

УДК 621.74:66.02

DOI: 10.15587/2312-8372.2019.169748

ВЫЯВЛЕНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СВОЙСТВ ХОЛОДНОТВЕРДЕЮЩЕЙ ЖИДКОСТЕКОЛЬНОЙ СМЕСИ С ПРОПИЛЕНКАРБОНАТОМ ПРИ ОТКЛОНЕНИИ В ДОЗИРОВАНИИ КОМПОНЕНТОВ

Акимов О. В., Пензев П. С., Мариненко Д. В., Салтыков Л. А.

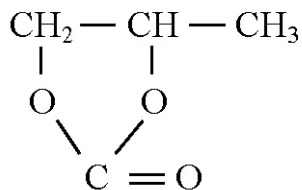
1. Введение

Повышение качества формовочных смесей является обязательным условием получения качественных отливок машиностроительного назначения. Если отливки являются ответственными и к ним предъявляются повышенные свойства по геометрической и размерной точности, например, литые детали двигателей внутреннего сгорания (ДВС), то управление качеством формовочных смесей (ФС) приобретает особую актуальность. Высокое качество ФС является также одним из факторов ресурсосбережения, так как позволяет получать более чистую поверхность отливок, снижая величины припусков на механическую обработку. Поэтому перед химической промышленностью, специализирующейся на синтезе компонентов ФС для литейного производства стоят задачи поиска наилучших решений по компонентному составу ФС в части, касающейся использования связующих и катализаторов. В этом направлении ведутся активные разработки, среди которых могут быть отмечены, например, работы [1, 2], в которых исследовано влияние отвердителей на свойства ФС, в частности их регенерируемых способностей. Улучшение свойств ФС рассматривается через использование новых решений в области химических технологий, примером чего могут быть результаты исследования влияния фурфуролоксипропилциклокарбонатов (ФОПЦК) для холоднотвердеющих смесей (ХТС) [3]. Однако такие новые решения в области химического синтеза зачастую требуют использования нового специального технологического оборудования. В условиях же ограниченных возможностей предприятий по модернизации производства, актуальным является поиск решений, которые направлены на сочетание возможностей автоматизации технологических процессов смесеприготовления и поиска оптимальных составов ФС, которые могут быть использованы в таких автоматизированных системах. Одним из примеров такой реализации могут быть системы дозирования основных доступных компонентов ХТС, например, жидкого стекла и пропиленкарбоната. При этом интерес представляет исследование вопроса о возможных изменениях свойств смесей при отклонениях от оптимума количества жидкого стекла и пропиленкарбоната. Соответствующие коррективы могут быть учтены в системах дозирования, используемых в процессах и системах смесеприготовления.

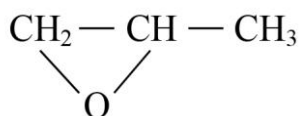
2. Объект исследования и его технологический аудит

Объектом исследования являются модели, описывающие влияние жидкого

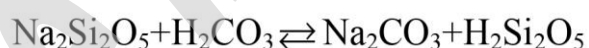
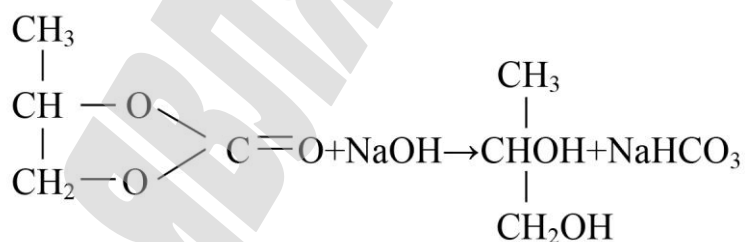
стекла и пропиленкарбоната как отвердителя формовочной смеси на ее свойства. А именно: живучесть, прочность на сжатие через 24 часа, осыпаемость после 24 часов твердения. Обоснованность выбора объекта связана с тем, что исследуемые компоненты смеси находят большое практическое применение в тех условиях, когда переход на новые технологические решения является затруднительным. Пропиленкарбонат представляет собой сложный, полный циклический эфир пропиленгликоля и угольной кислоты со структурной формулой:



Синтезируют пропиленкарбонат в присутствии катализатора из двуокиси углерода и окиси пропилена:



В химической промышленности пропиленкарбонат находит применение для извлечения побочных газообразных продуктов, например, H_2S при изготовлении синтетических волокон. Применение его в литейном производстве обусловлено тем, что при взаимодействии его с жидким стеклом протекает гидролиз сложного эфира в щелочной среде с образованием пропиленгликоля и угольной кислоты. Последняя, реагируя с жидким стеклом, вызывает образование кремневой кислоты и бикарбоната натрия. Это происходит на начальной стадии твердения. Бикарбонат натрия в процессе дальнейшего твердения смеси реагирует со щелочью жидкого стекла и переходит в одноводный карбонат натрия. Описанные реакции протекают по такой схеме:



или



На начальной стадии гелеобразования, то есть в так называемом индукционном периоде, жидкостекольные композиции с пропиленкарбонатом представляют собой слабоструктурированные жидкости с незначительным градиентом вязкости. По мере протекания реакций после окончания индукционного периода вязкость композиций резко возрастает. Это может быть объяснено поликонденсацией мономеров кремневой кислоты, образовавшейся в результате взаимодействия угольной кислоты с жидким стеклом. Таким образом, основным продуктом взаимодействия жидкого стекла с пропиленкарбонатом является кремневая кислота $\text{Si}(\text{OH})_4$, образующая кремнеполимер с высокой степенью поликонденсации, который является ответственным за формирование прочности формовочных смесей литейного производства. Выявление прочности смеси и других ее технологических показателей при использовании различных комбинаций в содержании жидкого стекла и пропиленкарбоната и является задачей технологического аудита. Полученные в процессе такого исследования экспериментальные данные могут быть использованы для построения математических моделей и нахождения оптимальных решений по выбору состава формовочных смесей, удовлетворяющего одному приоритетному или нескольким заданным свойствам.

3. Цель и задачи исследования

Цель работы – анализ поверхностей отклика, описывающих влияние состава холоднотвердеющих смесей на их свойства, в стационарной области.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Определить характер стационарных областей в зависимости от свойств смесей на основе канонического преобразования поверхности отклика для каждого из исследуемых свойств.
2. Оценить возможные изменения свойств смесей при отклонениях в дозировании жидкого стекла и пропиленкарбоната.

4. Исследование существующих решений проблемы

В работе [4] с использованием гребневого анализа показан способ получения оптимального решения по снижению количества жидкого стекла в смеси при сохранении приемлемой прочности по сырому. Результаты приведены на примере использования в качестве отвердителя пропиленкарбоната. Однако в качестве выходной переменной использовалась только прочность формовочной смеси на сжатие.

В работе [5] решена оптимизационная задача по определению состава ХТС на основе жидкого стекла и пропиленкарбоната в качестве связующего и отвердителя соответственно, с выбором критерием оптимизации максимума живучести смеси и минимума ее осыпаемости. Отмечено, что полученные

результаты могут найти применение в автоматизированном производстве формовочной смеси для повышения качества литых деталей ДВС.

Описанная в работе [6] математическая модель позволила установить, что приоритетным фактором влияния на прочность образца, подвергнутого тепловой сушке с омагниченным жидким стеклом, является напряженность магнитного поля. В работе приведены оптимальные технологические параметры процесса, однако данная модель не может быть применена в отношении оптимизации компонентов ХТС с пропиленкарбонатом.

В работе [7] получено уравнение регрессии, отражающее функциональную связь между такими свойствами смеси с жидким стеклом и отвердителем – живучестью, прочностью на сжатие и осыпаемостью. Авторы данной работы показали, что прочность на сжатие является более существенным фактором влияния на живучесть по сравнению с осыпаемостью, причем практически в 3 раза. Был также сделан вывод, что оба эти фактора оказывают положительное влияние на живучесть смеси – с увеличением прочности на сжатие и осыпаемости живучесть увеличивается. Однако вопросы, связанные с влиянием отклонений от заданных значений содержания связующего и отвердителя не исследовались. Частично ответ на этот вопрос в данной работе может быть найден путем анализа гребневых линий, однако такие акценты в [7] не были сделаны.

Комплекс математических моделей, описывающих влияние содержания в ХТС жидкого стекла и пропиленкарбоната приведен в работе [8], в которой также решена задача оптимального по сочетанию свойств синтеза состава ХТС. Приведенные рациональные области составов позволяют некоторым образом снять ограничение, указанное в работе [7], однако более строгий анализ стационарных областей для каждого из исследуемых свойств позволил бы получить более точные результаты. В частности, представляло бы интерес исследование поведения свойств при отклонениях от оптимальных значений содержания связующего и отвердителя. Полученные результаты могли бы найти практическое применение в автоматизированных процессах смесеприготовления и создании более совершенных регуляторов дозирования для смесеприготовительных систем. Соответствующие технические решения могут заинтересовать мировых производителей, специализирующихся на изготовлении смесеприготовительного оборудования, таких как:

- Belloi & Romagnoli S.r.l. (Италия) [9];
- Webac Maschinenbau GmbH (Германия) [10];
- DISA Group (крупная международная компания с филиалами по всему миру) [11].

5. Методы исследования

Анализировались математические модели, полученные методом планирования эксперимента на основе построения центрального ортогонального композиционного плана полного факторного эксперимента [8, 12, 13]:

$$a_i = c_1 \sum_{j=1}^N x^j y^j, i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

$$a_i = c_2[(x_{i-n}^j)^2 - \beta]y^j, i = n+1, \dots, 2n, \quad (2)$$

$$a_i = c_3 \sum_{j=1}^N x_{\mu}^j x_{\lambda}^j y^j, i = 1, \dots, n, \mu \neq \lambda, i = 2n+1, \dots, k, \quad (3)$$

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y^j - \beta \sum_{j=1}^N a_{n+i}. \quad (4)$$

В формулах (1)–(4):

c_1, c_2, c_3 – коэффициенты для линейных, квадратичных и парных взаимосвязей, соответственно;

n – число линейных членов уравнения;

N – число экспериментов;

β – параметр, рассчитываемый в зависимости от числа точек ядра композиционного плана 2^{n-p} , плеча «звездных» точек α и числа точек плану по формуле:

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^N (x_i^j)^2}{N} = \frac{2^{n-p} + \alpha}{N}. \quad (5)$$

Для анализа стационарной области и описания поведения выходных переменных – свойств ХТС с использованием в качестве связующего жидкого стекла, а в качестве отвердителя пропиленкарбоната – выполнялось каноническое преобразование поверхности отклика [14]. Преобразование осуществлялось по приведенной ниже процедуре.

1. Определение координат стационарной точки x^* путем решения системы линейных уравнений:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1^* \\ \vdots \\ x_n^* \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}. \quad (6)$$

2. Вычисление значения целевой величины в стационарной точке:

$$y^* = a_0 + 2a'x^* + x^{*'}Ax^*. \quad (7)$$

3. Определение n собственных значений $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$:

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} - \lambda \end{vmatrix} = (-\lambda)^n + P_1\lambda^{n-1} + \dots + P_n = 0. \quad (8)$$

4. Запись уравнения поверхности отклика в канонической форме:

$$y - y^* = \lambda_1 \xi_1^2 + \lambda_2 \xi_2^2 + \dots + \lambda_n \xi_n^2. \quad (9)$$

Таким образом, в результате переноса и поворота осей и перехода от системы координат $(x_1; x_2)$ в систему координат $(\xi_1; \xi_2)$ обеспечивается преобразование исходного уравнения поверхности отклика:

$$y(x) = a_0 + 2a'x + x'Ax,$$

к каноническому виду $y - y^* = \lambda_1 \xi_1^2 + \lambda_2 \xi_2^2 + \dots + \lambda_n \xi_n^2$:

$$x = x^* + B\xi, \quad (10)$$

где B – матрица поворота; $B'B = I$, а разность между значениями выходной переменной в произвольной и стационарной точке описывается уравнением:

$$y(\xi) - y^* = \xi' L \xi. \quad (11)$$

Выходными переменными – свойствами смеси – выбраны:

- живучесть смеси, мин – y_1 ;
- предел прочности на сжатие, МПа (через 1 час) – y_2 ;
- предел прочности на сжатие, МПа (через 3 часа) – y_3 ;
- предел прочности на сжатие, МПа (через 24 часа) – y_4 ;
- осыпаемость, % – y_5 .

Входными переменными являются:

- x_1 – содержание жидкого стекла, массовая часть;
- x_2 – содержание пропиленкарбоната, массовая часть.

6. Результаты исследований

Получены следующие значения матриц коэффициентов в уравнении (7) для вычисления значения целевой величины в стационарной точке:

- живучесть смеси, мин:

$$a_0 = 14,623, \quad a = \begin{pmatrix} 0,208 \\ 0,083 \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} 0,0325 & 0 \\ 0 & -0,2175 \end{pmatrix};$$

- предел прочности на сжатие, МПа (через 1 час):

$$a_0 = 1,166, \quad a = \begin{pmatrix} -0,094 \\ 0,151 \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} 0,068 & 0,0325 \\ 0,0325 & -0,112 \end{pmatrix};$$

– предел прочности на сжатие, МПа (через 3 часа):

$$a_0=2,388, a = \begin{pmatrix} -0,083 \\ 0,213 \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} 0,1534 & 0,125 \\ 0,125 & -0,242 \end{pmatrix};$$

– предел прочности на сжатие, МПа (через 24 часа):

$$a_0=5,284, a = \begin{pmatrix} 0,535 \\ -0,13 \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} -0,207 & 0,0275 \\ 0,0275 & -0,327 \end{pmatrix};$$

– осыпаемость, %:

$$a_0=0,068, a = \begin{pmatrix} -0,035 \\ 0,010 \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} 0,045 & -0,014 \\ -0,014 & 0,015 \end{pmatrix}.$$

Реализацией процедуры 1–4 получены следующие результаты в виде уравнений, описывающих поверхность отклика в канонической форме:

– для живучести смеси:

$$y - y^* = -0,2175\xi_1^2 + 0,0325\xi_2^2; \quad (12)$$

– для предела прочности на сжатие, МПа (через 1 час):

$$y - y^* = -0,1178\xi_1^2 + 0,0736\xi_2^2; \quad (13)$$

– для предела прочности на сжатие, МПа (через 3 часа):

$$y - y^* = -0,2778\xi_1^2 + 0,1896\xi_2^2; \quad (14)$$

– предел прочности на сжатие, МПа (через 24 часа):

$$y - y^* = -0,3333\xi_1^2 + 0,2013\xi_2^2; \quad (15)$$

– осыпаемость, %:

$$y - y^* = 0,0097\xi_1^2 + 0,0504\xi_2^2. \quad (16)$$

Для определения вида стационарной области можно провести анализ соотношений собственных чисел. По величине и знаку они будут определять вид поверхности отклика и вид соответствующих двумерных сечений поверхности отклика (ниже приводится 4 варианта двумерных сечений):

– вариант 1 – гиперболы (стационарная точка – седловая точка):

$$|\lambda_1| \neq |\lambda_2|, \lambda_1 < 0, \lambda_2 > 0;$$

– вариант 2 – гиперболы (стационарная точка – седловая точка):

$$|\lambda_1| \neq |\lambda_2|, \lambda_1 > 0, \lambda_2 < 0;$$

– вариант 3 – эллипсы (стационарная точка – максимум):

$$|\lambda_1| \neq |\lambda_2|, \lambda_1 < 0, \lambda_2 < 0;$$

– вариант 4 – эллипсы (стационарная точка – минимум):

$$|\lambda_1| \neq |\lambda_2|, \lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0.$$

Анализ уравнения, описывающего стационарную область для живучести (11), позволяет говорить о том, что в двумерном сечении имеются гиперболы. Отклонение в дозировании пропиленкарбоната в большую сторону при точном дозировании жидкого стекла будет приводить к удалению от стационарной точки. Однако, исходя из того, что стационарная область имеет седловую точку, а требуется максимизация живучести, такое отклонение не является критичным. Вопрос о величине отклонений значений живучести от локального максимума в случае неточности дозирования пропиленкарбоната относительно его локально оптимального значения может быть решен путем анализа гребневых линий [5]. Такие локально оптимальные значения соответствуют точкам пересечения поверхности отклика и поверхности ограничений, накладываемых областью планирования эксперимента.

Анализ уравнений (12)–(14), описывающих стационарную область для предела прочности смеси, независимо от времени контроля, позволяет говорить о том, что все выводы, сделанные относительно живучести, являются обоснованными и в отношении прочности смеси.

Другие выводы могут быть сделаны в отношении стационарной области, описываемой уравнением (15) для осыпаемости. Отклонения в дозировании в большую сторону и по пропиленкарбонату, и по жидкому стеклу, приводит к удалению значения осыпаемости от оптимального значения. Так как точка оптимума является точкой минимума (вариант 4), этот вариант является неприемлемым. Отклонение в дозировании пропиленкарбоната и жидкого стекла в меньшую сторону также вызывает отклонение от оптимума значения осыпаемости, однако в другую сторону.

Полученные решения могут быть использованы как элемент систем поддержки принятия решений, причем техническая реализация полученных результатов предполагает использование в автоматизированных системах смесеприготовления. Фрагмент такой общей схемы на уровне условного

представления контуров дозирования компонентов может иметь вид, показанный на рис. 1.

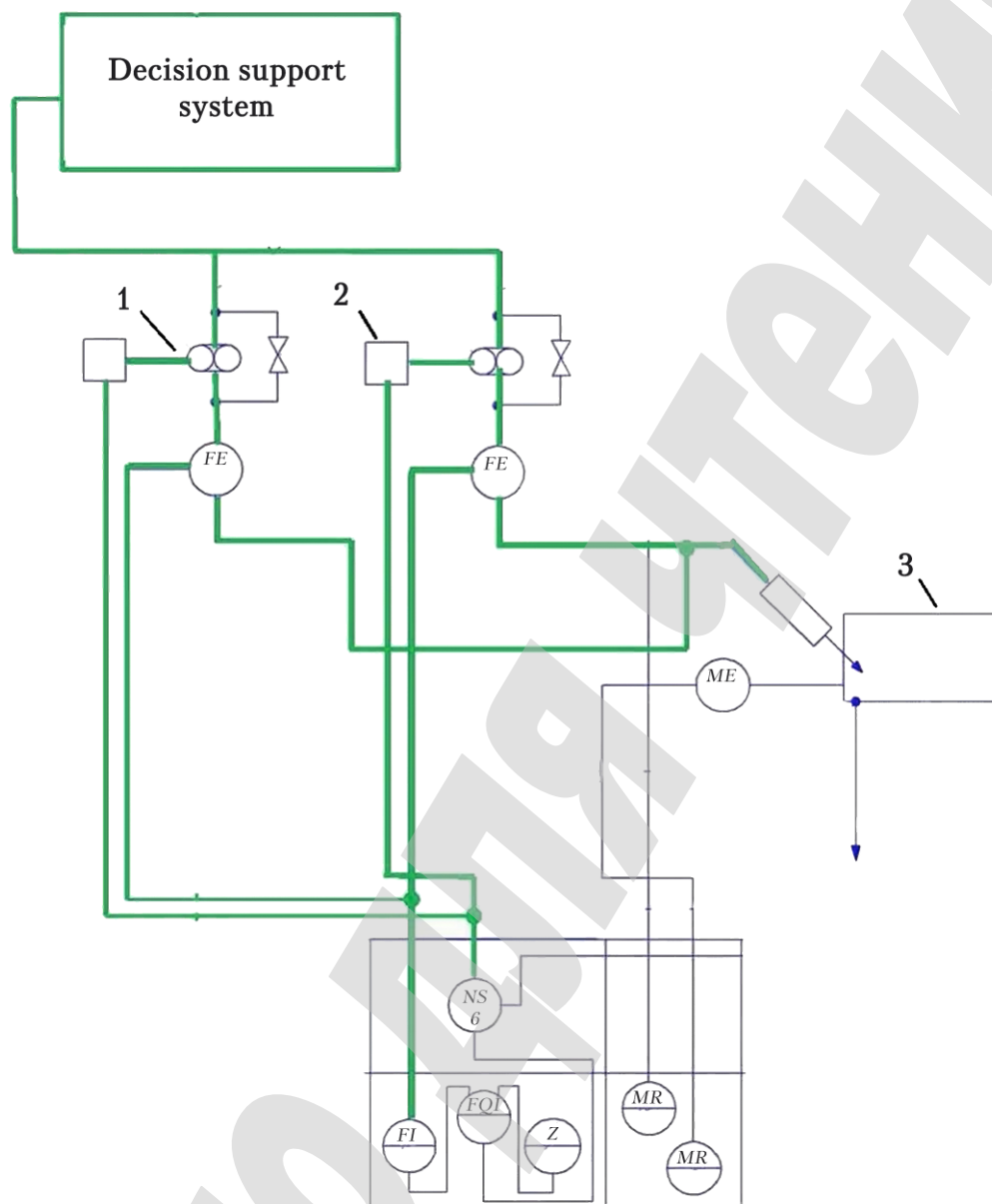


Рис. 1. Условная функциональная схема дозирования жидкого стекла и пропиленкарбоната

На рис. 1 обозначено: 1 – контур дозирования жидкого стекла; 2 – контур дозирования пропиленкарбоната; 3 – смеситель.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Сильной стороной данного исследования является получение аналитического описания поведения свойств холоднотвердеющей смеси при отклонениях от оптимальных значений количества связующего – жидкого стекла и отвердителя – пропиленкарбоната. Полученное описание благодаря своему каноническому виду обеспечивает возможность увидеть, как, например, отразится на исследованных свойствах смеси – живучести, предела прочности на сжатие и осыпаемости – колебания в количестве загружаемых компонентов.

Последние могут быть вызваны неточностью их дозирования. С одной стороны, очевидно, что затраты на реализацию технологического процесса смесеприготовления напрямую связаны с расходом компонентов. Поэтому расход в большую сторону приводит к их перерасходу. С другой стороны, отклонения от оптимальных значений количества компонентов приводит к повышению вероятности снижения качества смеси. Это может привести к браку литых деталей по причинам нарушения геометрической и размерной точности и качеству поверхности. Если литыми деталями являются ответственные детали ДВС, это является особенно проблемным. Поэтому полученные решения позволяют оперативно предотвращать названные проблемы, минимизируя затраты на технологический процесс и снижая вероятность получения некачественного литья

Weaknesses. Слабые стороны данного исследования связаны с тем, что практическое применение полученных теоретических решений предполагает дополнительные затраты, связанные с необходимостью технической реализации. В частности, полученные математические описания должны стать частью систем поддержки принятия решений для автоматизированных систем дозирования в процессах смесеприготовления.

Opportunities. Дополнительные возможности при использовании приведенных результатов в промышленных условиях связаны со стабилизацией качества смеси и получаемых с ее применением готовых литых деталей. Кроме этого, можно говорить о повышении точности дозирования жидкого стекла и пропиленкарбоната, ориентируясь на поддержание оптимального количества связующего и отвердителя.

Threats. Очевидные риски при использовании полученных результатов связаны с тем, что существующие решения в области автоматизации технологических процессов смесеприготовления ориентированы на использование своего математического описания, являющегося частью программно-аппаратных средств. Кроме этого, существует большое число новых технологических процессов и современных смесей, с использованием других компонентов. Комбинация современных решений в области составов смесей и технологического оборудования устраняет возможность повсеместного использования полученных в данном исследовании решений. Полученные результаты могут быть использованы лишь там, где для этого есть основания, например, использование в качестве связующего жидкого стекла и в качестве отвердителя пропиленкарбоната. Попытка внедрения в иных условиях может не оправдать ожиданий и может относиться к числу рисков.

8. Выводы

1. На основе канонического преобразования полученной поверхности отклика выявлен разный характер стационарных областей, в зависимости от свойств смесей. Так, для живучести и предела прочности на сжатие выявлено наличие седловой точки. Это означает, что изменение дозирования пропиленкарбоната будет вызывать смещение из этой точки, однако оно не является критичным, так как величина живучести должна максимизироваться.

Абсолютное изменение положения максимума в этом случае может быть оценено на основе анализа гребневых линий, описывающих локально оптимальные значения как точки пересечения поверхности отклика и поверхности ограничений, накладываемых областью планирования эксперимента.

2. Показано, что отклонение в дозировании пропиленкарбоната и жидкого стекла приводит к удалению значения осыпаемости от оптимального значения. Так как точка оптимума является точкой минимума, этот вариант является неприемлемым. Следовательно, вопрос точности дозирования с точки зрения обеспечения минимума осыпаемости является особенно важным.

Благодарности

Коллектив авторов выражает благодарность доценту кафедры литейного производства Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» (Украина) Коваленко Борису Петровичу за консультационную помощь в описании механизма отверждения и объяснение химизма данного процесса.

Литература

1. Евтушенко Н. С., Шинский О. И., Пономаренко О. И. Исследование свойств регенерируемых смесей на основе ОФОС // Компрессорное и энергетическое машиностроение. 2013. № 4. С. 48–51.

2. Пономаренко О. И., Евтушенко Н. С., Берлизова Т. В. Влияние жидких отвердителей с разными добавками на свойства жидкостекольных смесей // Литейное производство. 2011. № 4. С. 21–24.

3. Влияние фурфурилоксипропилциклокарбонатов (ФОПЦК) с различными добавками на свойства холоднотвердеющих смесей на жидком стекле / Берлизова Т. В., Пономаренко О. И., Каратеев А. М., Литвинов Д. А. // Компрессорное и энергетическое машиностроение. 2013. № 3. С. 26–29.

4. Применение жидкостекольных смесей с пониженным содержанием жидкого стекла как фактор повышения качества отливок машиностроительного назначения / Зинченко П. С., Аксененко М. П., Йовбак А. В., Орендарчук Ю. В. // ScienceRise. 2016. № 5/2 (22). С. 6–9. doi: <http://doi.org/10.15587/2313-8416.2016.69836>

5. Оптимізація складу формувальних сумішей для автоматизованого виробництва литих деталей двигунів внутрішнього згоряння / Орендарчук Ю. В., Красноухова А. А., Ачкасов І. О., Барсук А. С., Головка В. І. // Вісник НТУ «ХП». 2016. № 50 (1222). С. 117–121.

6. Оптимизация процесса тепловой сушки жидкостекольной смеси по критерию прочности на разрыв / Зинченко П. С., Голиньков В. В., Старых С. А., Ступар М. А. // ScienceRise. 2016. № 6/2 (23). С. 9–13. doi: <http://doi.org/10.15587/2313-8416.2016.69970>

7. Obtaining of locally optimal solutions by combining properties of mixtures for foundry manufacture / Dotsenko V., Boichuk V., Fedorenko V., Tsybul'skyi Y. // EUREKA: Physics and Engineering. 2018. Vol. 6. P. 48–53. doi: <http://doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00795>

8. Коваленко Б. П., Дёмин Д. А., Божко А. Б. Оптимизация состава холоднотвердеющих смесей (ХТС) с пропиленкарбонатом // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2006. № 6. С. 59–61.

9. INTENSIVE MIXER. URL: <http://www.belloi.it/>
10. Durchlaufmischer. URL: <https://www.webac-gmbh.de/produkte/uebersicht/>
11. DISA. Mixers and SMC. URL: <https://www.disagroup.com/en-gb/products/sand-preparation-and-cooling/mixers-and-smc>
12. Hartmann K., Lezki E., Schafer V. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов: пер. с нем. (Statistische Versuchsplanung und auswertung in der Stoffwirtschaft). М.: Мир, 1977. 552 с.
13. Demin D. Synthesis of optimal control of technological processes based on a multialternative parametric description of the final state // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 3, Issue 4 (87). P. 51–63. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.105294>
14. Demin D. Strength analysis of lamellar graphite cast iron in the «carbon (C) – carbon equivalent (C_{eq})» factor space in the range of $C=(3,425-3,563)$ % and $C_{eq}=(4,214-4,372)$ % // Technology Audit and Production Reserves. 2017. Vol. 1, Issue 1 (33). P. 24–32. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.93178>