterion, construction and installation works, quality control, systematic approach, optimization of the building process.*

Потенциал эффективности организационно-технологических и управленческих решений (ОТУР) строительного объекта [1] комплексный термин, характеризующий состояние строительного объекта и его возможное дальнейшее развитие исходя из принятых организационно-технологических решений. ОТУР позволяет рассматривать строительный объект как единство отдельных организационных и управленческих факторов, взаимодействующих между собой, с определенной степенью влияния на конечный результат. В основе данного свойства лежит фундаментальное понятие – системность. ОТУР является результатом представления строительного объекта как сложной системы, имеющей структуру, закономерности, связи и развитие.

Как любая сложная система, ОТУР строительного объекта имеет многоуровневую структуру, в вершине которой - интегральный потенциал строительного объекта, на следующем уровне – подсистемы, единичные интегральные потенциалы: строительной площадки, экологической нагрузки [2], строительной компании [3], проектных решений [4, 5], производственного процесса. Каждая подсистема при дальнейшей декомпозиции разбивается на компоненты. В частности, подсистема организационно-технологических решений (ОТР) производственного процесса строительного объекта включает ОТР производства отдельной строительной продукции: несущие, ограждающие, кровельные конструкции, отделочные поверхности, инженерные сети и т. д.

В настоящее время ведется исследование потенциала строительного объекта [1–7], для чего используются различные методы системного анализа и многокритериальной оптимизации [8]. В ходе научной работы над формализацией интегрального потенциала строительного объекта были исследованы единичные интегральные потенциалы экологической нагрузки, строительной площадки, эффективности строительной компании, безопасности строительного производства [9]. Данная статья посвящена исследованию единичного интегрального потенциалу ОТР производства кровельных конструкций жилых многоэтажных зданий, что является еще одной ступенью на пути к структурно-параметрическому синтезу потенциала эффективности ОТУР строительного объекта.

Для решения поставленной проблемы выделим структуру исследуемого объекта. В табл. 1 вершина иерархического древа – системообразующий фактор – потенциал строительного производства кровельных конструкций.

С помощью декомпозиции на I уровне детализации получим подсистемы – относительно независимые части, обладающие свойствами и закономерностями системы.

На II уровне выделены основные критерии, по которым оценивается соответствие функционирования системы заданному результату. Наличие нескольких критериев оценки формирует многостороннее исследование объекта, а представление системы становится наиболее приближено к реальному процессу.

На основе морфологического анализа систем выявим максимально полный список параметров подсистемы СМР и расположим их на III уровне иерархии. Изучение совокупности влияния данных компонентов на вершину системы является целью исследования.

Объем работ, продолжительность строительства, себестоимость проекта определяющие параметры при управлении и организации производственного процесса любой строительной продукции в условиях рыночной экономики.

Качество строительного производства важнейший критерий, который отвечает за надежность и долговечность строительной продукции, за безопасность и комфорт ее потребителей, ее конечную стоимость, а следовательно, рентабельность всего проекта [10]. Также наряду с эффективностью является основным критерием сдачи-приемки выполненных работ.

Безопасность строительного процесса занимает особое место. Подход к оценке организации и технологии производства любой строительной продукции невозможен без учета данного критерия. Нарушение техники безопасности, в том числе пожарной, помимо наибольших потерь по всем критериям приводит к невосполнимым последствиям – человеческим жертвам.

Гибкость строительного процесса определяет его универсальность, способность адаптироваться к случайным изменениям. Актуальное свойство в виду нестабильности и вероятностного характера как внешних, так и внутренних условий строительства.

Ресурсосбережение – важный критерий производственного процесса, определяющий его оптимизацию [11]. Данный принцип способствует развитию строительной отрасли, совершенствованию ее технологий и организации, созданию новых материалов, машин и механизмов.

Таблица 1

Структура организационно-технологического потенциала  
производства кровельных конструкций

<i>I уровень (Подсистемы)</i>	<i>II уровень (Критерии)</i>	<i>III уровень (Параметры)</i>
СМР	Объем работ	Климатические условия
	Время	Информационная технология
		Складирование материалов
Проектные работы	Себестоимость	Строительный контроль
	Безопасность	Квалификация рабочих и ИТР
	Гибкость	Количество материальных ресурсов
Управление проектом	Ресурсосбережение	Готовность фронта работ
		Качество материальных ресурсов
		Подача материалов
	Качество	Количество рабочих

Продолжительность, себестоимость и качество производства строительных работ в первую очередь связаны с количеством и качеством трудовых ресурсов. Профессионализм каждого участника строительства, начиная с кровельщика и заканчивая менеджером проекта, способствует приращению потенциала по всем критериям. Аналогичный эффект дает увеличение количества звеньев в цепочке контроля качества [12]. Подтверждением последнего служит определение эмерджентности систем – по мере увеличения числа уровней степень целостности системы возрастает. Так, можно представить контроль качества – аддитивным критерием некоторой системы, а

участников строительного контроля (от государственного надзора до бригадира) по мере влияния расположить на соответствующих уровнях данной системы.

Информационная технология строительного производства включает в себя с одной стороны – хранение, передачу и переработку информации, с другой – проектную, нормативную, исполнительную, уставную и разрешительную документации [13]. Уровень применения информационной технологии при производстве работ является важным показателем любого строительного проекта [14].

Материальные ресурсы в строительстве влияют на себестоимость, качество, безопасность производственного процесса. Количество и качество строительных материалов, инструментов, инвентаря должно соответствовать проекту и способствовать рациональному производству работ.

Взаимодействие исследуемой системы с внешней средой представлено параметром климатические условия. Климатические условия непосредственно воздействует на производительность, качество, стоимость строительства [15].

Степень готовности фронта работ отражает организационно-технологическую увязку разнородных строительных процессов в реальном времени, оказывает прямое влияние на продолжительность строительства и его стоимость.



*Рис. 1. Модель организационно-технологического потенциала кровельных конструкций*

Полученная система обладает слабыми связями – элементы нижних уровней подчинены нескольким компонентам верхних. В ходе структурно-функционального анализа были исключены параметры «Складирование», «Подача» и «Готовность фронта работ». Обработка результатов эксперимента – квалиметрической экспертизы – подтвердила принятые решения,

исключив дополнительно параметры «Количество рабочих», «Качество» и «Количество материальных ресурсов». Квалиметрическая экспертиза включала в себя отбор экспертной группы, в которую вошли деятели различных сфер строительства, и анкетный опрос экспертов. Анкета состояла из двух таблиц: в первой эксперту предлагалось ранжировать 10 выявленных параметров в зависимости от степени влияния на СМР по каждому из критериев. Во второй таблице эксперт попарно сравнивал критерии по аналогии с методом Т. Саати. Исходя из установленных корреляционных связей были объединены критерии «Объем», «Время» и «Себестоимость» в один – «Эффективность». На данном этапе исследования система принимает следующий вид (рис. 1).

Для формализации полученной системы воспользуемся методиками моделирования факторных систем и многокритериальной оптимизацией. Пусть существует некоторая функция

$$y = f(q_n), \quad (1)$$

характеризующая изменение системообразующего фактора – целевая функция исследуемой системы, которую можно представить в виде

$$y = f(q_1, q_2, \dots, q_n), \quad (2)$$

где  $\{q_1, q_2, \dots, q_n\}$  – совокупность показателей системы, от которых зависит достижения критерия оптимальности.

Предположим, что зависимость между показателями линейная. Тогда выражение (2) приобретает вид

$$P_{rc} = \sum_{i=1}^n q_i = q_1 + q_2 + \dots + q_n, \quad (3)$$

где  $P_{rc}$  – единичный интегральный организационно-технологический потенциал кровельных конструкций (Potential Roof Constructions).

Показатели  $\{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ , объединенные в систему, утрачивают свою самостоятельность и часть свойств, но приобретают новые, присущие рассматриваемой системе – закономерность целостности системы (эмерджентность). Частичным решением данной проблемы служит введение весовых коэффициентов, характеризующих меру влияния каждого компонента на достижение результата в свете принятых критериев.

Пусть  $w_i$  – весовой коэффициент, соответствующий  $i$ -му показателю, тогда выражение (3) примет вид

$$P_{rc} = \sum_{i=1}^n w_i q_i = w_1 q_1 + w_2 q_2 + \dots + w_n q_n, \quad (4)$$

При постепенной формализации системы важнейшим вопросом становится однородное математическое представление показателей  $q_i$ , несущих в себе различные качественные характеристики объекта исследования. Решением является выделение 3-х уровней варьирования общих для всех компонентов системы (табл. 2–6).

Таблица 2

## Контроль качества

<i>Качественная оценка</i>	<i>Числовой индекс</i>
Рабочие + бригадир + прораб	-1
Рабочие + бригадир + прораб + технический надзор	0
Рабочие + бригадир + прораб + технический надзор + авторский надзор + государственный надзор	+1

Таблица 3

## Квалификация рабочих и ИТР

<i>Качественная оценка</i>	<i>Числовой индекс</i>
Рабочие имеют незначительный опыт по данным видам работ; низкая квалификация ИТР	-1
Квалифицированные рабочие; квалифицированные ИТР	0
Высоко квалифицированные и опытные рабочие; квалифицированные и опытные ИТР	+1

Таблица 4

## Информационная технология

<i>Качественная оценка</i>	<i>Числовой индекс</i>
Проект и нормативная документация	-1
Проект и нормативная документация, журналы работ, учета ресурсов, инструктажей, исполнительная и уставная документация	0
Проект и нормативная документация, журналы работ, учета ресурсов, инструктажей, исполнительная и уставная документация, технологические карты на строительные процессы, фотоконтроль, применение информационных технологий для переработки, хранения и передачи информации (электронный документооборот)	+1

Таблица 5

## Климатические условия

<i>Качественная оценка</i>	<i>Числовой индекс</i>
Зимний период	-1
Осенне-весенний период	0
Летний период	+1

Таблица 6

## Оценка по выполнению всех мероприятий по проведению работ в определенных погодных условиях

<i>Качественная оценка</i>	<i>Числовой индекс</i>
Мероприятия не выполняются	-1
Мероприятия выполняются частично либо с нарушениями	0
Мероприятия выполняются	+1

Зимний период – наиболее отрицательный период для эффективности, качества, безопасности производственного процесса. Производственный процесс при отрицательных температурах сопровождается дополнительными трудовыми и экономическими затратами (мероприятия по проведению работ при отрицательных температурах), снижением производительности труда и качества конечной продукции.

Осенне-весенний период – имеется в виду ранневесенний и позднеосенний периоды с избыточными осадками и возможными отрицательными температурами - производственный процесс при повышенной влажности сопровождается дополнительными трудовыми и экономическими затратами (подготовка поверхностей).

Летний период – наиболее благоприятный период для эффективности, качества, безопасности производственного процесса.

Производственный процесс при повышенной температуре окружающего воздуха и продолжительном воздействии прямых солнечных лучей сопровождается незначительными дополнительными трудовыми и экономическими затратами (мероприятия по проведению работ в условиях жаркого климата).

Следующий этап формализации системы – нахождение весовых коэффициентов критериев оценки строительного процесса, параметров модели относительно каждого критерия, а затем – относительно цели. Далее необходимо выявить характер функционирования системы, установить взаимодействия компонентов друг с другом, определить результат их сочетания. Дальнейшее исследование системы состоит в более глубокой обработке результатов эксперимента.

В представленной работе обозначены структура и модель потенциала производства кровельных конструкций жилых многоэтажных зданий, определено его место в общей модели потенциала строительного объекта. Изложено значение каждого элемента системы, с помощью математического моделирования выведен основной закон взаимодействия компонентов исследуемой системы. Проведен анализ структуры системы, сделаны первые выводы из обработки результатов эксперимента, способствующие уточнению модели. В заключении показан переход от различных абстрактных описаний качественных характеристик показателей системы к их однородному математическому представлению. В данной статье заложено начало будущей научной работы, посвященной оптимизации организации строительного производства кровельных конструкций, а также способствующей формированию общего потенциала ОТУР строительного объекта в целом.

#### **Список литературы**

1. Лapidус А. А. Потенциал эффективности организационно-технологических решений строительного объекта // Вестник МГСУ. 2014. № 1. С. 175–180.



2. Бережный А. Ю. Формирование информационной базы данных для системы оценки экологической эффективности организационно-технологических решений в процессе строительного производства // Техническое регулирование. Строительство, проектирование и изыскания. 2012. № 1. С. 42–43.
3. Сайдаев Х. Л. Планирование эксперимента при исследовании экологического параметра в системе оценки потенциала генеральной подрядной организации // Техническое регулирование. Строительство, проектирование и изыскания. 2012. № 9. С. 48–50.
4. Орлов К. О. Комплексный показатель результативности проектов массовой малоэтажной застройки при использовании различных современных технологий модульного домостроения // Технология и организация строительного производства. 2013. № 1. С. 40–42.
5. Zavadskas E. K., Vilutienė T., Turskis Z., Šaparauskas J. Multi-criteria analysis of Projects' performance in construction // Archives of Civil and Mechanical Engineering. Volume 14, Issue 1. January 2014. P. 114–121.
6. Бессонов А. К., Верстина Н. Г., Кулаков Ю. Н. Инновационный потенциал строительных предприятий: формирование и использование в процессе инновационного развития. М. : Изд-во АСВ, 2009. 166 с.
7. Теличенко В. И. Пути развития инженерного потенциала на примере строительной отрасли // AlmaMater. Вестник высшей школы. 2011. № 8. С. 7–11.
8. Jato-Espino D., Castillo-Lopez E., Rodriguez-Hernandez J., Carlos Canteras-Jordana J. A review of application of multi-criteria decision making methods in construction // Automation in Construction. Volume 45. September 2014. P. 151–162.
9. Wu Xianguo, Liu Qian, Zhang Limao, Skibniewski Miroslaw J., Wang Yanhong. Prospective safety performance evaluation on construction sites // Accident Analysis & Prevention. Volume 78. May 2015. P. 58–72.
10. Ooi Joseph T. L., Le Thao T. T., Lee Nai-Jia. The impact of construction quality on house prices // Journal of Housing Economics. Volume 26. December 2014. P. 126–138.
11. Wei Liu. The material optimized design methods of sports buildings // BioTechnology: An Indian Journal. Volume 10. Issue 12. P. 6063–6070.
12. Chahal K. S., Emerson P. Quality control and quality assurance in building design and construction // Journal of the Institution of Engineers (India): Architectural Engineering Division. Volume 88. Issue OCT. 29 October 2007. P. 16–20.
13. Brandon Peter, Betts Martin, Wamelink Hans. Information technology support to construction design and production // Computers in Industry. Volume 35. Issue 1. February 1998. P. 1–12.
14. Froese Thomas M. The impact of emerging information technology on project management for construction // Automation in Construction. Volume 19. Issue 5. August 2010. P. 531–538.
15. De Wilde Pieter, Coley David. The implications of a changing climate for buildings // Building and Environment. Volume 55. September 2012. P. 1–7.