

Технология, оборудование, САПР и экология литейного производства

Using of such statistical instruments as experiment planning and methodology of response surface in order to receive correlation between input-output variable quantities in sandy-argillaceous blends is shown.

М. А. САЙКОВ, РУП «ГЛЗ «Центролит»,
В. М. КАРПЕНКО, Н. П. ДРАГУН, Е. В. ФИЛИПЕНКО, ГГТУ им. П. О. Сухого

УДК 621.74:669.131.7

НЕЛИНЕЙНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕНТРАЛЬНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО ПЛАНА ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ СВОЙСТВ СЫРОЙ ФОРМОВОЧНОЙ СМЕСИ

Введение. Литье металла в одноразовую песчано-глинистую форму – один из самых популярных способов литья. Качество литейной продукции, изготовливаемой в сырых песчаных формах, в значительной степени находится под влиянием свойств формовочного материала, таких, как прочность на сжатие, уплотняемость, твердость и др. Наиболее общие дефекты отливок – песчаные раковины, газовая пористость, размерная неточность, усадочные раковины, пригар и засоры, шлаковые включения, недоливы и т. д. Нестабильность технологических и физико-механических свойств формовочных смесей является одной из основных причин снижения качества и появления брака отливок. При решении задачи стабилизации свойств формовочных смесей необходимо отказаться от жестких универсальных технических условий и перейти к гибкой системе регулирования их свойств в зависимости от состава исходных материалов.

С учетом этого цель работы – 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, крахмалита в смеси.

Данная работа направлена на использование таких статистических инструментов, как планирование эксперимента и методология поверхности отклика, чтобы получить соотношения между входными – выходными переменными в песчано-глинистых смесях.

Планирование эксперимента. 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 [1].

Для разработки математической модели использовали центральный композиционный план, который предназначен для получения регрессионной модели:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + \dots + B_kX_k + B_{12}X_1X_2 + B_{13}X_1X_3 + \dots + B_{k-1,k}X_{k-1}X_k + B_{11}X_1^2 + \dots + B_{kk}X_k^2.$$

Центральный композиционный план наиболее широко применяется при подборе моделей второго порядка. Он представляет собой факторный или дробный факторный план типа 2^k с добавлением $2k$ «осевых» и n_0 центральных точек. Для того чтобы при подборе модели второго порядка можно было оценить ее параметры, план эксперимента должен содержать по меньшей мере три уровня каждого фактора. Предпочтительным в этом случае классом планов для изучения поверхности отклика является класс ротатабельных планов. План эксперимента называется ротатабельным, если дисперсия прогнозируемого значения отклика в некоторой точке зависит только от расстояния от этой точки до центра плана, а не от направления на нее. Это означает, что контуры дисперсии Y являются концентрическими окружностями. Следовательно, при плане, обладающем таким свойством, дисперсия не меняется при вращении плана вокруг центра, отсюда и происходит название – ротатабельный план [2].

В качестве зависимых переменных рассматривали формуемость, уплотняемость, прочность на сжатие, объемную плотность, а в качестве факторов – содержание бентонита, крахмалита и влажность.

Свойства формовочных смесей во влажном состоянии являются функцией содержания воды и бентонита в их составе. Важнейшим параметром песчано-бентонитовых смесей, определяющим все физико-механические и технологические свойства смесей, служит влажность [3]. Изменение влажности бентонитовых смесей сильно влияет на их показатели. 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. Основной задачей контроля влажности является поддержание ее на некотором оптимальном уровне, при котором обеспечивается наилучшее сочетание технологических и рабочих свойств смесей [4].

Количество бентонита, добавляемого в формовочную смесь, определяют исходя из обеспечения необходимой прочности формы. Величина добавки бентонита зависит от его связующей способности, термоустойчивости. Общее глиносодержание поддерживается в пределах 8–14%. Для снижения степени оолитизации смеси необходимо применять бентониты с высокой термохимической устойчивостью, усреднять номенклатуру отливок по массе и объему стержней, выводить часть отработанной смеси из оборота.

Для стабилизации влажности форм, снижения хрупкости и осыпаемости, улучшения точности отпечатка модели, повышения прочности смеси в зоне конденсации влаги и уменьшения склонности к образованию ужимин в песчано-бентонитовые смеси вводят крахмалсодержащие добавки. Такие добавки поглощают значительное количество воды и предохраняют смесь от быстрого высыхания, повышают ее пластические свойства [4].

Уровни варьирования факторов

Уровень	Фактор		
	влажность X_1 , %	содержание активного бентонита X_2 , %	содержание крахмалита X_3 , %
Верхний	4,5	12	0,05
Центральный	3,5	9	0,03
Нижний	2,5	6	0,01
Интервал варьирования	1	3	0,02

Пусть фактор X_1 – это влажность формовочной смеси, фактор X_2 – содержание активного бентонита в 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.

Методика проведения эксперимента. В экспериментах использовали смесь следующего состава: отработанную смесь, кварцевый песок, глину бентонитовую, крахмалит, уголь каменный молотый, воду техническую.

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

Определение влажности формовочной смеси выполняли по ГОСТ 23409.5-78. Метод основан на определении потери массы навески формовочной смеси после высушивания до постоянной массы. От приготовленной формовочной смеси выделяли навеску массой 50 г и сушили в сушильном шкафу при температуре 105–110 °С. Далее ее охлаждали и сушили. Массовую долю влаги рассчитали в процентах.

Содержание активного бентонита определяли по ГОСТ 23409.14-78. Данный метод основан на свойстве активного бентонита адсорбировать краситель метиленовый голубой. Для проведения испытания от пробы формовочной смеси выделяли навеску массой 5 г, помещали в сосуд и наливали 50 см³ раствора пирофосфата натрия. Сосуд с суспензией помещали на магнитную мешалку и перемешивали в течение 10 мин. Затем в суспензию из бюретки добавляли 70–80% рассчитанного объема раствора метиленового голубого. Перемешивали на мешалке в течение 2 мин. После каждого добавления раствора метиленового голубого и перемешивания отбирали пипеткой каплю суспензии и переносили ее на фильтр. Операцию повторяли до появления на фильтре вокруг суспензии зелено-голубого ободка-ореола, затем в бюретке измеряли объем метиленового голубого, израсходованного на титрование. По градуировочной

кривой определяли количество активного бентонита в смеси в процентах.

Формуемость определяли по ГОСТ 23409.15-78. Она характеризует вязкость смесей в уплотненном состоянии, т. е. способность формовочной смеси хорошо распределяться по высоте и площади опоки. Формуемость зависит от влажности смеси: чем ниже влажность, тем выше формуемость. При формуемости 75–85% смесь приобретает оптимальные свойства, гарантирующие равномерную плотность формы по объему. Формуемость, характеризующая состояние воды в смеси, имеет постоянное значение при сохранении постоянного соотношения вода/бентонит в песчано-бентонитовой смеси. При заниженных показателях формуемости затрудняется процесс перемешивания компонентов и равномерность их распределения в объеме смеси, увеличивается оолитизация зерен песчаной основы, что приводит к дефектам на поверхности отливок [3]. Определение формуемости по ГОСТ 23409.15-78 производится по методике, предложенной Дитертом, путем просеивания за определенное время пробы смеси через вращающийся сетчатый барабан и оценивается как отношение массы смеси, прошедшей через ячейки сита, к исходной массе пробы. Для проведения испытания от пробы смеси, отобранной для испытания, выделяли навеску массой 200 г и помещали в середину сетчатого барабана, вращающегося в горизонтальной плоскости. Барабан вращался в течение 10 с. Прошедшую через стенку барабана смесь взвешивали. Далее рассчитывали формуемость смеси в процентах.

Влагосодержание формовочной смеси определяет уровень ее насыпной плотности и уплотняемости, что в значительной степени влияет на эффективность и качество процесса формообразования.

Уплотняемость формовочной смеси и показатель насыпной плотности регламентируются ГОСТ 23409.13-78. Уровень уплотняемости зависит от влажности песчано-бентонитовой смеси, размеров и формы зерен песчаной основы и содержания бентонита. Завышенный уровень уплотняемости приводит к вздутию форм, а при низкой уплотняемости повышается осыпаемость формы, появляются земляные раковины и другие дефекты отливок. При формовке по-сырому для автоматических линий рекомендуется поддерживать уровень уплотняемости в пределах 35–45%, а в условиях машинной и ручной формовки – 40–60% [3]. Для проведения испытания от пробы смеси, отобранной для испытания, выделяли навеску массой 600 г. Данной смесью заполняли стальную не-

разъемную гильзу через воронку. Излишки смеси срезали вровень с краем гильзы. Смесью в гильзе уплотняли тремя ударами копра, замеряли расстояние от поверхности уплотненного образца до края гильзы. Далее рассчитывали уплотняемость формовочной смеси в процентах.

Затем для определения насыпной плотности образец выталкивали из гильзы и взвешивали. Показатель насыпной плотности формовочных смесей характеризует степень однородности плотности смеси по объему формы. Повышение насыпной плотности способствует выравниванию плотности смеси в процессе формообразования, но в ряде случаев приводит к изменению точности отливок (углубление на развитых поверхностях). Заниженная насыпная плотность формовочной смеси вызывает оолитизацию зерен песчаной основы, механический и химический пригар.

Литейная форма должна обладать определенной прочностью, которая достигается уплотнением формовочной смеси в процессе изготовления формы. Прочность должна находиться в интервале между верхним и нижним пределом. Верхний предел выбирается таким образом, чтобы форма не разрушалась при извлечении модели, кантовке, транспортировке, сборке, заполнении жидким металлом и под действием гидростатического напора жидкого металла. Нижний предел прочности выбирается следующим образом.

1. В процессе затвердевания форма не должна оказывать сопротивления усадке отливки и вызывать появления в ней внутренних напряжений и трещин.

2. Во время выбивки отливки форма должна легко разрушаться.

Прочность песчано-глинистой смеси во влажном состоянии зависит от зернового состава песка, влажности, содержания глины, ее связующей способности, а также от плотности. С увеличением содержания влаги в смеси выше оптимального прочность смеси падает [5].

Предел прочности при сжатии во влажном состоянии регламентируется ГОСТ 23409.7-78. Недостаточная прочность при сжатии приводит к разупрочнению форм, их деформации, что зачастую является следствием нарушения оптимальности состава формовочной смеси. Это вызывает ухудшение качества поверхности отливок (подуточность, механический пригар), а также способствует появлению земляных раковин и засоров в отливке. Для определения предела прочности при сжатии влажной формовочной смеси изготавливали стандартный образец. Образец помещали в соответствующее приспособление прибора для

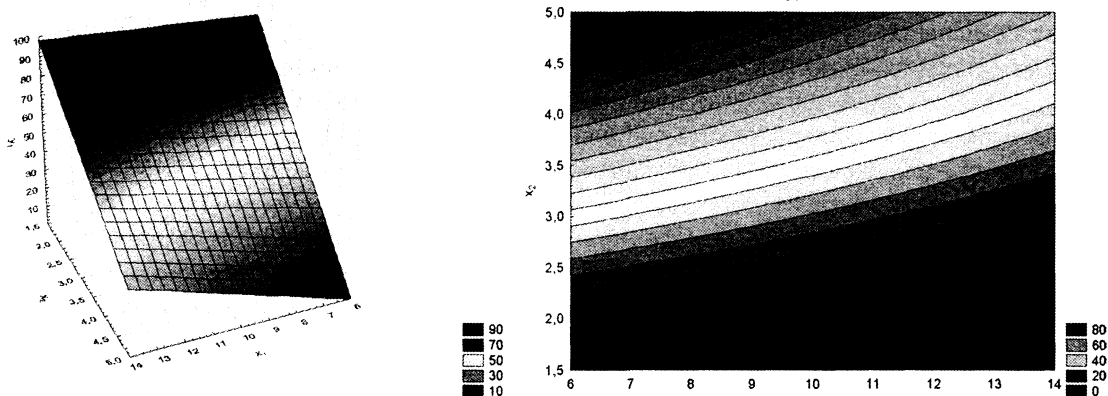


Рис. 1. Геометрическое представление функции отклика для формемости

определения прочности и фиксировали результаты по его показаниям.

Обработка результатов эксперимента. В качестве экспериментальных данных использовали результаты трех реплик построенного центрального композиционного плана. Для оценки результатов эксперимента применяли статистические методы, а также использовали программный продукт STATISTICA 6.0.

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

$$Y_1 = 202,045 - 2,145X_1 - 63,416X_2 - 1132,439X_3 - 0,029X_1^2 + 2,898X_2^2 + 5960,668X_3^2 + 1,650X_1X_2 + 16,281X_1X_3 + 204,793X_2X_3.$$

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 $t_{\text{эмп}} > t_{\text{крит}}$ то нулевая гипотеза должна быть отвергнута. Следовательно, коэффициент значимо отличается от нуля и его следует сохранить в регрессионной модели. Если же $t_{\text{эмп}} \leq t_{\text{крит}}$ нулевая гипотеза принимается, соответствующий коэффициент регрессии полагается незначимым и исключается из регрессионной модели [6]. 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 получаем модель, содержащую лишь значимые коэффициенты регрессии:

$$Y_1 = 124,720 - 30,515X_2 + 0,915X_1X_2.$$

Для полученного уравнения регрессии проводили проверку его адекватности. Данную проверку осуществляли с помощью F -критерия Фишера, численное значение которого сравнивали с табличным критическим значением. Если $F_{\text{эмп}} \leq F_{\text{крит}}$ то нет оснований отклонять нулевую гипотезу. Если же $F_{\text{эмп}} > F_{\text{крит}}$ то гипотеза об отсутствии линейной связи отвергается [7]. Так как $F_{\text{эмп}} = 99,593$, а $F_{\text{крит}} = 3,204$, значит, построенная регрессионная модель для формуемости является адекватной.

Возможность использования уравнения регрессии для предсказания значения отклика оценивали при помощи анализа работоспособности модели. Модель может считаться работоспособной, если коэффициент детерминации $R^2 \geq 0,75$ [8].

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

На рис. 1 показаны поверхность отклика и контурный график для формуемости.

Анализируя построенную поверхность, можно сделать вывод, что с увеличением влажности формовочной смеси формуемость уменьшается. При уменьшении влажности и увеличении содержания активного бентонита формуемость увеличивается.

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:

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

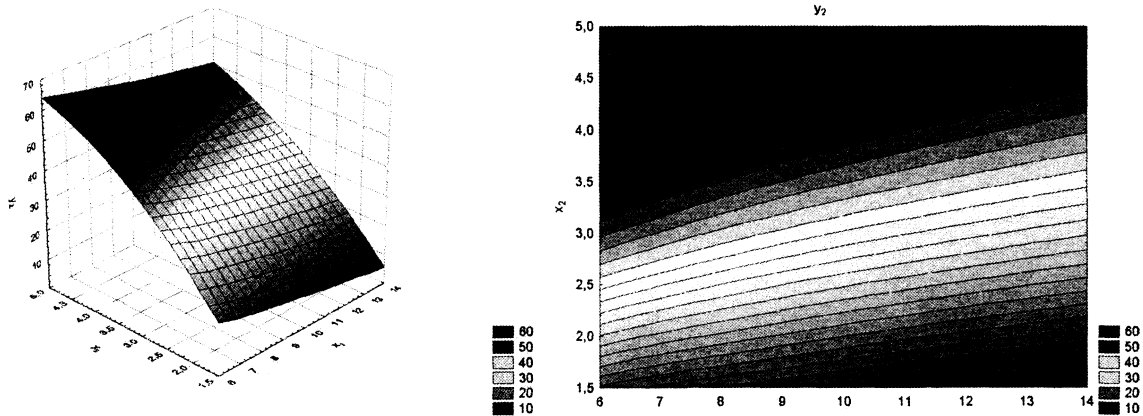


Рис. 2. Геометрическое представление функции отклика для уплотняемости

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 $F_{эмп} = 117,956$, а $F_{крит} = 3,220$. Так как $R^2 = 0,849$, модель считается работоспособной.

На рис. 2 показаны поверхность отклика и контурный график для уплотняемости.

Анализируя построенную поверхность, можно сделать вывод, что с увеличением влажности формовочной смеси уплотняемость повышается. При уменьшении содержания активного бентонита уплотняемость также увеличивается.

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 $F_{эмп} = 88,392$, а $F_{крит} = 3,606$. Так как $R^2 = 0,898$, модель считается работоспособной.

На рис. 3 показаны поверхность отклика и контурный график для прочности.

Анализируя построенную поверхность, можно заметить, что при уменьшении влажности прочность увеличивается до определенного значения. Также при увеличении содержания в формовочной смеси активного бентонита прочность повышается до определенного значения.

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

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

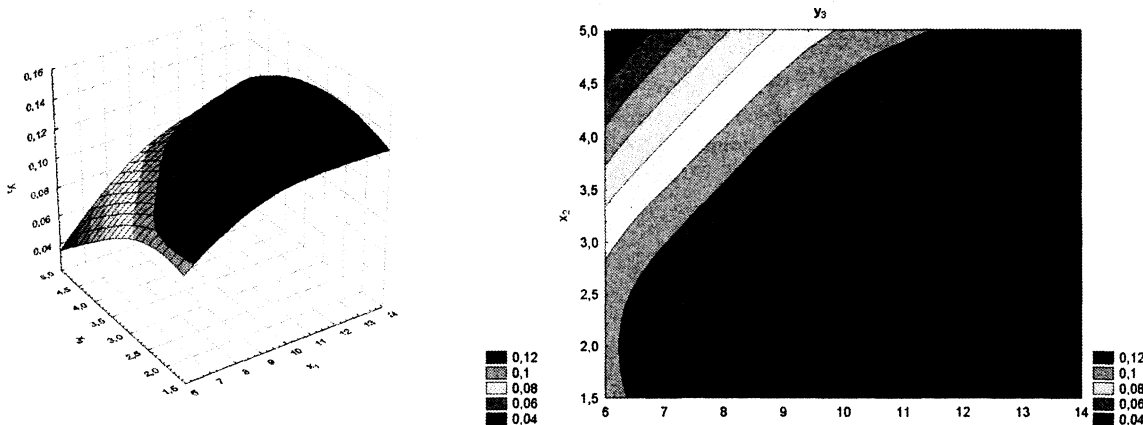


Рис. 3. Геометрическое представление функции отклика для прочности

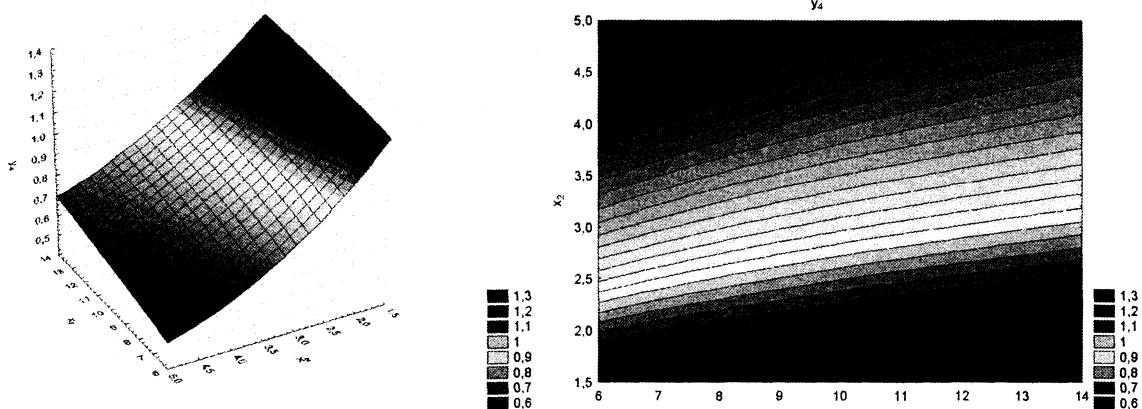


Рис. 4. Геометрическое представление функции отклика для насыпной плотности

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 $F_{\text{эмп}} = 139,679$, а $F_{\text{крит}} = 3,220$. Модель является работоспособной, $R^2 = 0,869$.

На рис. 4 показаны поверхность отклика и контурный график для насыпной плотности.

Анализируя построенную поверхность, можно заметить, что для исследуемого диапазона содержания компонентов при увеличении содержания бентонита насыпная плотность увеличивается, а при увеличении влажности насыпная плотность уменьшается.

Выводы. 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 зависимости могут быть непосредственно использованы для формирования корректирующего воздействия в процессе смешивания, 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.

Литература

1. Ящерицын П. И., Махаринский Е. И. Планирование эксперимента в машиностроении. Мн.: Выш. шк., 1985.
2. Монтомгери Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных / Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1980.
3. Жуковский С. С. Формовочные материалы и технология литейной формы. М.: Машиностроение, 1993.
4. Дорошенко С. П., Авдокушин В. П., Русин К., Мацашек И. Формовочные материалы и смеси. Киев: Выща шк., 1990.
5. Степанов Ю. А., Семенов В. И. Формовочные материалы. М.: Машиностроение, 1969.
6. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высш. шк., 1999.
7. Луговская Л. В. Эконометрика в вопросах и ответах / Учеб. пособ. М.: ТК Велби, Изд-во Проспект, 2005.
8. Красовский Г. И., Филаретов Г. Ф. Планирование эксперимента. Мн.: Изд-во БГУ им. В. И. Ленина, 1982.