

Михеев Виталий Викторович (Россия, г. Омск) – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Комплексная защита информации» (КЗИ) ФГБОУ ВПО ОмГТУ (644050, г. Омск, пр. Мира, 11, e-mail: vvm125@mail.ru).

Белодед Александр Сергеевич (Россия, г. Омск) – магистрант кафедры Эксплуатация и сервис транспортно-технологических машин и комплексов в строительстве (ЭСМИК) ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: sashabeloded123@gmail.com).

Savel'ev Sergey Valeryevich (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, the associate professor. professor of "Operation and Service of Transport Technological Machines and Complexes in Construction" department (ESMIK), of

The Siberian State Automobile and Highway academy (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: saveliev_sergval@mail.ru).

Miheev Vitalyi Viktorovich (Russian Federation, Omsk) – candidate of physical and mathematical sciences, the associate professor "Complex Information Security" (CIS) Omsk state technical university (644050, Omsk, Mira Ave., 11, e-mail: vvm125@mail.ru).

Beloded Alexander Sergeyevich Russian Federation, Omsk) – undergraduate of the Operation department and service of transport technological machines and complexes in construction (ESMIK) of The Siberian State Automobile and Highway academy (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: sashabeloded123@gmail.com).

УДК 004.9

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБЪЕКТА

Е.В. Селезнева, Т.А. Юрина
ФГБОУ ВО «СибАДИ», Омск, Россия.

Аннотация. Рассмотрены виды технологических систем, применяемых в практике строительного производства, раскрывается понятие критерия эффективности, сформулированы требования к критериям эффективности, предназначенным для технологических решений, позволяющие достичь оптимального решения. Представлены виды задач оптимального проектирования и приведен пример построения математической модели проектирования оптимального состава бетонной смеси. Приведен фрагмент алгоритма и результат поиска оптимального решения.

Ключевые слова: проектирование, оптимизация, система, математическая модель.

Введение

Для успешного применения математических методов и управления технологией производства большое значение имеют правильная оценка технологических факторов и выбор соответствующих критериев. В ряде случаев это требует совершенствования существующих методов определения свойств материалов и параметров технологических процессов, разработки таких методов испытаний и выбора параметров и характеристик материалов, которые отвечают по точности и достоверности применяемым методам математических исследований и анализу технологических систем.

Виды технологических систем

Системы можно разделить на два класса: детерминированные и стохастические, хотя в практике производства исследуемые системы часто не делятся столь четко [1].

К детерминированным относят системы, в которых составные части взаимодействуют точно предвидимым образом. При исследовании детерминированной системы не возникает никакой неопределенности. Изменение одного из элементов системы на некоторую величину всегда вызывает изменение другого или других на строго определенную величину. Если величина какого-то технологического фактора X_i изменится на ΔX , то свойство Y_i всегда изменится на ΔY .

Для стохастической (вероятностной) системы нельзя сделать точного детального предсказания. Такую систему можно тщательно исследовать и установить с большой степенью вероятности, как она будет себя вести в любых заданных условиях. Однако система все-таки остается неопределенной и любое предсказание относительно ее поведения никогда не может выйти из логических рамок вероятностных

категорий, с помощью которых это поведение описывается. В стохастических системах изменение одного из элементов не всегда вызывает изменение другого (связанного с ним), а только в некоторых случаях. Если X_i изменился на ΔX , то R_k изменится на $\Delta R + \varphi$, где φ – случайная величина. Если под действием случайности $\varphi = -\Delta R$, то влияние X_i на R_k вообще в данном наблюдении обнаружено не будет.

В технологических процессах стохастические системы имеют большое распространение. Например, распределение составляющих и элементов структуры подчиняется вероятностно-статистическим закономерностям, роль случайного эффекта возрастает при увеличении объемов (при переходе от лабораторных образцов к изделиям), а также при переходе от единичной к массовой продукции.

В технологической системе действует большое число взаимосвязанных факторов X_i . Из них только часть можно учесть детерминированно, а остальные факторы всегда создадут случайный эффект, поэтому использование стохастических систем позволяет успешно решать многие задачи управления качеством и производством.

При этом вопрос формулировки цели решается в каждом отдельном случае на основе технологических и экономических условий. Целью может быть, например, достижение оптимального качества продукта и поддержание его на этом уровне с максимальной стабильностью. Средством к достижению цели является управление технологическими факторами X_i , действующими в технологии как в сложной стохастической системе.

Необходимо прийти к цели, например, получению заданной прочности R , выбирая вид основных компонентов продукта (например, бетона), его рецептуры, тип оборудования и режимы работы.

Критерий эффективности

Степень достижения цели характеризует показатель, который называют критерием эффективности или оптимальности. В качестве критерия могут быть выбраны различные показатели: прочность или другие свойства бетона, производительность завода или цеха, себестоимость продукции и др. Выбор критерия определяется назначением рассматриваемой системы. Каждому варианту решения соответствует определенное значение выбранного критерия, и задача оптимального управления

состоит в том, чтобы выбрать и реализовать такой вариант, при котором критерий имеет экстремальное (максимальное или минимальное) значение при данных условиях производства.

Для определения критерия эффективности используют функцию

$$I=f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

где x_i – все факторы, существенным образом влияющие на исследуемый процесс. Эту функцию обычно называют целевой, а в математической теории эксперимента – функцией отклика.

Задается лишь один критерий эффективности, ибо при определенном варианте решения можно добиться экстремума лишь одного критерия и невозможно, чтобы два произвольно заданных критерия достигали экстремума одновременно, если нет случайного совпадения. В некоторых случаях могут приниматься компромиссные решения, расположенные в зоне Δx , когда за счет некоторого снижения критерия I_1 достигается рост I_2 (рис. 1).

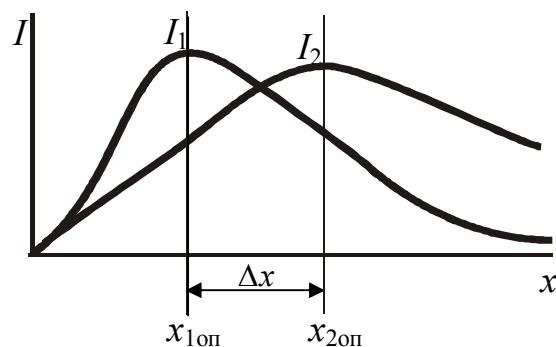


Рис. 1. Критерии эффективности и зона оптимальных решений

Неверны требования такого типа: «достигнуть максимальной прочности бетона при минимальном расходе цемента». Корректной является постановка задачи например в такой формулировке: «достигнуть максимальной прочности бетона при условии, если расход цемента C не превысит $C_{кр}$, а технологический параметр S не выйдет за пределы $S_{кр}$ ». В такой формулировке указан не только критерий эффективности, но и пределы, в которых могут изменяться управляемые факторы, т.е. даны их ограничения.

Во всех реальных ситуациях на технологические факторы наложены определенные ограничения, т.е. $(x_i)_{\min} < x_i$

$<(x_i)_{\max}$. Например, подвижность бетонной смеси должна быть в пределах, обеспечивающих ее плотную укладку без расслоения, температура тепловлажностной обработки бетона при атмосферном давлении не должна быть более 100°C и т.д. Кроме того, обычно имеют место ограничения материальных ресурсов (количество и качество сырья, типы оборудования, финансовые и трудовые возможности и т.д.) и времени для достижения цели [2, 3].

К критериям эффективности, предназначенным для технологических решений, предъявляется ряд требований:

1) критерий должен характеризовать эффективность технологии с учетом конечной цели производства, а не отдельных его этапов, однако в сложных системах при использовании ступенчатой оптимизации допускается применение разных критериев на каждом этапе;

2) критерий должен быть количественным и однозначным, причем желательно, чтобы он имел физический смысл и легко вычислялся (если у критерия нет числовой оценки, то, как исключение, допустимо применение рангов 1, 2, ... по некоторым формализованным шкалам);

3) критерий должен обладать статистической эффективностью, которая характеризуется нечувствительностью критерия к малым случайным воздействиям и минимальной (в пределах метрологической

точности) ошибкой воспроизводимости для параллельных опытов в одной серии;

4) критерий по возможности должен обладать универсальностью, т.е. учитывать и экономическую, и техническую стороны технологии (например, относительная прочность бетона на единицу расхода цемента, более универсальный критерий, чем абсолютная прочность бетона).

Правильный выбор критерия эффективности – необходимое условие успешного принятия оптимального решения.

Задачи оптимального проектирования

Наличие ограничений позволяет сформулировать два типа задач оптимизации [1]:

1) достижение заданного уровня критерия эффективности при минимальном расходе ресурсов или получение технических характеристик не хуже заданных при минимизации стоимости (например, подбор состава заданной марки бетона при минимальном расходе цемента);

2) достижение максимального уровня критерия эффективности при полном расходе выделенных для достижения цели ресурсов или обеспечение при стоимости, не превышающей заданную, максимизацию технических характеристик (например, достижение заводом максимального выпуска бетона при определенных запасах цемента).

Таким образом, задачу оптимального проектирования можно представить в виде целевой функции и системы ограничений:

1)

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= C(\bar{x}) \rightarrow \min \\ C(\bar{x}) &= f_1(T(\bar{x})) \\ \min \bar{x} &\leq \bar{x} \leq \max \bar{x} \\ T(\bar{x}) &\geq T_{\text{зад}} \end{aligned} \right\}$$

2)

$$\left. \begin{aligned} F_2 &= T(\bar{x}) \rightarrow \max \\ T(\bar{x}) &= f_2(C(\bar{x})) \\ \min \bar{x} &\leq \bar{x} \leq \max \bar{x} \\ C(\bar{x}) &\leq C_{\text{зад}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\bar{x}$ – параметры объекта проектирования; $C(\bar{x})$ – экономические характеристики; $T(\bar{x})$ – технические характеристики.

При оптимальном проектировании важными элементами математической модели являются зависимости между параметрами объекта проектирования, как в форме ограничений, так и целевой функции. Такие зависимости могут быть теоретическими и статистическими [4,5]. Если теоретические зависимости отсутствуют, то

необходимые соотношения можно определить на основании имеющихся статистических данных. Для этого определяют вид аналитической зависимости и с помощью метода наименьших квадратов определяют конкретный вид принятых зависимостей.

Полученные аналитические зависимости называются уравнениями регрессии и в общем случае имеют вид

$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (2)$$

В своем исследовании мы будем решать задачу оптимизации первого типа.

Рассмотрим в качестве примера проектирование оптимального состава тяжелого бетона. Параметрами объекта проектирования (состава бетонной смеси) выберем следующие данные (расход материалов указан для приготовления 1 м³ бетонной смеси):

- 1) удобоукладываемость бетонной смеси (OK), см;
- 2) соотношение по массе между мелким и крупным заполнителем (Π/Ψ);
- 3) водоцементное отношение (B/Π);
- 4) водопотребность бетонной смеси (B), л;
- 5) расход песка (Π), кг;
- 6) расход цемента (Π), кг;
- 7) расход крупного заполнителя (Ψ), кг;
- 8) расход добавки (D), кг;
- 9) плотность песка (ρ_{Π}), кг/м³;
- 10) плотность цемента (ρ_{Π}), кг/м³;
- 11) плотность крупного заполнителя (ρ_{Ψ}), кг/м³;
- 12) плотность добавки (ρ_D), кг/м³.

В качестве экономических характеристик бетонной смеси выберем ее себестоимость: бетон без добавки

$$C(\bar{X}) = f(\Pi, \Psi, B) = C_{\Pi}\Pi + C_{\Psi}\Psi + C_B B, \quad (3)$$

— бетон с добавкой

$$C(\bar{X}) = f(\Pi, \Psi, B, D) = C_{\Pi}\Pi + C_{\Psi}\Psi + C_B B + C_D D, \quad (4)$$

где C_{Π} , C_{Ψ} , C_B , C_D – стоимость цемента, песка, щебня, воды и добавки, соответственно (руб/кг).

В качестве технических характеристик бетонной смеси ($T(\bar{X})$) можно выбрать прочность бетона при сжатии ($R_{сж}$), плотность бетона (ρ_B), морозостойкость (F) или другое свойство бетона.

Между объемом бетонной смеси и параметрами объекта проектирования существует теоретическая зависимость [6]

$$V = \frac{\Pi}{\rho_{\Pi}} + \frac{\Pi}{\rho_{\Pi}} + \frac{\Psi}{\rho_{\Psi}} + \frac{D}{\rho_D} + B. \quad (6)$$

Для определения зависимости между свойствами бетона и параметрами объекта

проектирования была произведена обработка статистических данных, в результате которой были получены соответствующие уравнения регрессии [7,8].

Таким образом, математическая модель проектирования оптимального состава бетонной смеси будет иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} f = C(\bar{X}) &= C_B B + C_{\Pi}\Pi + C_{\Psi}\Psi + C_D D \rightarrow \min; \\ \min_{OK} &\leq OK \leq \max_{OK}; \\ \min_B &\leq B \leq \max_B; \\ \min_{\Pi} &\leq \Pi \leq \max_{\Pi}; \\ \min_{\Pi/\Psi} &\leq \Pi/\Psi \leq \max_{\Pi/\Psi}; \\ \min_D &\leq D \leq \max_D; \\ B/\Pi &= B/\Pi_{зад}; \\ V &= \frac{\Pi}{\rho_{\Pi}} + \frac{\Pi}{\rho_{\Pi}} + \frac{\Psi}{\rho_{\Psi}} + \frac{D}{\rho_D} + B = 1000; \\ T(\bar{X}) &= f(\Pi, B/\Pi, \Pi/\Psi, D) \geq T_{зад}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Минимальный и максимальный расход воды и цемента, диапазон значений для добавки определяются с учетом требований СНиП и ГОСТ по подбору состава бетонной смеси в зависимости от крупности зерен заполнителя, удобоукладываемости бетонной смеси, требуемой прочности бетона и активности цемента. Значение водоцементного отношения определяется по формуле

$$B/\Pi = f(R_{\Pi}, R_B) = \frac{0,35R_{\Pi}}{R_B + 0,03R_{\Pi}}. \quad (8)$$

Диапазон значений удобоукладываемости задается в соответствии с требованиями по удобоукладываемости проектируемой бетонной смеси.

Построенная математическая модель проектирования оптимального состава бетонной смеси (7) использовалась при поиске оптимального решения, фрагмент алгоритма которого показан на рисунке 2. Например, необходимо спроектировать состав тяжелого бетона заданной прочности при сжатии ($R_{сж}=30$ МПа) с минимальной себестоимостью при заданных ограничениях (рис. 3). В результате получено решение с себестоимостью 2869,09 руб. (см. рис. 3).

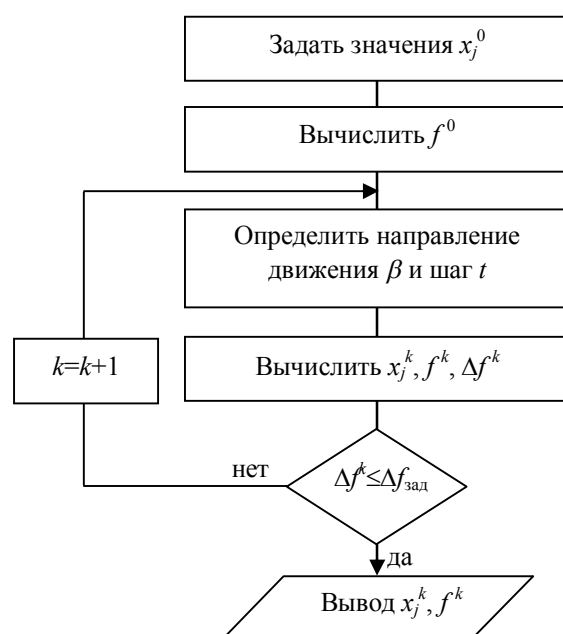


Рис. 2. Фрагмент алгоритма поиска оптимального решения

Наибольший размер зерен крупного заполнителя, мм		40			
R _ц , МПа	37,5				
R _{сж} , МПа	30				
Себестоимость, руб		2869,09			
	расход, кг	цена, руб/т	плотность	min	max
Вода	164,89	10	1	156,61	164,89
Цемент	330,88	4500	3,1	330,88	400,00
Песок	635,31	414	2,65		
Щебень	1270,45	878	2,6		
В/Ц	0,50			0,42	0,5
П/Щ	0,50			0,3	0,5
Объем, л	1000	Подвижность смеси		2	4

Рис. 3. Фрагмент окна оптимизации состава тяжелого бетона

Вывод

Таким образом, для проектирования оптимальных параметров технологических процессов, необходимо выбрать критерий эффективности, определить зависимости между параметрами объекта проектирования и построить математическую модель задачи оптимального проектирования.

Представленный алгоритм поиска оптимального решения позволяет оптимизировать технологический процесс изготовления некоторого продукта, в нашем случае в качестве примера был рассмотрен тяжелый бетон.

Библиографический список

1. Острейковский, В.А. Теория систем / В.А. Острейковский – М.: Высш. школа, 1997. – 240 с.
2. Еремин, И.И. Теория линейной оптимизации / И.И. Еремин – Екатеринбург: Екатеринбург, 1999. – 312 с.
3. Численные методы / Н.С. Бахвалов и др. – М.: Наука, 1987. – 600 с.
4. Современные методы оптимизации композиционных материалов / В.А. Вознесенский и др. – К.: Будівельник, 1983. – 144 с.
5. Курицкий Б.Я. Поиск оптимальных решений средствами Excel 7.0 / Б.Я. Курицкий – СПб.: ВHV-Санкт-Петербург, 1997. – 384 с.
6. Баженов, Ю.М. Технология бетона: учебник /

Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2003. – 500 с.

7. Автоматизированное планирование и обработка результатов многофакторного эксперимента / Е.В. Селезнева и др. // «Инновационное развитие России: проблемы и перспективы»: сборник статей IV Международной научно-практической конференции / МНИЦ ПГСХА. – Пенза, 2015. – С. 47-51.

8. Селезнева Е.В. Разработка системы автоматизированного планирования эксперимента и обработки его результатов / Е.В. Селезнева, Т.А. Юрина // Вестник Сибирского отделения Академии военных наук. – Омск, 2015. – № 30. – С. 167-172.

AUTOMATION SEARCH OPTIMAL PARAMETERS OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE OBJECT

E.V. Selezneva, T.A. Yurina

Abstract. This article describes the kinds of technological systems used in the practice of production, revealed the concept of efficiency criteria, the requirements to performance criteria, designed for technology solutions that achieve optimal solutions. Presented kinds of problems of optimum design and is an example of a mathematical model of designing the optimal composition of the concrete mix. A fragment of the algorithm and the result of finding the optimal solutions.

Keywords: design, optimization, system, mathematical model

References

1. Ostreykovsky V.A. *Teorija sistem* [Systems theory]. Moscow, Vysshaja shkola, 1997. 240 p.
2. Eremin I.I. *Teorija linejnoj optimizacii* [The theory of linear optimization]. Ekaterinburg, "Ekaterinburg", 1999. 312 p.
3. Bahvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelkov G.M. *Chislennye metody* [Numerical methods]. Moscow, Nauka, 1987. 600 p.
4. Voznesensky V.A., Ascension V.A., Broken V.M., Kersh V.Y. *Sovremennye metody optimizacii kompozicionnyh materialov* [Modern methods of optimization of composite materials]. Kiev, Budivelnik, 1983. 144 p.
5. Kuritsko B.J. *Poisk optimal'nyh reshenij sredstvami Excel 7.0* [The search for optimal solutions

by means of Excel 7.0]. Sankt-Peterburg, BHV-Saint Petersburg, 1997. 384 p.

6. Bazhenov Y.M. *Tehnologija betona: uchebnik* [Concrete Technology: tutorial]. Moscow, Publishing House of the DIA, 2003. 500 p.

7. Selezneva E.V., Yurina T.A. *Avtomatizirovannoe planirovanie i obrabotka rezul'tatov mnogofaktornogo jeksperimenta* [Automated scheduling and processing the results of multivariate experiment]. Sbornik statej IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii "Innovacionnoe razvitie Rossii: problemy i perspektivy" [A collection of articles IV International scientific-practical conference Innovative development of Russia: problems and prospects]. MNIC PGSHA, Penza, 2015, pp. 47-51.

8. Selezneva E.V., Yurina T.A. *Razrabotka sistemy avtomatizirovannogo planirovanija jeksperimenta i obrabotki ego rezul'tatov* [The development of computer-aided experimental design and processing of the results]. *Vestnik Sibirskogo otdelenija Akademii viennih nauk*, Omsk, 2015, no 30. pp. 167-172.

Селезнева Елена Викторовна (Омск, Россия) – кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры «Информационные технологии» ФГБОУ ВО «СиБАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: eselez@yandex.ru).

Юрина Татьяна Александровна (Омск, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационные технологии» ФГБОУ ВО «СиБАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: Sankova_Tanja@mail.ru).

Elena V. Selezneva (Omsk, Russian Federation) – candidate of pedagogical sciences, associate Professor, Department of Information technologies of The Siberian State Automobile and Highway academy (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: eselez@yandex.ru).

Tatiana .A. Yurina (Omsk, Russian Federation) – candidate of technical sciences, associate Professor, Department of Information technologies of The Siberian State Automobile and Highway academy (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: Sankova_Tanja@mail.ru).