

Таким образом, в работе сформулированы подходы к организации системы моделирования, ориентированной на работу с Q-схемами и реализующей имитационные расчеты по табличным и графическим описаниям объектов с использованием как внутренних моделей, так и инструментов существующих систем моделирования. Рассмотрена примерная структура программного и лингвистического обеспечения, состав подсистем и их взаимодействие в ходе моделирования. Применительно к языку GPSS выполнено макетирование принципов работы программного ядра системы для случая использования описаний уровня сетей массового обслуживания. Дальнейшая работа предполагает макетирование подсистем, добавление оригинального модуля компиляции GPSS, разработку иерархии классов для поддержки внутренних моделей системы, расширение возможностей графического описания Q-схем и т.д.

### Литература

1. Советов, Б.Я. Моделирование систем / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. - М.: Высшая школа, 2001. – 430 с.
2. Максимей, И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ / И.В. Максимей. - М.: Радио и связь, 1988. – 270 с.
3. Кельтон, В. Имитационное моделирование. Классика CS / В. Кельтон, А. Лоу. – СПб.: Питер, 2004. – 630 с.
4. Рыжиков, Ю.И. Имитационное моделирование. Теория и технологии / Ю.И. Рыжиков. – СПб.: КОРОНА, 2004. – 320 с.

УДК 621.74

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ СЫРОЙ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТОЙ ФОРМОВОЧНОЙ СМЕСИ

**Филипенко Е.В.**

*УО «Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого», г. Гомель*

Литьё металла в одноразовую песчано-глинистую форму – один из самых популярных способов литья. Качество литейной продукции, изготавливаемой в сырых песчаных формах, в значительной степени находится под влиянием свойств формовочного материала, таких, как прочность на сжатие, уплотняемость, твердость и других.

Данная работа нацелена на определение отклика, а именно, формуемости, уплотняемости, прочности на сжатие и насыпной плотности, как функции различных независимых переменных, таких как влажность формовочной смеси, процентное содержание бентонита, процентное содержание крахмалита в смеси. При проведении исследования использовались такие статистические инструменты, как планирование эксперимента, регрессионный анализ и методология поверхности отклика.

Планирование эксперимента позволяет провести минимально необходимое число опытов для оценки отклика с заданной точностью. Планирование эксперимента в сочетании с методологией поверхности отклика – сильный статистический инструмент, позволяющий получить зависимости. Методология поверхности отклика позволяет создать приближенную модель используя полином, как аппроксимацию истинных зависимостей входа-выхода. Для разработки математической модели использовался центральный композиционный план. Он наиболее широко применяется при подборе моделей второго порядка.

В качестве зависимых переменных рассматривались формуемость, уплотняемость, прочность на сжатие, объемная плотность, а в качестве факторов – содержание бентонита, крахмалита и влажность. Бентонит увеличивает прочность по сырому, индекс формуемости, текучесть по Орлову, насыпной вес в гильзе, мгновенный модуль упругости, вязкопластические свойства. Вода является определяющим компонентом смеси, который в очень значительной мере, можно сказать, определяющим образом влияет на свойства смеси. Повышенное содержание влаги в формовочной смеси снижает прочностные характеристики смесей, увеличивает их газотворность, приводит к оолитизации зерен песчаной основы, вызывает пригар и повышение шероховатости отливок. Заниженное содержание влаги в формовочной смеси увеличивает ее осыпаемость и снижает прочностные свойства. Для стабилизации влажности форм, снижения хрупкости и осыпаемости, повышения прочности смеси в зоне конденсации влаги и уменьшения склонности к образованию ужимин в песчано-бентонитовые смеси вводят крахмалсодержащие добавки.

Были выбраны следующие обозначения:  $X_1$  — содержание активного бентонита в смеси, фактор  $X_2$  — влажность формовочной смеси, фактор  $X_3$  – содержание крахмалита. Отклик эксперимента –  $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$ , соответственно формуемость, уплотняемость, прочность и насыпная плотность смеси.

Далее был построен план эксперимента, и, в соответствии с построенным планом, собраны экспериментальные данные.

В процессе проведения исследования для приготовления смеси применялся лабораторный смеситель (модель LM-1), весы лабораторные квадратные (модель ВЛК-500т-м ГОСТ 24104-88), уплотнение образцов из песчано-глинистой смеси для испытаний проводится тремя ударами копра лабораторного (модель 5033А). Определение предела прочности образцов смеси при сжатии производилось на машине для испытания формовочных и стержневых смесей (модель LRu-1). Анализ влажности проводили с помощью прибора для определения влажности (модель 062М).

В качестве экспериментальных данных использовались результаты трех реплик построенного центрального композиционного плана. Для оценки результатов эксперимента применялись статистические методы, а также использовался программный продукт STATISTICA.

Формуемость формовочной смеси была выражена как нелинейная функция входных параметров следующим образом:

$$Y_1 = 202,045 - 2,145 X_1 - 63,416 X_2 - 1132,439 X_3 - 0,029 X_1^2 + 2,898 X_2^2 + 5960,668 X_3^2 + 1,650 X_1 X_2 + 16,281 X_1 X_3 + 204,793 X_2 X_3$$

Далее была проведена проверка значимости коэффициентов регрессии. Для этого выдвигается нулевая гипотеза о том, что коэффициенты статистически незначимо отличны от нуля. Для проверки гипотезы используется t-критерий. Далее эмпирическое значение t-критерия должно быть сопоставлено с табличным. Если  $t_{эмн} > t_{крит}$ , то нулевая гипотеза должна быть отвергнута. Следовательно, коэффициент значимо отличается от нуля и его следует сохранить в регрессионной модели. Если же  $t_{эмн} \leq t_{крит}$ , нулевая гипотеза принимается, соответствующий коэффициент регрессии полагается незначимым и исключается из регрессионной модели. После того, как были отброшены незначимые факторы из регрессионной модели, модель пересчитывается.

Так, последовательно осуществляя проверку значимости коэффициентов регрессии и производя соответствующую коррекцию, в конечном итоге получили модель, содержащую лишь значимые коэффициенты регрессии:

$$Y_1 = 124,720 - 30,515 X_2 + 0,915 X_1 X_2$$

Для полученного уравнения регрессии проводилась проверка его адекватности. Данная проверка осуществляется с помощью F-критерия Фишера, численное значение которого сравнивается с табличным критическим значением. Если  $F_{эмт} \leq F_{крит}$ , то нет оснований отклонять нулевую гипотезу. Если же  $F_{эмт} > F_{крит}$ , то гипотеза об отсутствии линейной связи отвергается. Так как  $F_{эмт} = 99,593$ , а  $F_{крит} = 3,204$ , значит, построенная регрессионная модель для формуемости является адекватной.

Возможность использования уравнения регрессии для предсказания значения отклика оценивалась при помощи анализа работоспособности модели. Модель может считаться работоспособной, если у этой модели коэффициент детерминации  $R^2 \geq 0,75$ .

Так как для построенной регрессионной модели  $R^2 = 0,816$ , то модель работоспособна.

Уплотняемость формовочной смеси была выражена как логарифмическая зависимость входных параметров:

$$Y_2 = 32,918 - 16,556 \ln X_1 + 41,301 \ln X_2 + 1,167 \ln X_3$$

Далее была проведена проверка значимости оценок коэффициентов в уравнении регрессии. Оказалось, что значимые эффекты имеют факторы  $\ln X_1$  и  $\ln X_2$ . После отбрасывания незначимых факторов из регрессионной модели, коэффициенты были пересчитаны.

В итоге, получили следующую регрессионную модель:

$$Y_2 = 28,900 - 16,480 \ln X_1 + 41,001 \ln X_2$$

Из уравнения следует, что фактор  $\ln X_2$  имеет больший вклад в значение параметра  $y_2$ , чем фактор  $\ln X_1$ . Данная модель является адекватной, так как  $F_{эмт} = 117,956$ , а  $F_{крит} = 3,220$ . Так как  $R^2 = 0,849$ , модель считается работоспособной.

Прочность формовочной смеси была выражена как гиперболическая зависимость входных параметров:

$$Y_3 = -0,004 - 1,098 \frac{1}{X_1} + 1,222 \frac{1}{X_2} - 0,0002 \frac{1}{X_3} - 0,673 \frac{1}{X_1^2} - 1,984 \frac{1}{X_2^2} + 7,174 \frac{1}{X_3^2} + 2,579 \frac{1}{X_1 X_2} - 0,002 \frac{1}{X_1 X_3} - 0,002 \frac{1}{X_2 X_3}$$

Далее была проведена проверка значимости оценок коэффициентов в уравнении регрессии. Оказалось, что значимые эффекты имеют факторы  $\frac{1}{X_1}$ ,  $\frac{1}{X_2}$ ,  $\frac{1}{X_2^2}$ ,  $\frac{1}{X_1 X_2}$ . В

итоге, получили следующую регрессионную модель:

$$Y_3 = 0,086 - 1,155 \frac{1}{X_1} + 0,651 \frac{1}{X_2} - 1,094 \frac{1}{X_2^2} + 1,803 \frac{1}{X_1 X_2}$$

Данная модель является адекватной, так как  $F_{эмт} = 88,392$ , а  $F_{крит} = 3,606$ . Так как  $R^2 = 0,898$ , модель считается работоспособной.

Насыпная плотность формовочной смеси была выражена как логарифмическая зависимость входных параметров:

$$Y_4 = 1,044 + 0,206 \ln X_1 - 0,588 \ln X_2 + 0,012 \ln X_3$$

Проверка значимости оценок коэффициентов в уравнении регрессии показала, что значимые эффекты имеют факторы  $\ln X_1$ ,  $\ln X_2$ . После отбрасывания незначимых факторов из регрессионной модели и пересчета коэффициентов, получили следующую регрессионную модель:

$$Y_4 = 1,806 + 0,205 \ln X_1 - 0,585 \ln X_2$$

Данная модель является адекватной, так как  $F_{эм} = 139,679$ , а  $F_{крит} = 3,220$ . Модель является работоспособной,  $R^2 = 0,869$ .

Полученные эмпирические зависимости показывают связь технологических свойств формовочной смеси с основными компонентами состава:

- влажность формовочной смеси оказывает в 2 раза большее влияние на ее формуемость, чем содержание активного бентонита;
- влажность формовочной смеси оказывает в 3 раза большее влияние на ее уплотняемость, чем содержание активного бентонита;
- содержание активного бентонита оказывает в 2 раза большее влияние на прочность формовочной смеси, чем влажность;
- содержание активного бентонита оказывает в 3 раза меньшее влияние на насыпную плотность формовочной смеси, чем влажность.

Полученные модели могут быть непосредственно использованы для формирования корректирующего воздействия в процессе смесеприготовления, так как они отражают связь свойств формовочной смеси с ее компонентами. На базе полученных эмпирических зависимостей возможно разработать алгоритм корректировки состава формовочной смеси, что позволит стабилизировать свойства формовочной смеси и повысить качество изготавливаемых отливок.

УДК 004

## **ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МЕТОДА «ДЕРЕВО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ»**

**Фурманова А.В.**

*УО «Белорусский государственный экономический университет», г.Минск*

Одной из популярных систем поддержки принятия решений является метод «дерево решений». С помощью этого метода можно принимать решения как по социальным и макроэкономическим вопросам, так и по вопросам развития предприятия или банковской сферы. «Дерево решений» также используются для решения диагностических задач в медицине, биологии, химии и генетике.

Однако построение «дерева решений» чаще всего используется для анализа проектных рисков – при оценке проектов с ограниченным числом возможных вариантов и известными значениями вероятностей того или иного события.