

УДК 621.74:669.131.7

## РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ ФОРМОВОЧНОЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЕЕ СОСТАВА

**В. М. КАРПЕНКО, Е. В. ФИЛИПЕНКО**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### **Введение**

Литье металла в одноразовую песчано-глинистую форму, или литье «в землю» является исторически наиболее древней технологией литья. Более 75–80 % отливок из черных и цветных сплавов получают в настоящее время в песчаных формах различными методами (встряхиванием, прессованием, воздушно-импульсным процессом, химическим отверждением и др.).

Несмотря на постепенное развитие специальных методов литья, которые более экологичны и которые дают отливки по чистоте поверхности и геометрической точности более высокого класса, процессы литья в песчаные формы продолжают совершенствоваться и, следует полагать, будут существовать еще долгое время. Развитие существующих и создание новых технологических процессов (прессование, прессование с предварительным встряхиванием, прессование в сочетании с вибрацией, прессование в сочетании с предварительным импульсным уплотнением воздухом или газом низкого или среднего давления, импульсная формовка) требуют нового подхода к составам, физико-механическим, реологическим и технологическим характеристикам формовочных смесей. Если раньше смеси для формовки по-сырому контролировали в основном по трем характеристикам (прочность, влажность, газопроницаемость), то в последние годы диапазон контролируемых параметров значительно расширился. Таким образом возникает потребность в новом подходе к оценке качества песчано-глинистых формовочных смесей, требуется создание принципиально новых автоматизированных систем управления процессом смесеприготовления.

Основной причиной неудовлетворительного качества отливок считают нестабильность параметров смесей, применяемых при изготовлении формы. Стабильность состава и свойств смесей зависит от качества исходных материалов, металлоемкости залитых форм, общего количества смеси в системе, параметров и состава отработанной оборотной смеси, технологии ее подготовки и других факторов [1]. При многоменклатурном производстве отливок существенно усложняются требования к регулированию состава и свойств формовочных смесей, выполнить которые в полном объеме без использования специального смесеприготовительного оборудования, средств контроля и управления, в том числе компьютеров и соответствующих программ, навыков работы персонала чрезвычайно трудно [2].

Наиболее трудным и до сих пор практически не решенным является вопрос о расчете изменения дозы исходных компонентов формовочной смеси в зависимости от численного значения реологических свойств. Иными словами, в каком количестве необходимо внести свежие добавки, чтобы получить желаемые свойства смеси.

### Анализ состава и свойств смеси

Известно, что для каждого сплава, с учетом метода изготовления литейной формы, подбирают формовочную смесь с комплексом необходимых технологических и термомеханических свойств. Нет универсальных смесей, поэтому необходимо постоянно совершенствовать составы, находить оригинальные решения применительно к конкретной номенклатуре отливок и реальным условиям производства. Основа смесей и начальные параметры могут быть общими при запуске системы, затем проводится этап отработки технологии. Конечная цель – получение высококачественной, точной заготовки с наименьшими энергетическими и материальными затратами. Формовочная смесь в общем виде – это комплекс материалов, подобранных в определенном соотношении в соответствии с требуемыми параметрами свойств. До настоящего времени наиболее распространена в литейных цехах песчано-глинистая формовочная смесь. Она состоит из наполнителя, органических веществ, оолитических материалов, инертной мелочи и пыли, и эта масса связана водной глиняной коллоидной системой. Зерна наполнителя несут на себе остатки пленок связующего, спекшейся шамотизированной глины, коксовые образования [1], [3]. Содержание всех компонентов, входящих в состав смеси, должно поддерживаться в определенных пределах.

Кокс, оолитические материалы, инертная мелочь повышают потребность в воде. Для достижения требуемых технологических свойств необходимо увеличивать влажность смеси. Инертная мелочь (частицы аморфной глины после термообработки, продукты дробления скорлупок и зерен кварца) и пыль снижают газопроницаемость формы и также увеличивают потребность в воде, т. е. увеличивается вероятность возникновения газовых дефектов [4].

Количество бентонита в смеси (общее глиносодержание) определяют необходимой прочностью 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.

Бентониты вводят в порошкообразном состоянии или в виде водной суспензии, иногда применяют оба способа. В порошкообразном виде вводят бентонит непосредственно в смеситель или для улучшения усвоения при подготовке смеси. Часть бентонита в этом случае теряется при вводе, что ухудшает санитарное состояние на смесеприготовительном участке. Другая часть несвязанного бентонита теряется в вентсистемах с общей пылью, в системах подготовки смеси и в процессе регенерации.

Мокрый способ ввода глинистого связующего позволяет использовать более полно связующую способность глины, так как она вводится в жидко-пластичном (набухшем) состоянии, хорошо распределяется на зернах песка, при этом улучшаются санитарно-гигиенические условия труда на участке смесеприготовления.

На самом деле технология приготовления смесей с применением глинистой суспензии имеет много недостатков. Основные из них следующие [5]:

- отсутствует возможность подгонять концентрацию глины в суспензии под изготавливаемую номенклатуру отливок или различные системы смесеприготовления, что обуславливает нестабильные параметры смеси;
- в большинстве литейных цехов остаточная влажность отработанной смеси практически равна нулю и глина на зернах песка непластична. В составе суспензии вводится < 10 % увлажненной глины от общего ее количества в смеси, а 90 % глины

находится в ней в сухом состоянии. Эта пластичная составляющая не оказывает существенного влияния на изменение технологических параметров смеси;

- неудовлетворение распределения глины по зернам песка при применении суспензии не позволяет получать смесь со стабильным составом и свойствами, а отливки – без пригара и размыва;
- приготовление суспензии – еще один производственный участок в литейном цехе;
- отсутствие очистки суспензии от посторонних предметов – это засоренность смеси и, как следствие, ухудшение качества поверхности отливок;
- большие трудности в автоматизации дозирования суспензии в бегуны.

При использовании для приготовления смесей бентопорошка возможно расчитать необходимое освежение для любой изготавливаемой номенклатуры отливок и, в среднем, на смесеприготовительную систему. Воду регулируют по заданной влажности, насыпной массе или уплотняемости, и смесь получается более стабильной по составу и технологическим параметрам, чем с использованием суспензии. Управление технологическими параметрами смеси с бентопорошком значительно упрощается.

Недостаточные продолжительность и интенсивность перемешивания требуют повышенного расхода бентонита, увеличения влажности и снижают технологические свойства (повышается осыпаемость, пригар, увеличивается склонность к ужинообразованию).

Основной противопригарной добавкой в составе формовочных смесей является молотый каменный уголь, применение которого наиболее целесообразно ввиду его сравнительно низкой стоимости, доступности и эффективности.

Содержание традиционных противопригарных добавок в формовочной смеси обычно составляет: угля (средний размер фракции 0,16–0,2 мм) молотого – 2–6 %; мазута – до 1 %. Каменный уголь дает выход блестящего углерода при взаимодействии с расплавом в форме – до 12, а мазут – до 50 %. Количество летучих, выделяющихся из углей, – до 30, а при возгонке мазута – до 90 %. Образующиеся газы фильтруются внутрь формы и адсорбируются на зернах смеси, снижая газопроницаемость. Уголь дает низкий выход блестящего углерода, а мазут вызывает обильное дымовыделение, поэтому лучше избегать применения противопригарных добавок в больших количествах, а при производстве средних и крупных отливок необходимо окрашивать формы противопригарными покрытиями, которые не требуют дополнительной сушки.

В смесях, используемых при производстве чугунных отливок, избыток содержания угля может привести к образованию газовой пористости на отливках, а накопившийся на зернах песка кокс способствует образованию ужимин.

В практике при производстве мелких и средних отливок применяют комплексные добавки, содержащие компоненты, улучшающие противопригарные, связующие, пластические, технологические свойства смесей. Такими компонентами могут быть молотые угли, крахмалит, кальцинированная сода, поверхностно-активные вещества. Комплексная добавка обычно содержит необходимое количество бентонита. Крахмалит дают для улучшения пластических свойств смеси и как противужиминную добавку. Он повышает прочность формы в зоне конденсации влаги и поверхностную прочность (снижает осыпаемость). Крахмалит вводят обычно в смесители, и он, как и бентонит, проявляет свои пластические свойства только после увлажнения и набухания. Этот процесс может занять несколько оборотов смеси, и важно не превысить общее содержание крахмалита: содержание его в смеси должно поддержи-

ваться до 0,6–1,0 %. Поэтому есть смысл давать его вместе с бентонитом на стадии подготовки отработанной смеси. Инертная мелочь и пыль могут содержаться в смеси в пределах до 15 %: чем ниже степень их чистоты, тем больше общее содержание.

Металлические материалы занимают в объеме смесей небольшую часть, поэтому многие специалисты не рассматривают влияния этого компонента на свойства смесей. Но спецанализ обнаруживает частички железа, его оксиды и оксиды других металлов, общее их содержание может быть до 2 %, и они могут оказывать влияние на технологические свойства смеси [1].

Оолитические материалы присутствуют в смеси в виде скорлупок, отделившихся от зерен песка в процессе приготовления и подготовки смеси, и в виде наростов и оболочек, прочно связанных с зернами [4]. В составах формовочных смесей, работающих с низким содержанием базового минерала, содержание оолитических материалов может превышать 15 %. Количество потребной воды при постоянной уплотняемости отражает степень оолитизации смеси. Оолитические материалы и инертная мелочь увеличивают потребность в воде. Их определяют обычно косвенным способом, по снижению плотности уплотненного образца смеси, так как плотность оолитического материала значительно ниже плотности кварца и составляет в среднем 2050 кг/м<sup>3</sup>. Другим методом наличие оолитических материалов определяют более точно, используя при химанализе метод отмывки образца смеси фосфорной кислотой при температуре 400 °С.

В поддержании постоянного равновесия между попадающими в смесь свежими формовочными материалами и выводимыми из нее неактивными продуктами при одновременной замене части отработанной смеси заключается задача стабилизации свойств формовочной смеси путем освежения.

Наиболее оптимальный уровень освежения формовочных смесей в ряде случаев не превышает 5–10 % от общего объема смеси, однако в связи с необходимостью компенсации потери формовочной смеси зачастую степень освежения достигает 10–20 % [3].

Количеством свежего песка, вводимого при освежении, регулируется критическое содержание мелочи в формовочной смеси и ее газопроницаемость. Содержание бентонита в объеме освежения определяется заданной прочностью смеси, а количество углеродсодержащих и прочих технологических добавок зависит от потребления бентонита и рассчитывается пропорционально его количеству.

Свойства единых формовочных смесей во влажном состоянии являются функцией содержания воды и бентонита в их составе. Необходимое количество воды, вводимой в смесители при изготовлении формовочной смеси, определяют из расчета: до 0,5 % – на смачивание песчаной основы смеси, около 0,3 % – на каждый один процент шамотизированных частиц и каменноугольной пыли суммарно, а также количества воды, необходимого для наиболее эффективного использования связующей способности активного бентонита, определяемого при входном контроле поступающего в производство связующего материала. При этом учитываются влажность исходного бентонита и оборотной формовочной смеси и температура последней [3].

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.

Исследования свойств формовочной смеси с позиции реологии, особенно в последние 15–20 лет, дают очень богатый материал как в плане развития теории процессов смесеприготовления, так и в плане усовершенствования экспериментальных

методов исследования. При этом формовочная смесь рассматривается как сложное реологическое тело, обладающее всеми тремя фундаментальными свойствами реологического тела.

### **Постановка задачи**

Целью работы является выявление теоретических закономерностей, отражающих взаимосвязь рецептурного состава формовочной смеси и ее реологических свойств. А также на базе полученных закономерностей разработать рекомендации по корректировке состава формовочной смеси. Таким образом, поддержание состава формовочной смеси на уровне, обеспечивающем оптимальные ее свойства, позволит повысить качество изготавливаемых отливок.

Для создания автоматизированной системы управления смесеприготовлением необходимо знать количественную зависимость между реологическими параметрами формовочной смеси и ее компонентным составом. В качестве варьирующих компонентов могут выступать: свежий песок, связующее, например, глина бентонитовая, экструзионно-крохмалосодержащий реагент, а также различные добавки.

На кафедре «МиТЛП» ГГТУ им. П. О. Сухого совместно с кафедрой «Литейное производство» Московского индустриального университета и лабораторией формовочных материалов ЗИЛ проводились исследования по установлению корреляционной зависимости реологических и технологических свойств формовочной смеси с основными компонентами ее состава. В результате было установлено, что реологические свойства наиболее чутко реагируют на изменения в исходных компонентах смеси. Оценка корреляционных связей реологических свойств с отдельными компонентами смеси показала, что содержание влаги и бентонита оказывает определяющее влияние свойства смеси [6].

Исходя из вышесказанного, в опытах изменяли содержание влаги и бентонита, так как влияние этих факторов на свойства смеси определяющее и представляет собой особый интерес.

Для формирования корректирующего воздействия в процессе смесеприготовления возникает необходимость разработки эмпирических моделей формовочной смеси, отражающих связь реологических свойств с компонентами смеси (содержание связующего бентонита  $B$  и влажностью  $W$ ).

### **Проведение испытаний**

В экспериментах использовалась смесь следующего состава: 93,38–90 % отработанной смеси; 6,1–7,8 % кварцевого песка; 0,33–1,33 % глины бентонитовой; 0,047–0,12 % связующего КО; 0,01–0,026 % крахмалита; 0,13–0,67 % угля каменного молотого; воду техническую. Влажность готовой смеси 3,3–3,6 %, содержание активного бентонита 6–11 %.

В процессе проведения исследования для приготовления смеси применялся лабораторный смеситель (модель LM-2), весы лабораторные (модель ВЛК-500г-м ГОСТ 24104–88), уплотнение образцов из песчано-глинистой смеси для испытаний проводится тремя ударами копра лабораторного (модель L4). Анализ влажности проводили высушиванием проб до постоянного веса и последующим взвешиванием на электрических весах. Содержание активного бентонита в смеси оценивали по поглощению метиленового голубого красителя. Измерение образцов на сжатие и срез производилось на приборе для измерения прочности (модель 04116А). Для оценки реологических характеристик применялся прибор одноосного сжатия, разработанный профессором Матвеевко И. В.

Была проведена серия опытов, в которых измерялась деформация смеси и предел прочности при изменении содержания бентонита и влажности. В качестве зависи-

мых переменных принимаются прочность и деформация смеси, а в качестве факторов – содержание бентонита и влажность. Пусть фактор  $W$  – это влажность формовочной смеси, фактор  $B$  – содержание бентонита в смеси. Отклик эксперимента –  $\tau$  и  $\varepsilon$ , соответственно прочность и деформация смеси.

Таблица 1

## Уровни варьирования факторов

Факторы	Уровни			Размерность
	верхний	центральный	нижний	
$Bt$	12	9	6	%
$W$	6	45	3	%

Чтобы определить адекватность моделей, описывающих зависимость между долями компонентов смеси и ее реологическими свойствами, использовался центральный композиционный рототабельный план.

Подбор подходящей модели осуществлялся методом перебора и выбором лучшей на основании определенных критериев. Рассмотрим анализ для степенной зависимости вида  $\varepsilon = \alpha W^{\alpha_1} B^{\alpha_2}$  и  $\tau = \beta W^{\beta_1} B^{\beta_2}$ . Представим данную степенную зависимость в линейном виде, для чего выполняется переход к переменным  $\alpha^* = \text{Ln}\alpha$ ,  $\beta^* = \text{Ln}\beta$ ,  $W^* = \text{Ln}W$ ,  $B^* = \text{Ln}B$ ,  $\varepsilon^* = \text{Ln}\varepsilon$ ,  $\tau^* = \text{Ln}\tau$ . Таким образом получаем  $\varepsilon^* = \alpha^* + \alpha_1 W^* + \alpha_2 B^*$  и  $\tau^* = \beta^* + \beta_1 W^* + \beta_2 B^*$  [7].

План эксперимента представлен в табл. 2.

Таблица 2

## План эксперимента (2/1/10)

Номер опыта	Порядок реализации опытов	$\text{Ln}B$	$\text{Ln}W$
1	3	-2,20727	-3,41125
2	7	-2,40795	-3,52407
3	9 (С)	-2,40795	-3,18206
4	4	-2,20727	-2,99573
5	8	-2,40795	-2,92768
6	2	-2,65926	-2,99573
7	10 (С)	-2,40795	-3,18206
8	6	-2,13466	-3,18206
9	5	-2,78522	-3,18206
10	1	-2,65926	-3,41125

## Обработка результатов эксперимента

Далее проводился анализ полученных данных с помощью программы STATISTICA. Прежде всего для свойств оценивалась адекватность модели второго порядка.

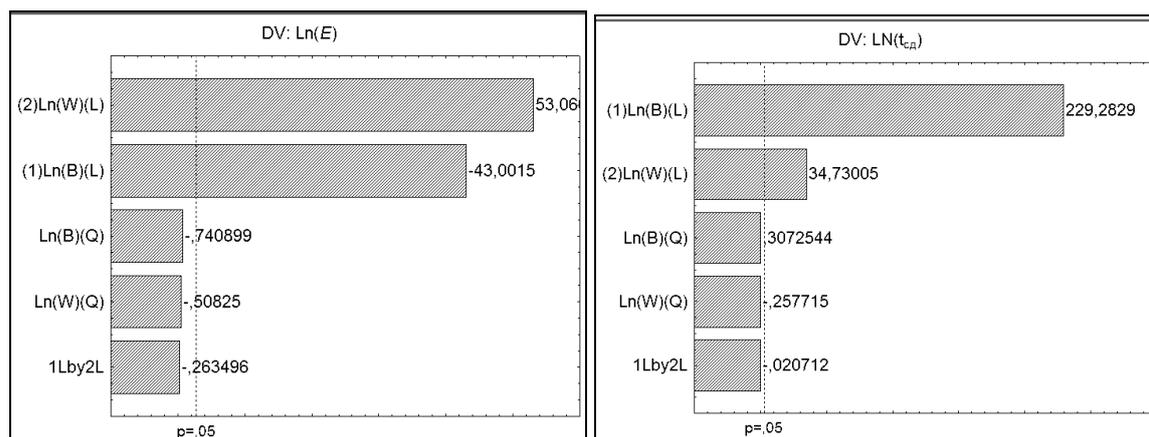


Рис. 1. Диаграмма Парето для эффектов

Проведенный эксперимент показал, что имеется зависимость между свойствами и факторами и что для прочности и деформации значимые эффекты имеют два линейных члена:  $\text{Ln}B(L)$  и  $\text{Ln}W(L)$  (рис. 1). Соответствующие им колонки пересекают вертикальную линию, которая представляет 95 % доверительную вероятность. Статистическая значимость подтверждается значением  $F_{\text{набл}} > F_{\text{крит}}$  при  $p$ -уровне  $p < 0,05$ , а также значением  $R^2$ , близким к единице (коэффициент детерминации для деформации равен 0,99919 и 0,99993 – для прочности). Коэффициент детерминации показывает, в какой степени колебания свойств смеси можно отнести на изменение содержания компонентов [8]. После нахождения модели можно графически представить поверхность отклика (рис. 2).

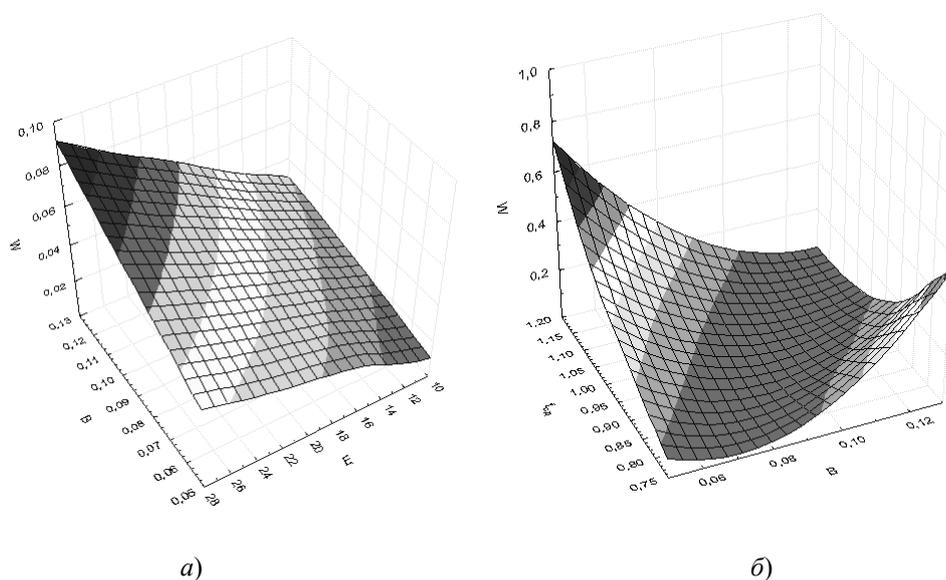


Рис. 2. График поверхности отклика: а – для деформации; б – для прочности

Для более детального рассмотрения области максимума целесообразно рассмотреть контурный график. На графике показаны линии уровня поверхности. Это весьма удобно для исследования поверхности (рис. 3).

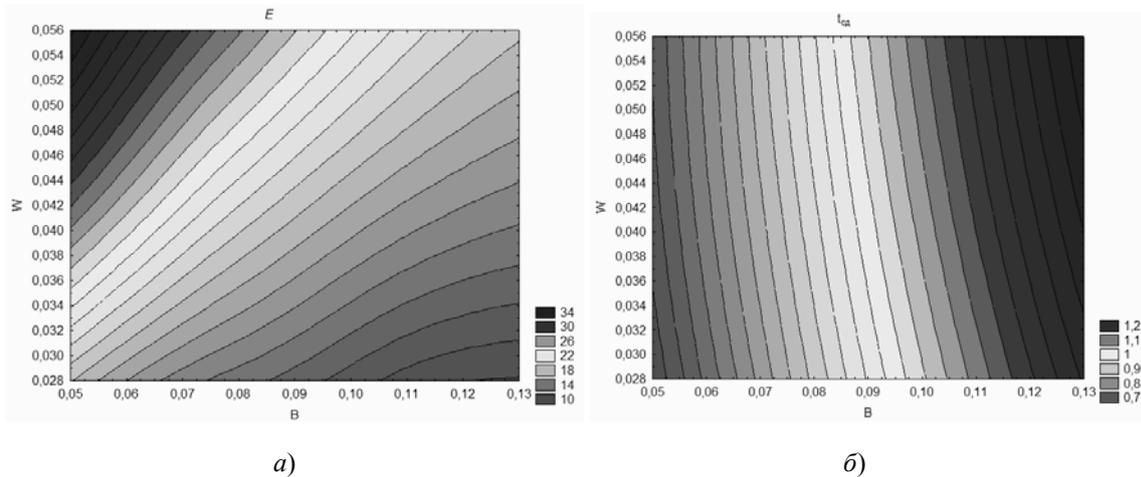


Рис. 3. Зависимость деформации сжатия от влажности и содержания бентонита (а); зависимость предела прочности на срез от влажности и содержания бентонита (б)

Далее методом наименьших квадратов были найдены коэффициенты линейных уравнений регрессии (рис. 4) и и получены зависимости  $\varepsilon = f(B, W)$  и  $\tau = f(B, W)$ .

Factor	Regr. Coefficients; Var.:LN(тсд); R-sqr=,99993; Adj:,9999 (обработка данных) 2 factors, 1 Blocks, 10 Runs; MS Residual=,0000019 DV: LN(тсд)					
	Regressn	Std.Err.	t(7)	p	-95, %	+95, %
Mean/Interc.	1,875792	0,009049	207,2877	0,000000	1,854394	1,897190
(1)Ln(B)(L)	0,642163	0,002123	302,4400	0,000000	0,637142	0,647184
(2)Ln(W)(L)	0,105846	0,002315	45,7308	0,000000	0,100373	0,111319
Factor	Regr. Coefficients; Var.:LN(тсд); R-sqr=,99906; Adj:,99879 (обработка данных) 2 factors, 1 Blocks, 10 Runs; MS Residual=,0000071 DV: Ln(E)					
	Regressn	Std.Err.	t(7)	p	-95, %	+95, %
Mean/Interc.	4,219253	0,055451	76,0903	0,000000	4,088133	4,350372
(1)Ln(B)(L)	-0,706012	0,013011	-54,2639	0,000000	-0,736778	-0,675247
(2)Ln(W)(L)	0,950215	0,014183	66,9979	0,000000	0,916678	0,983752

Рис. 4. Регрессионные коэффициенты

Таким образом, для исследуемой смеси эмпирическая зависимость имеет вид:

1) при сжатии  $\varepsilon = 21,96W^{0,950}B^{-0,706}$ .

2) при сдвиге  $\tau = 0,206W^{0,106}B^{0,642}$ .

Значимость коэффициентов уравнений регрессии подтверждается значением  $t_{\text{набл}} > t_{\text{крит}}$ , при  $p < 0,05$ .

### Заключение

Полученная эмпирическая зависимость показывает связь реологических параметров с основными компонентами состава формовочной смеси:

- содержание бентонита в формовочной смеси оказывает в 2 раза меньшее влияние на ее деформационные характеристики, чем влажность;
- содержание бентонита в формовочной смеси оказывает в 4 раза большее влияние на ее прочностные характеристики, чем влажность.

Данная зависимость может быть непосредственно использована для формирования корректирующего воздействия в процессе смесеприготовления, так как она отражает связь с компонентами формовочной смеси.

На базе эмпирических зависимостей разработан алгоритм корректировки состава формовочной смеси. Основываясь на данном алгоритме для современных смесеприготовительных систем, использующих ЭВМ, разработана программа в системе программирования Delphi. Программа работает следующим образом. В окне формы программы отображаются диапазоны требуемых свойств смеси. Имеются три метки для ввода массы загрузки смеси в смеситель, прочности и деформации смеси. После ввода всех данных нажимается кнопка «Расчет», и по известным свойствам смеси ( $\tau$ ,  $\epsilon$ ) и массе выдает процентное содержание в ней бентонита и ее влажность, а также выводится сообщение о свойствах смеси. В соответствии с требуемыми свойствами смеси выдаются рекомендации для корректировки состава.

### Литература

1. Евлампиев, А. А. Общие положения и рекомендации при выборе процессов приготовления и составов формовочных смесей / А. А. Евлампиев, Е. А. Чернышов, А. В. Королев // Литейное пр-во. – 2005. – № 8. – С. 10–13.
2. Кваша, Ф. С. Возможности стабилизации качества единой формовочной смеси в литейных цехах. Часть I / Ф. С. Кваша, Л. П. Туманова, Д. В. Скарюкин // Литейное пр-во. – 2004. – № 4. – С. 16–19.
3. Жуковский, С. С. Формовочные материалы и технология литейной формы / С. С. Жуковский. – Москва : Машиностроение, 1993. – 432 с.
4. Дубровина, Н. В. Оолитизация зерновой основы формовочной смеси как одна из причин нестабильной влажности / Н. В. Дубровина // Литейное пр-во. – 2003. – № 1, 2. – С. 25–28.
5. Мухоморов, И. А. Проблемы стабильности технологических параметров формовочных смесей / И. А. Мухоморов // Литейное пр-во. – 2003. – № 4. – С. 10–11.
6. Матвеевко, И. В. Реологические основы испытаний формовочных смесей и импульсного уплотнения : учеб. пособие / И. В. Матвеевко, В. С. Бельчук. – Москва : МАСИ, 1991. – 87 с.
7. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. – Москва : Мир, 1972. – 381 с.
8. Адлер, Ю. П. Введение в планирование эксперимента / Ю. П. Адлер. – Москва : Металлургия, 1968. – 155 с.

*Получено 23.10.2008 г.*