

## СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ БИОНИЧЕСКОГО ТИПА

*У статті розглянутий системотехнічний підхід до оцінки показників технологічної ефективності будівельних конструкцій з урахуванням особливостей проектних рішень архітектурно-біонічних систем. Проведено аналіз комплексних показників технологічності будівельних конструкцій, а також дослідження їх безпосереднього впливу на ефективність проектних рішень і організаційно-технологічну надійність будівельного виробництва. Розроблена методика визначення комплексного показника технологічності для біонічних конструкцій.*

**Ключові слова:** система, підхід, комплекс, показник, оптимізація, коефіцієнт, метод.

*В статье рассмотрен системотехнический подход к оценке показателей технологической эффективности строительных конструкций с учётом особенностей проектных решений архитектурно-бионических систем. Произведён анализ комплексных показателей технологичности строительных конструкций, а также изучение их непосредственного влияния на эффективность проектных решений и организационно-технологическую надёжность строительного производства. Разработана методика определения комплексного показателя технологичности для бионических конструкций.*

**Ключевые слова:** система, подход, комплекс, показатель, оптимизация, коэффициент, метод.

*In the article system technology approach of estimation of indicators of technological optimizing of building constructions is considered taking into account project decisions of the architecturally-bionic systems. Analysis has been carried out of complex efficiency estimation of industrial and technological features of bionic constructions as well as their direct influence on the efficiency of project solutions and organizational and technological reliability of building industry. New method of defining complex indicators of technology of bionic systems has been developed.*

**Keywords:** system, approach, complex, index, optimization, coefficient, method.

**Постановка проблеми.** Научно-технический прогресс неуклонно ведёт к созданию новых методов проектирования и управления, к коренному совершенствованию капитального строительства. Вследствие этого вопросы оптимального проектирования строительных конструкций с использованием принципов бионики и широким применением ЭВМ приобретают новую актуальность. Проблемные вопросы по технологии и организации

строительных процессов обуславливают необходимость дальнейшего совершенствования методов и критериев оценки технологичности конструкций, формирования научных основ управления технологичностью на ранних стадиях конструкторской подготовки производства, применения современной автоматизированной техники, а также разработки теории преемственности конструктивно-технологических решений, прогнозирования материалоемкости элементов, повышения роли типизации технологических процессов.

В этих условиях первостепенное значение приобретает разработка новых, соответствующих эпохе НТР, критериев оценки технологичности строительных конструкций бионического типа, обладающих высокоэффективной рационализацией использования материальных и энергетических ресурсов.

**Анализ ранее проведённых исследований.** Вопросы технологичности строительных конструкций и проектных решений зданий и сооружений активно разрабатывались с середины XX века. Результаты исследований отечественных и зарубежных учёных в области архитектурной бионики и технологичности строительных конструкций подтвердили особую эффективность бионического подхода при решении прикладных инженерных задач в актуальных направлениях техники.

Гусаков А.А. [1] рассматривал методологические основы системотехники, совокупность методов и средств формирования эффективных строительных систем и межсистемных связей, Фоков Р.И. [4] разработал методы комплексной оценки строительной технологичности проектов зданий, Булгаков С.Н. [5] занимался проблемами технологичности железобетонных конструкций и проектных решений, способствующих повышению экономической эффективности производства, в лаборатории Ю.С. Лебедева [2] в результате многолетних теоретических и экспериментально-практических работ сложились основные направления развития архитектурной бионики как науки, охватывающие основные теоретические положения, методологию научно-исследовательских работ, проблемы формообразования, вопросы природной стандартизации и унификации.

Разработки современных исследователей [6, 7] подтверждают эффективность сочетания известных технологических приёмов, дополненное новыми конструктивно-технологическими решениями, что позволяет в полной мере использовать достоинства проектирования и возведения объектов строительства и свести к минимуму их недостатки.

Большое количество одновременно применяемых показателей технологичности конструкций бионического типа усложняет выбор рационального их варианта. Для нахождения оптимального решения вопросов, связанных с оценкой технологических свойств конструкций бионического типа возникает необходимость применения комплексных показателей и комплексно-системного подхода [8, 9].

**Цель исследования** – совершенствование оптимизационной системы показателей технологичности строительных конструкций бионического типа с учётом объёмно-планировочных и организационно-технологических решений строительного производства на основе системотехнического подхода.

**Предмет исследования** – строительные конструкции бионического типа, проектируемые для создания новых, более совершенных и функциональных строительных комплексов, оптимально использующих свойства биологических и технических элементов, объединенных в единую функциональную систему целенаправленного поведения.

**Основной материал исследования.** Системный подход – один из компонентов научных исследований. Системный подход и системные представления отвечают потребностям современного качественного анализа. Комплексно-системный подход к изучению и решению вопросов технологичности конструкций рассматривает предмет исследования в виде системы и составляет его интегральные свойства и закономерности, а также указывает на то, что вопросы технологичности необходимо рассматривать на всех этапах предпроектных проработок, проектирования, технологической подготовки производства, постройки и эксплуатации [8].

Система обеспечения технологичности конструкций в строительстве и её рациональное функционирование способствует обеспечению конструкций с высокой степенью технологичности (рис. 1). Комплексными показателями технологичности конструкций обеспечивается получение относительных значений обобщённого уровня технологичности конструкций [9].

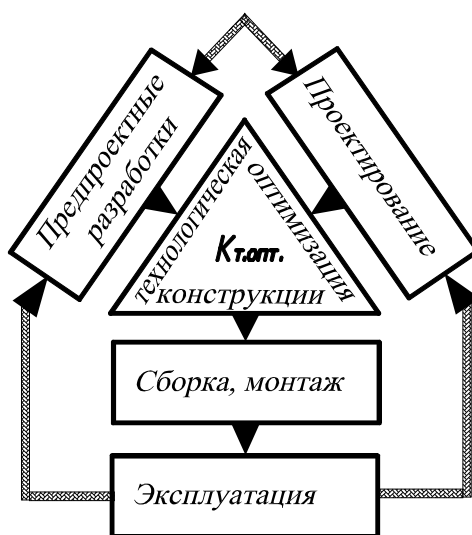


Рис. 1 – Система комплексного рассмотрения вопросов технологичности

Общий недостаток известных видов комплексных показателей технологичности – невозможность их оптимизации.

Переход от частных показателей к комплексным обеспечивает более полную и объективную оценку влияния технологичности на окончательный результат проектирования конструкции в результате технологической оптимизации. Детализация комплексных показателей с переходом к

групповым, а затем и к частным показателям служит для выявления тех конструктивных решений, совершенствование которых целесообразно и наиболее эффективно для повышения уровня технологичности конструкции в целом (рис. 2). Комплексный показатель технологичности образуется путём обобщения групповых показателей на более высоком уровне.

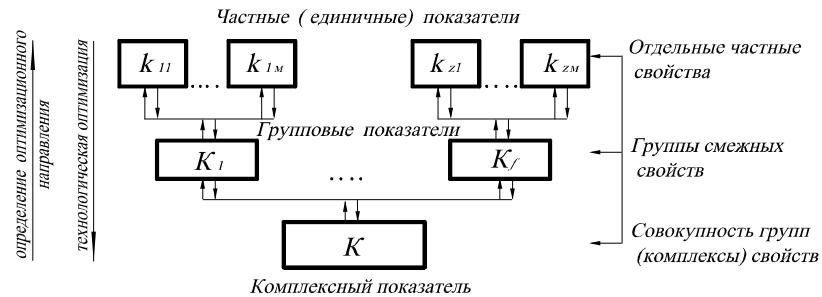


Рис. 2 – Схема формирования комплексных показателей технологичности

Обобщая основные принципы и практическое применение, имеют место некоторые основные методы определения комплексных показателей технологичности конструкций.

**Среднеарифметический** комплексный показатель технологичности, выраженный среднеарифметической или средневзвешенной величиной [9]

$$K = \sum_{n=1}^N \frac{K_n}{N}, \quad (1)$$

где  $K_n$  – значение  $n$ -го частного группового показателя;  $N$  – число частных (групповых) показателей, образующих комплексный показатель.

Используя зависимости (математические модели), позволяющие учитывать весомость (значимость, эквивалентность) отдельных исходных показателей, получим [9]

$$K = \frac{\sum_{n=1}^N b_n \cdot K_n}{\sum_{n=1}^N b_n}, \quad (2)$$

где  $b_n$  – коэффициент весомости  $n$ -го частного (группового) показателя, определяемый экспертными или другими методами. Коэффициент  $b_n$  принимает значения  $\sum_{n=1}^N b_n = 1$ .

В случаях, когда коэффициентом весомости выступает степень экономической эквивалентности принятых частных показателей, формула (2) преобразуется [9, 11]

$$K = \frac{K_1 \cdot K_{1Э} + K_2 \cdot K_{2Э} + \dots + K_n \cdot K_{nЭ}}{K_{1Э} + K_{2Э} + \dots + K_{nЭ}} = \frac{\sum K_i K_{iЭ}}{K_{iЭ}}, \quad (3)$$

где  $K_i$  – частный показатель технологичности;  $K_{iЭ}$  – коэффициент экономической эквивалентности  $i$ -го частного показателя.

Физический смысл коэффициента экономической эквивалентности состоит в том, что он обеспечивает при изменении величины сравниваемых

частных показателей в одно и то же число раз одинаковое влияние на экономические показатели.

**Относительный** комплексный показатель, выраженный произведением частных показателей или отношением произведения частных показателей к их количеству (4) или сумме (5). В случае разрозненности экономических показателей возможно применение корректировки дополнительными приведёнными коэффициентами (2) [11]

$$K = K_1 \cdot K_{1Э} \cdot K_2 \cdot K_{2Э}, \quad (4)$$

$$K = \frac{K_1 \cdot K_{1Э} \cdot K_2 \cdot K_{2Э}}{n_k}, \quad (5)$$

$$K = \frac{K_1 \cdot K_{1Э} \cdot K_2 \cdot K_{2Э}}{K_1 \cdot K_{1Э} + K_2 \cdot K_{2Э}}, \quad (6)$$

где  $n_k$  – количество частных показателей.

Исследование многопараметрических корреляционных моделей определяет комплексный **корреляционный** показатель технологичности конструкции.

В исследуемой работе в качестве комплексных показателей приняты трудоёмкость и расчётная стоимость конструкций бионического и традиционного видов. В результате обработки экспериментальных статистических данных были получены функции регрессии, решая уравнения которых, определены комплексные технико-экономические показатели. Степенная функция многопараметрической модели имеет вид

$$K = \lambda_0 \cdot K_1^{\lambda_1} \cdot K_2^{\lambda_2} \cdot \dots \cdot K_n^{\lambda_n}, \quad (7)$$

где  $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  – коэффициент эластичности фактора  $K_n$ , характеризующий степень влияния  $n$ -го единичного (группового) показателя на исследуемый комплексный показатель технологичности.

Вид выбранной математической модели наиболее точно и полно отражает взаимосвязь частных и групповых показателей и степень их влияния на исследуемые комплексные показатели.

**Уменьшающий** коэффициент определяется по системе уменьшения максимального значения показателя технологичности, основан на сравнении конструктивно-технологических факторов данного изделия с наиболее технологичной конструкцией типового представителя. Комплексный показатель технологичности исследуемой конструкции может обобщать ряд составляющих комплексных показателей, характеризующих группы факторов (свойств).

Для примера рассмотрим траекториальную структуру [2, 3]. Данная конструкция относится к бионическому типу и скомпонована различными составными элементами. Для элемента дискретной её части – прямоугольного стержня ( $l=2,61$  м;  $h=0,2$  м;  $b=0,01$  м) – комплексный показатель технологичности элемента находится по формуле (8)

$$K_{k-\text{элемента}} = \frac{K_{k1} \cdot K_{1Э} + K_{k2} \cdot K_{2Э} + K_{k3} \cdot K_{3Э} + K_{k4} \cdot K_{4Э}}{K_{1Э} + K_{2Э} + K_{3Э} + K_{4Э}} = \frac{\sum K_{ki} \cdot K_{iЭ}}{\sum K_{iЭ}}, \quad (8)$$

где  $\hat{E}_{e1}$  – комплексный показатель предварительной обработки конструкционного материала до заданных физико-механических свойств;

$K_{k2}$  – комплексный показатель технологичности обработки элемента до заданных геометрических форм и размеров;

$K_{k3}$  – комплексный показатель монтажной подготовки элементов конструкции;

$K_{k4}$  – комплексный показатель антикоррозионной обработки конструкции перед эксплуатацией;

$\hat{E}_{1Э}, \hat{E}_{2Э}, \hat{E}_{3Э}, \hat{E}_{4Э}$  – соответствующие коэффициенты экономической эквивалентности обобщаемых показателей по видам работ.

Метод оценки технологичности по системе уменьшения максимального значения показателя технологичности также исключает возможность его оптимальной величины, заключающийся в сопоставлении данной конструкции с эталоном (конструкции традиционного вида), уровень технологичности которого приравнивается к максимальному значению [9].

Строительная технологичность согласно работе [10] определялась двумя соответствующими коэффициентами:  $K_c$ , установленным на основе сравнения расчётных стоимостей конструкций бионического и традиционного типов, и  $K_t$ , полученным при сравнении затрат ручного труда при возведении. Таким образом, исследование технологичности в работе происходит путём сравнения разрозненных конструкций, каковыми являются конструкции бионического и традиционного видов. В этом случае возникает проблема несопоставимости значений коэффициентов технологичности  $K_c$  и  $K_t$ , что ведёт к затруднениям их совместного использования.

В связи с этим нами рассмотрены способы обобщения этих показателей в один комплексный, для чего были изучены методы определения комплексных показателей технологичности [2, 9, 10, 11] и основы статистических теорий по определению средних величин. Поставленная задача наилучшим образом может быть решена при помощи средней геометрической величины, что даёт наиболее правильный результат осреднения при нахождении такого значения признака, который качественно равноудален от максимального и минимального значений.

Для комплексной оценки строительной технологичности использовался следующий способ определения коэффициента  $K_k$  [10]:

$$K_k = \sqrt{K_c \cdot K_t}, \quad (9)$$

где  $K_c$  – коэффициент, установленный на основе сравнения расчётных стоимостей конструкций бионического и традиционного типов;  $K_t$  – коэффициент, полученный при сравнении трудоёмкости возведения тех же конструкций.

Учитывая особенности проектирования строительных конструкций бионического типа, совершенство которых не вызывает сомнения,

предложенный ранее метод определения комплексного коэффициента технологичности недостаточен.

Анализ особенностей проектирования бионических конструкций проводился с учётом правил основных принципов бионики [1, 2, 3] и методов определения комплексных показателей [11]. Для определения комплексной технологичности предложен вариант использования дополнительных корректирующих коэффициентов, характеризующих рассматриваемый вид конструкций.

В расчётах использован метод определения коэффициента  $K_k$  по системе уменьшения максимального значения, основанного на составлении расчётных формул для определения значений составляющих комплексных показателей технологичности, а также метод корректирующих коэффициентов, учитывающий отличие проектируемой бионической конструкции от традиционной по сложности, оригинальности и перспективности. При этом использована возможность определения максимального значения  $K_k$ , соответствующего исследуемой конструкции (бионический тип).

Показатель минимума массы тесно связан с минимизацией энергетических затрат и метаболизмом. Для оценки степени рационального использования строительных материалов предлагается применение **коэффициента материалоемкости**

$$K_m = \frac{M_i}{M_{ni}}, \quad (10)$$

где  $\dot{I}_i$  – «чистая масса» конструкции,  $M_{ni}$  – номинальное значение массы  $i$ -го материала для изготовления конструкции.

Зачастую бионические конструкции характеризуются наличием многочисленных составных элементов, что определяет достаточно высокую сложность. За оценку этого параметра отвечает **коэффициент сложности конструкции**

$$K_{сл} = \frac{n^{\acute{a}}}{n^{n\acute{b}}} \cdot K_z, \quad (11)$$

где  $n^{\acute{a}}$  – количество составных элементов рассматриваемой конструкции (бионического вида);  $n^{n\acute{b}}$  – количество составных элементов конструкции конкурентного аналога (традиционного вида);  $K_z$  – коэффициент, учитывающий габариты исследуемой конструкции.

Конструктивная сложность архитектурно-бионических строительных систем задаёт необходимость использования новых эффективных свойств строительных материалов, определяемых их физико-механическими характеристиками. Этот фактор повышает актуальность решения задачи сокращения материалоемкости строительных конструкций бионического типа. Рассматриваемые конструкции изготовлены из эффективного строительного материала фенолоформальдегидного стеклопластика, который обладает определённой технологичностью, включающей технические

показатели его обработки. **Коэффициент технологичности материала** определялся следующим образом:

$$K_{\text{тех.м.}} = 1 - \frac{T_i}{T_a}, \quad (12)$$

где  $T_i$  – время подготовительной обработки перед монтажом для рассматриваемой конструкции (бионический вид);  $T_a$  – время подготовительной обработки перед монтажом для конкурентной конструкции аналога (традиционный вид).

Таким образом, формула (9) с учётом формул (10), (11), (12) примет вид

$$K_k = \sqrt{K_m \cdot K_c} \cdot K_m \cdot K_{cl} \cdot K_{\text{тех.м.}} \quad (13)$$

Выражение (13) полноценно отображает комплексную технологичность строительных бионических конструкций.

Согласно формуле (13) построена номограмма для определения комплексного коэффициента технологичности бионических конструкций, отображающая функциональную зависимость входящих переменных.

Логарифмическая номограмма с сорокапятиградусным ходом состоит из шести логарифмических шкал, каждая из которых соответствует одной из шести переменных. Модули всех шкал равны

$$\lambda(\hat{E}\delta) = \lambda(\hat{E}\tilde{n}) = \lambda(\hat{E}_i) = \lambda(\hat{E}_{\tilde{n}\tilde{e}}) = \lambda(\hat{E}_{\delta\delta\delta.i}) = \frac{30}{3} = 10\tilde{i}\tilde{i}. \quad \text{На рис. 3 приведены два}$$

примера использования номограммы, в которых получившиеся значения  $K_k$  составляют 0,68 и 2,183.

**Выводы.** На основе системотехнического подхода рассмотрены вопросы применения комплексных показателей технологичности для строительных конструкций. Анализ показал, что система таких оценок обеспечивает высокую степень технологичности конструкций и рациональное их функционирование.



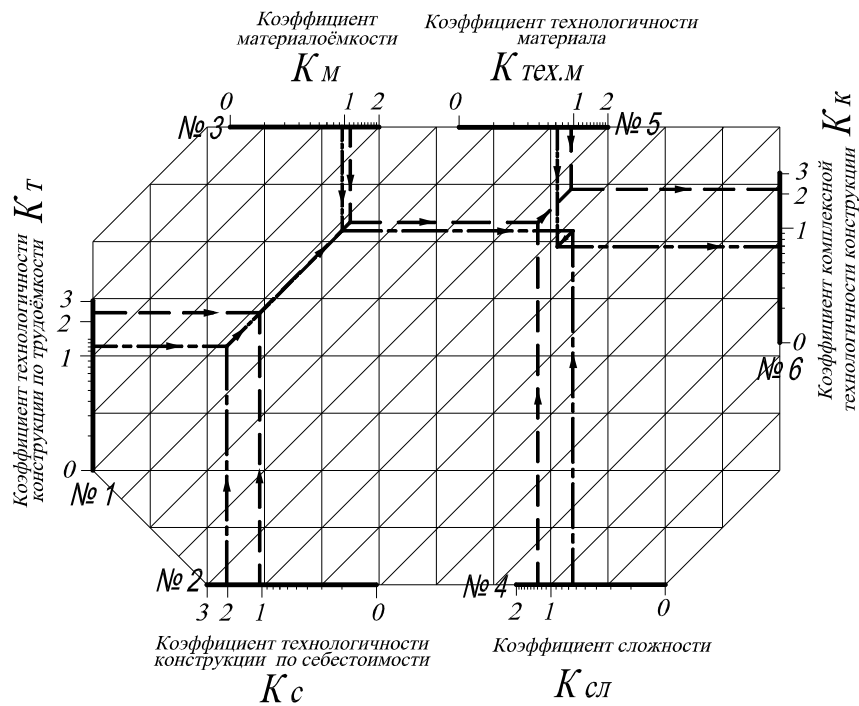


Рис. 3 – Номограмма для определения комплексного коэффициента технологичности  $K_k$  бионических конструкций

Выполнена развёрнутая характеристика комплексно-системного подхода и определена последовательность его формирования. Рассмотрена система комплексных показателей оценки технологичности строительных конструкций, в результате чего разработана методика определения комплексного показателя технологичности для бионических конструкций  $K_k$  и построена на её основе номограмма, что дало основание для разработки организационно-технических мероприятий, прогнозирования стоимости строительно-монтажных работ и трудоёмкости на основе исследования динамики формирующих его факторов.

#### Література

1. Системотехника строительства / [Гусаков А.А., Богомолов Ю.М., Брехман А.И. и др.]; под ред. А.А. Гусакова. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2004. – 510 с.
2. Архитектурная бионика / [Лебедев Ю.С., Рабинович В.И., Положай Е.Д. и др.]; под ред. Ю.С. Лебедева. – М.: Стройиздат, 1990. – 269 с.
3. Темнов В.Г. Конструктивные системы в природе и строительной технике/Владимир Григорьевич Темнов. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд., 1987. – 256 с.
4. Фоков Р.И. Выбор оптимальной организации и технологии возведения зданий/ Ростислав Иванович Фоков. – К.: Будівельник, 1969. – 192 с.
5. Булгаков С.Н. Технологичность железобетонных конструкций и проектных решений / Сергей Николаевич Булгаков. – М.: Стройиздат, 1983. – 303 с.
6. Конструктивно-технологические решения жилых зданий социального назначения/ Н.А. Зубов, Л.М. Колчеданцев, А.Л. Колчеданцев // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. трудов. В 2 ч. Ч.1. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск: Стринко, 2007. – С. 193–200.

7. Шукин В.С., Травкин Е.М. Повышение технологичности и снижение материалоемкости железобетонных изделий // *Строительная наука*. – 2005. – №2. – С. 24 – 27.
8. Глозман М.К. Технологичность конструкций корпуса морских судов / *Мойсей Калманович Глозман*. – Л.: Судостроение, 1984. – 296 с.
9. Прялин М.А. Оценка технологичности конструкций / *М.А. Прялин, В.М. Кульчев*. – К.: Техніка, 1985. – 120 с.
10. Кутлыева Г.М. Оценка строительной технологичности фундаментов сельскохозяйственных производственных зданий: дисс. ... кандидата техн. наук: 05.23.08 / *Гозель Мурадовна Кутлыева*. – М., 1984. – 216 с.
11. Технологичность конструкций изделий: Справочник / [Адмиров Ю.Д., Алфёрова Т.К., Волков П.Н.]; под ред. Ю.Д. Адмирова. – [2-е издание, перераб. и доп.]. – М.: Машиностроение, 1990. – 768 с.

*Надійшло до редакції 7.10.2009*

*©И.Д. Павлов, М.А. Каплуновская*