

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ
СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АКТИВИРОВАННЫХ
ИЗВЕСТКОВО-КРЕМНЕЗЕМИСТЫХ КОМПОЗИТОВ**

**Шинкевич Е.С., д.т.н., профессор, Луцкий Е.С., к.т.н., доцент,
Тымняк А.Б., ассистент**

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Многокритериальная оптимизация составов, режимов твердения и свойств силикатных материалов является актуальной задачей, решению которой способствует применение математического моделирования и компьютерных методов анализа. С развитием нового направления в виде компьютерного материаловедения появились принципиально новые возможности анализа и оптимизации состав, структуры и свойств строительных материалов [1, 2, 3, 4, 5].

Технологические процессы отличаются большой сложностью, объемом и разнообразием взаимосвязей внутри каждого технологического передела. Для выбора оптимальных параметров технологического процесса необходимо количественно оценить и сопоставить огромное количество взаимосвязей и возможных вариантов, что осуществимо на базе быстродействующих компьютерных технологий анализа композиционных материалов. Используемый подход к оптимизации характеризуется формализацией задачи, которая формулируется стандартным образом, после чего ее решение проводится на основе четкого алгоритма. Алгоритм в данном случае не означает отсутствия вариантов решений, наоборот, проводится сравнение различных вариантов, алгоритм при этом лишь точно определяет, как проводится такое сравнение. Выбор оптимальных решений обычно производится в три стадии: формирование задачи, нахождение оптимальных условий на основе алгоритма оптимизации, реализация оптимальных условий на практике.

В материаловедческих и технологических задачах поведение исследуемой системы характеризуется обычно комплексом критериев качества, координаты оптимумов которых, как правило, не совпадают [5, 6, 7]. В результате этой закономерности оптимизационная задача формулируется как многокритериальная, при решении которой возникают проблемные вопросы, связанные с принятием компромиссных решений.

При решении технологических задач одной из самых ответственных проблем является проблема выбора состава, дисперсности и технологических режимов получения материала с заданным комплексом свойств при минимуме расхода материальных и энергетических затрат. В этом случае задача отыскания оптимальной стратегии сводится к обычной задаче оптимизации без каких-либо дополнительных гипотез. Решение таких задач заключается в выявлении в области факторного пространства разрешенной зоны, удовлетворяющей заданному уровню свойств композиционных строительных материалов, а затем в этой зоне выбирается состав, который обеспечивает максимальное качество изделий при минимальных затратах.

Когда речь идет о сложных процессах, то их эффективность не может быть, как правило, полностью охарактеризована только основными критериями качества. К тому же, практика требует разработки полифункциональных материалов, сочетающих в себе различные специальные свойства. В данном случае приходится привлекать для анализа дополнительные критерии качества. И хотя математическая теория планирования эксперимента не дает однозначного ответа в таких многокритериальных задачах, она помогает принять компромиссное решение. В настоящее время точной теории принятия компромиссных решений не существует. При любом способе постановки задачи обоснование решения по множеству критериев остается не до конца формализованным, а окончательный выбор решения определяется уровнем квалификации технолога.

Для решения многокритериальной задачи предложены следующие стратегия и алгоритм поэтапной оптимизации.

Первый этап – выделение комплекса основных критериев качества на основе действующей нормативно-технической документации. В настоящем исследовании анализировались: прочность при сжатии ($R_{сж}$), прочность на растяжении при изгибе ($R_{изг}$), морозостойкость (F) и коэффициент теплопроводности (λ). В результате операции отбрасывания заведомо непригодных решений множество возможных смесевых составов уменьшается: в нем сохраняется только эффективные решения, которые характеризуются тем, что ни для одного из них не существует доминирующего решения.

Второй этап – научное обоснование дополнительных критериев качества и направлений их оптимизации, которые определяются научными исследованиями. Данный этап обеспечивает улучшения качества изделий за счет учета не входящих в действующие стандарты показателей при сравнении конкурирующих вариантов решений.

На третьем этапе, когда из многих решений выделены наиболее

эффективные, окончательный выбор делается в пределах этого эффективного множества. Ограниченное число эффективных решений легче анализируется. В качестве дополнительной информации на третьем этапе могут анализироваться параметры, определяющие ресурсосбережение технологии и/или учитывающие экологические аспекты данной проблемы [5]. Окончательный выбор компромиссного решения для неформальной задачи по-прежнему остается прерогативой инженера-технолога.

Как дополнительный этап оптимизации проводится определение допустимых погрешностей в отклонении смесевых и технологических параметров от оптимальных значений.

В настоящем исследовании проведена многокритериальная оптимизация активированных известково-кремнеземистых композиций неавтоклавного твердения. Многокритериальная оптимизационная задача (табл.1) заключается в следующем: получить условно-эффективные рядовые и лицевые стеновые материалы и изделия заданных марок по прочности и морозостойкости при нормированных значениях плотности и минимальных значениях теплопроводности с учетом трещиностойкости.

С целью формирования базы данных для решения оптимизационной задачи проведен шестифакторный эксперимент. В эксперименте, поставленном по D-оптимальному плану [2, 6], варьировались следующие рецептурно-технологические факторы: доля трепела с удельной поверхностью $S_{уд1}=350\text{м}^2/\text{кг}$ (v_1), $S_{уд2}=425\text{м}^2/\text{кг}$ (v_2), $S_{уд3}=500\text{м}^2/\text{кг}$ (v_3) при неизменном его содержании в вяжущем ($v_1+v_2+v_3=1$), условия твердения: длительность предварительного выдерживания в н.у. $x_4 - \tau_{п.в.}=(6\pm 6)$ часов, длительность ТВО при $T=85^\circ\text{C}$ $x_5 - \tau_{ТВО}=(10\pm 4)$ часов и содержание добавки гипса $x_6 - C_r=(2.5\pm 2.5)\%$.

По натурному эксперименту рассчитано десять однотипных шестифакторных экспериментально-статистических (ЭС) моделей. ЭС модели построены с использованием типовой версии COMPEX (программа разработана на кафедре ПАТСМ в ОГАСА), реализующей последовательный регрессионный анализ с генерирующей ошибкой эксперимента $s\{\ln Y\}=0,2$ при $\alpha=0,05$.

Модель (1) описывает изменения $R_{сж}$. Логарифмическое преобразование значений обусловлено необходимостью обеспечения условий $Y \geq 0$ и постоянства относительной ошибки эксперимента $s\{Y\}=\text{const}$.

Таблица 1

*Многокритериальная оптимизация свойств
по условиям получения условно-эффективных стеновых изделий*

Алгоритм и основные этапы многокритериальной оптимизации			Вид и назначение изделий		
			Блоки рядовые полнотелые	Блоки лицевые полнотелые	
Этапы	Критерии качества	Обоснование	Условия оптимизации		
I	Нормированные критерии	Нормативные документы	$R_{сж}$ = норм, МПа k_p = норм F = норм, циклы W = норм, % ρ = норм, кг/м ³ λ = норм, Вт/м·К	B7.5, B10 $k_p \geq 0.85$ F25 $W \geq 6$ $\rho = 1451-1600$ $\lambda = 0.56-0.76$	B15, B12.5 $k_p \geq 0.85$ F35, F50 $W \geq 6$ $\rho = 1451-1600$ $\lambda = 0.56-0.76$
II	Дополнительные критерии	Научно-исследовательские изыскания	$k_{Ic} \rightarrow$ оптимум	$k_{Ic} \geq 1$	
III	Оптимизация технологических факторов по критериям энергосбережения		$\tau_{п.в.} \rightarrow$ min, час $\tau_{ТВО} \rightarrow$ min, час	$\tau_{п.в.} = 1$ $\tau_{ТВО} = 10-12$	

$$\begin{aligned}
 \ln R_{сж} = & \begin{pmatrix} 4.91v_1 & \pm 0v_1v_2 \\ +4.97v_2 & \pm 0v_1v_3 \\ +4.97v_3 & +0.149v_2v_3 \end{pmatrix} + \lambda = \begin{pmatrix} 0.59v_1 & +0.48v_1v_2 \\ +0.62v_2 & \pm 0v_1v_3 \\ +0.59v_3 & \pm 0v_2v_3 \end{pmatrix} + \\
 + & \begin{pmatrix} -0.03v_1x_4 & -0.072v_1x_5 & \pm 0v_1x_6 \\ \pm 0v_2x_4 & -0.037 v_2x_5 & \pm 0v_2x_6 \\ \pm 0v_3x_4 & \pm 0 v_3x_5 & \pm 0v_3x_6 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} +0.13v_1x_4 & +0.08v_1x_5 & -0.2v_1x_6 \\ \pm 0v_2x_4 & \pm 0v_2x_5 & \pm 0v_2x_6 \\ \pm 0v_3x_4 & +0.04v_3x_5 & -0.1v_3x_6 \end{pmatrix} + \\
 + & \begin{pmatrix} +0.044x_4^2 & \pm 0x_4x_5 \\ \pm 0x_5^2 & \pm 0x_4x_6 \\ -0.354x_6^2 & -0.011x_5x_6 \end{pmatrix} \quad (1) + \begin{pmatrix} +0.11x_4^2 & +0.08x_4x_5 \\ +0.11x_5^2 & +0.08x_4x_6 \\ \pm 0x_6^2 & +0.05x_5x_6 \end{pmatrix} \quad (2)
 \end{aligned}$$

Модель (2) описывает изменение коэффициента теплопроводности под влиянием перечисленных выше рецептурно-технологических факторов.

На основе рассчитанных ЭС моделей установлены закономерности изменения комплекса свойств под влиянием удельной поверхности трепела, условий твердения и режимов ТВО. По ЭС моделям установлено, что значение рецептурно-технологических факторов, которые обеспечивают максимальные значения прочности, трещиностойкости и коэффициента теплопроводности не совпадают (табл.2).

Таблица 2

*Относительное изменение свойств
под влиянием состава и условий твердения*

	Группы факторов	$R_{сж}$	$k_{тс}$	λ	
1.	Размер удельной поверхности трепела S_i	2.1	1.6	1.6	
2.	Условия твердения:	$\tau_{п.в.}$	1.15	1.1	1.42
		$\tau_{ТВО}$	1.15	1.1	1.42
3.	Условия твердения $\tau_{п.в.}$, $\tau_{ТВО}$ с учетом взаимодействий	2.1	1.5	2.0	
4.	Все факторы S_i , $\tau_{п.в.}$, $\tau_{ТВО}$, C_T	6.4	3.8	3.0	

На первом этапе проведена оптимизация основных критериев качества композитов: прочности при сжатии ($R_{сж}$), прочности на растяжение при изгибе ($R_{изг}$), морозостойкости (F), плотности (ρ), водопоглощения (W) и коэффициента теплопроводности (λ).

Выбор рациональных составов осуществляется наложением рассчитанных оптимизационных диаграмм изменения исследуемых свойств под влиянием рецептурно-технологических факторов [4, 7]. Для этого

по диаграммам в виде смесевых треугольников в первую очередь устанавливается оптимальное соотношение в смеси трепела частиц с требуемой удельной поверхностью (изолинии на треугольниках рис. 1). Обоснованием этой операции как первоочередной, является данные о степени влияния исследуемых факторов на свойства, приведенные в таблице 2. Как видно из табл. 2, доминирующее влияние на коэффициент теплопроводности λ (в диапазоне исследуемого факторного пространства) оказывает величина удельной поверхности трепела $S_{уд}$.

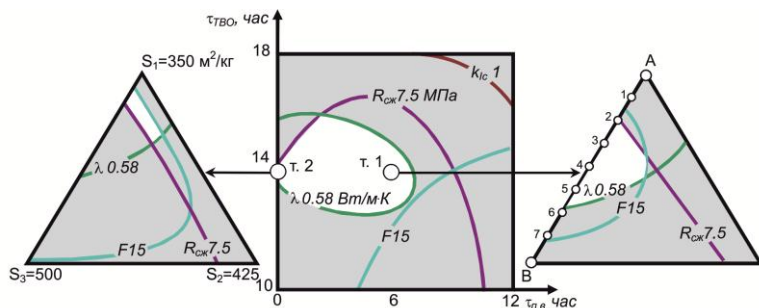


Рис. 1. Определение области оптимальных составов

Дополнительным параметром для выбора оптимальной величины удельной поверхности трепела может служить анализ корреляционной анализ основного критерия оптимизации (в данном случае коэффициента теплопроводности) с характеристиками структуры. То есть структура материала должна создаваться целенаправленно с целью достижения максимального эффекта по снижению теплопроводности при минимально возможных затратах.

На данном этапе для того, чтобы из нескольких полученных решений выбрать необходимые, проводится анализ корреляционной связи свойств с параметрами структуры. В результате ранжирования параметров структуры по степени их корреляции со свойствами выделены те из них, с учетом которых осуществляется оптимизация состава, технологических параметров и структуры для получения строительных композитов с комплексом заданных показателей качества (табл. 3).

Исследованы следующие характеристики структуры, определяемые по стандартным методикам: пористость общая – P , пористость закрытая – P_z , отношение открытой к закрытой P_o/P_z , интенсивность водонасыщения – W_t , коэффициент насыщения пор водой, который характеризует структуру как отношение водопоглощения по объему к общей пористости – $k_{нас}(P_o/P)$, а также минеральный состав.

Таблица 3

Корреляционная связь между свойствами и характеристиками структуры в зоне оптимума

		Композиции без гипса при $S_1 = 3/4 + S_3 = 1/4$			
		Теплопроводность	Морозостойкость	Прочность при сжатии	Прочность при изгибе
Характеристики структуры	P_0/P_3	-0,12	-0,92	-0,96	0,85
	P_0/P	-0,23	-0,97	-0,88	-0,96
	W	-0,24	0,72	0,99	0,64
	$Ca(OH)_2$	0,39	0,98	0,82	0,95
	Q	-0,26	-0,88	-0,71	-0,97
Свойства	ρ	0,9	0,68	0,22	0,51
	$R_{изг}$	0,34	0,95	0,73	-
	$k_{разм}$	-0,37	-0,86	-0,64	-0,79
	$R_{смж}$	-0,15	0,79	-	0,73
	F	0,44	-	0,80	0,95
	λ	-	0,44	-0,14	0,34

Выбор состава, направление возможного регулирования структуры и свойств и границы области допустимых решений проводятся по диаграммам в виде смесевых треугольников (рис.2).

С учетом установленных значений величины и долевого соотношения в смеси частиц с различной удельной поверхностью трепела $S_{уд}$, по основным моделям рассчитаны изолинии свойств, которые представлены на треугольнике. На оптимизационных диаграммах выделены (не заштрихованы) области, которые отвечают нормативным требованиям (первого этапа оптимизации) (рис. 1). Оптимизационные диаграммы всех остальных свойств ($R_{смж}$, $R_{изг}$, F , ρ , W) рассчитаны для смеси трепела с удельной поверхностью $S_1:S_3=1:2$. Данное значение принято по результатам анализа модели коэффициента теплопроводности λ (2) с учетом величины удельной поверхности трепела S_i и долевого соотношения в смеси частиц с различной удельной поверхностью, которое определяет минимальное требуемое значения коэффициента теплопроводности $\lambda=0,58$ Вт/м·К в нормированном интервале $0,58 < \lambda_{норм} \leq 0,76$ для условно-эффективных стеновых изделий.

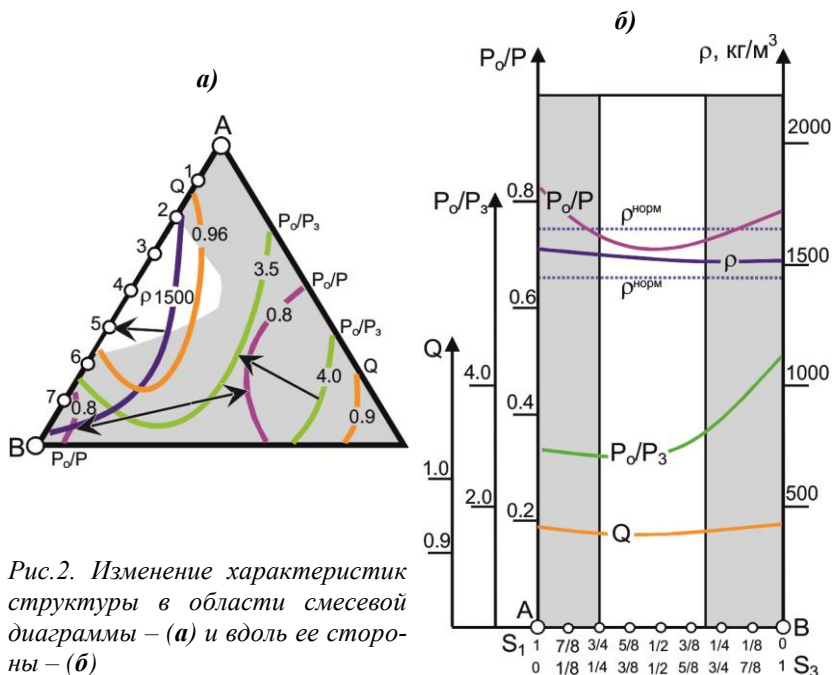


Рис.2. Изменение характеристик структуры в области смешивающей диаграммы – (а) и вдоль ее стороны – (б)

В области, отвечающей требованиям по основным критериям качества среди множества рецептов, удовлетворяющих требованиям первого этапа, выбрано два состава, обозначенные т.1 и т.2. Как следует из диаграмм, предварительное выдерживание изделий позволяет расширить область, удовлетворяющую основным критериям качества. Расширение области оптимальных решений обеспечивает реализацию требуемых рецептурно-технологических параметров в производственных условиях с высокой степенью надежности и способствует получению КСМ гарантированного качества.

Изопараметрический анализ [10] смешивающих диаграмм, отражающих изменение долей трепела с разной удельной поверхностью, позволяет уточнить направление оптимизации по содержанию доли трепела с заданной удельной поверхностью или в виде смеси и скорректировать технологические факторы. Изопараметрический анализ проведен по стороне АВ смешивающего треугольника, на которой расположена точка с оптимальным значением величины удельной поверхности трепела, которое может быть получено при смешивании трепела с разной удельной поверхностью S_1 и S_3 в соотношении 1:2. По ЭС моделям

определены значения уровней свойств в равностоящих друг от друга точках 1 – 7 с S_{y0} , представленной смесью этих 2-х фракций S_1 и S_3 . На рис. 2 нанесены уровни нормированных значений исследуемых свойств, а также изменения значений этих свойств в оптимальной области (не заштрихована). Как видно из диаграммы (рис. 3), рекомендуемые значения превышают нормированные.

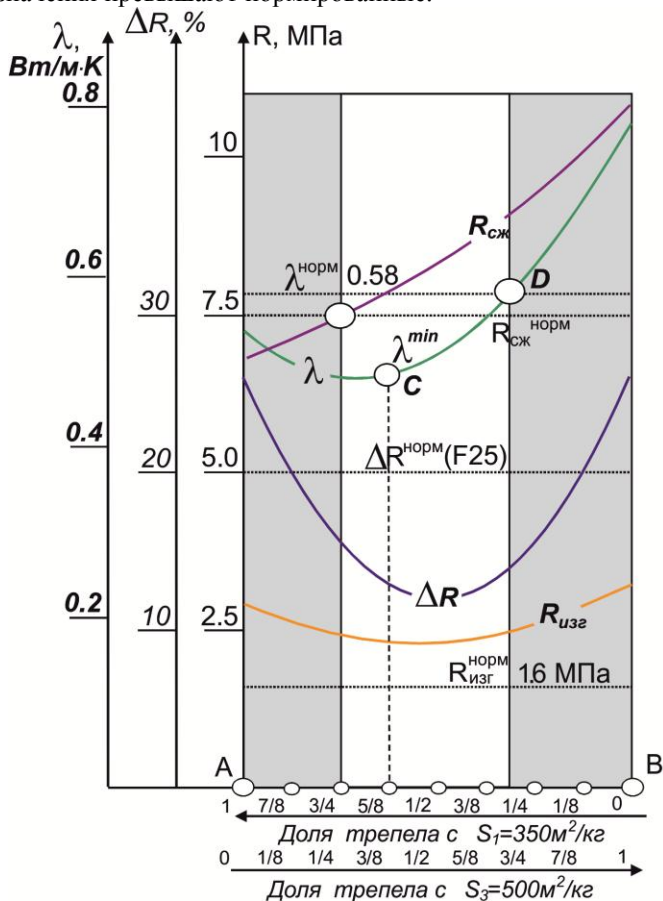


Рис. 3. Изопараметрический анализ смесевых диаграмм

Таким образом, в результате первого этапа определены удельная поверхность минеральной добавки, рациональные условия и режимы твердения, обеспечивающей заданные эксплуатационные показатели.

На втором этапе в качестве дополнительного критерия оптимиза-

ции анализировалась трещиностойкость, которая характеризовалась критическим коэффициентом интенсивности напряжений - k_{Ic} . ЭС модель изменения k_{Ic} под влиянием рецептурно-технологических факторов и ее графический образ представлены на рисунке 4.

Под влиянием $\tau_{п.в.}$ и $\tau_{ТВО}$ критический коэффициент напряжения k_{Ic} возрастает до максимального значения $1.61 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-0.5}$, затем снижается. Максимальное значение k_{Ic} выше известного значения k_{Ic} для цементных мелкозернистых бетонов $k_{Ic}=1$ [9].

В результате изопараметрического анализа [7, 10] установлено, что при $R_{сж} = 15 \text{ МПа} = \text{const}$, коэффициент k_{Ic} изменяется от 1.0 до 1.61 $\text{МПа} \cdot \text{м}^{-0.5}$. А в области оптимальных составов значение k_{Ic} изменяется от 1,5 до 1,6 $\text{МПа} \cdot \text{м}^{-0.5}$ (изолинии на треугольной диаграмме). Это свидетельствует о возможности и необходимости регулирования данного параметра, как одного из критериев оптимизации [11].

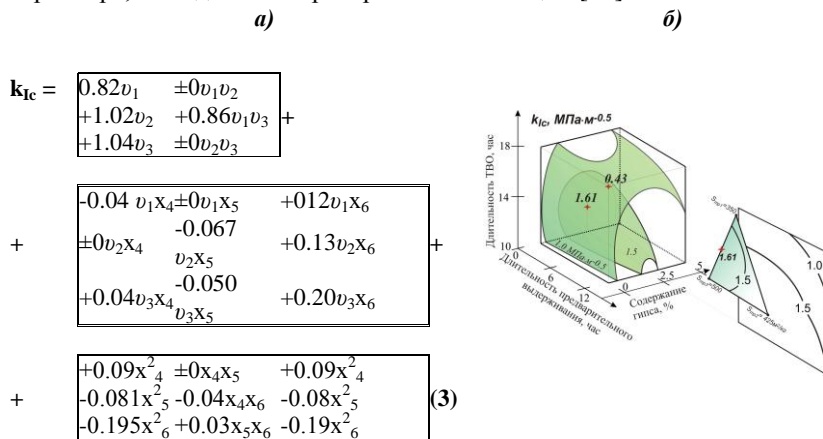


Рис. 4. Экспериментально статистическая модель изменения k_{Ic} под влиянием рецептурно-технологических факторов – (а) и ее графический образ – (б)

Таким образом, в ходе второго этапа основе проведенных исследований показано, что комплексную оптимизацию составов рационально проводить с учетом закономерностей изменения трещиностойкости, что позволит прогнозировать качество изделий с более высокой степенью достоверности.

Третий этап. Анализ смесевых диаграмм позволяет также определить допустимые погрешности в дозировании минеральных добавок, которые не изменят степени взаимовлияний и взаимодействий всех факторов в зависимости "состав – технология – структура – свойства".

Определение допустимой погрешности при назначении удельной поверхности и реализации рецептурно-технологических решений в производственных условиях осуществляется на основе решения обратной задачи. Для этого в граничных точках С и D для удельной поверхности минеральной добавки, соответствующей значениям в этих точках, построены 2-х факторные диаграммы в координатах технологических факторов x_4 и x_5 (рис. 5). Как следует из диаграмм, в точках С и D границы области оптимальных технологических решений существенно сокращаются и допустимое отклонение для длительности предварительного выдерживания и длительности ТВО не должно превышать ± 1 час.

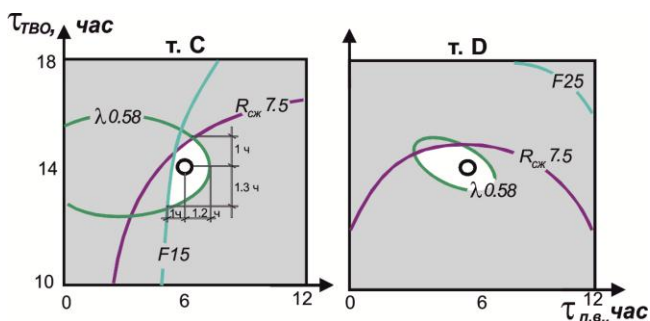


Рис. 5. Определение допустимых технологических погрешностей по оптимизационным диаграммам

Гарантированность уровня свойств в выбранной области может быть также обеспечена расчетом доверительных интервалов как $\Delta Y = t_{\lambda} \cdot S_y \cdot d^{0.5}$ [8, 12].

Таким образом, в результате третьего этапа уточнены составы и режимы твердения, которые обеспечивают заданные эксплуатационные показатели при минимуме энергетических затрат. В результате оптимизации рекомендованы составы: для стеновых лицевых изделий, которые обеспечивают следующие уровни критериев качества – В12.5 и В15, $\rho=1550-1650 \text{ кг/м}^3$, F35, $k_{Ic}=1.5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-0.5}$; для стеновых рядовых изделий, которые обеспечивают следующие уровни критериев качества – В7.5 и В10, $\rho=1450-1550 \text{ кг/м}^3$, F25; $k_{Ic} = 1.5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-0.5}$.

Анализ информации о процессах и явлениях в модифицированных силикатных композитах на основе изучения взаимосвязей "состав – технология – структура – свойства", позволяет получать строительные композиционные материалы с комплексом заданных свойств и управ-

лять ими. С использованием результатов моделирования и вычислительных экспериментов по моделям проведена многокритериальная оптимизация свойств по комплексу эксплуатационных и ресурсосберегающих показателей качества.

Предложенный алгоритм поэтапной многокритериальной оптимизации позволяет решать оптимизационные задачи на качественно новом и доступном уровне анализа, что повысит достоверность результатов исследований.

Заключение

В рамках компьютерных технологий экспериментально-статистические модели и вычислительные эксперименты, проводимые по ним, обеспечивают тем большую экономию ресурсов за счет увеличения достоверности результатов и повышения качества и надежности материала, чем сложнее задача по количеству и взаимному влиянию анализируемых факторов и выше требования к строительным композиционным материалам.

Показано, что многокритериальная поэтапная оптимизация комплекса показателей качества с учетом трещиностойкости может являться основой при сравнении и выборе оптимальных, конкурирующих вариантов решений, что позволит с более высокой степенью достоверности гарантировать высокий уровень качества.

SUMMARY

In paper it was shown, that as part of an computer technology a experimental-statistical models and computational experiments performed on them, it was found that the more complex task of the number and the mutual influence of the factors, which are analyzed and higher requirements for the construction of composite materials, the greater the saving of resources by increasing the reliability of the results and improve the quality and reliability of the material they provide. It is shown that the a multi-criteria phased optimization of complex quality with the crack resistance can be a basis for comparing and selecting the best competing options for solutions that enable a higher degree of reliability, high level of quality.

1. Вознесенский В.А. ЭС-модели в компьютерном строительном материаловедении / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко – Одесса: Астропринт, 2006. – 116 с.

2. Вознесенский В.А. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Я.П. Иванов, И.И. Николов. – К.: Будивель-

ник, 1989. – 240с.

3. Ляшенко Т.В. Методы компьютерного материаловедения при анализе взаимосвязи реологических показателей композиций / Т.В. Ляшенко, В.А. Вознесенский // Вісник ДонДАБА. Композиційні матеріали для будівництва: Зб. Наук. пр. – Макіївка, 2001. – Вип. 2001-1(26). – С. 67-74.

4. Шинкевич Е.С. Влияние удельной поверхности минеральной добавки на трещиностойкость силикатных неавтоклавных материалов / Е.С. Шинкевич, Г.Г. Бондаренко, Е.С. Луцкий, А.А. Койчев // Совершенствование качества строительных материалов (модели, составы, свойства, эксплуатационная стойкость): Межд. сборн. науч. трудов. – Новосибирск, 2005. – С. 69-73.

5. Шинкевич Е.С. Возможности ресурсосбережения на основе анализа связи состава, структуры и теплофизических свойств активированных силикатных композиций неавтоклавного твердения / Е.С. Шинкевич, Н.В. Сидорова, Е.С. Луцкий, Д.Ю. Парамонов // Межрегиональные проблемы экологической безопасности: Сб. трудов конф. – Сумы – С.-Петербург, 2002. – Т.2. – С.61-66.

6. Ляшенко Т. В. Методы компьютерного материаловедения при анализе взаимосвязи реологических показателей композиций / Т.В. Ляшенко, В.А. Вознесенский // Вісник ДонДАБА. Композиційні матеріали для будівництва: Зб. Наук. пр. – Макіївка, 2001. – Вип. 2001-1(26). – С. 67-74.

7. Шинкевич Е.С. Моделирование и оптимизация модифицированных силикатных композитов / Е.С. Шинкевич // Доклад к МОК'42. – Одесса: Астропринт, 2003. – 24 с.

8. Ляшенко Т.В. Обобщающие показатели полей свойств для разработки эффективных композитов / Т.В. Ляшенко // Строительные материалы, конструкции и инженерные системы: Сб. тр. ОГАСА. – Одесса, 1996. – С. 172-186.

9. Зайцев Ю.В. Новое в строительной науке: по материалам I Всесоюзной и I Международной конференций по механике разрушения бетона. / Ю.В. Зайцев. – Москва, 1986. – 245 с.

10. Чернышев Е.М. Системные исследования и изопараметрическая оптимизация структуры ячеистых силикатных композитов / Е.М. Чернышев, Е.С. Шинкевич, В.Я. Керш, Н.В. Хлызов // В кн.: Механика и технология композиционных материалов: Тр. III конф. Болгарской АН. – София: БАН, 1982. – С. 217-225.

11. Shinkevich E. Structural durability, deformation properties and fracture mechanics parameters of advanced silicate materials / E. Shinkevich, Y. Zaytsev, E. Lutskin, G. Bondarenko, A. Tymnyak // Proceeding of the 2nd Int. Conference on Microstructural-related Durability of Cementitious Composites. – 11-13 April 2012, Amsterdam, Netherlands. – P. 244-252.

12. Ляшенко Т.В. Структурированные экспериментально-статистические модели в компьютерном материаловедении / Т. В. Ляшенко // Модели и системы: Сб. научн. трудов Харьковского военного ун-та. – Харьков, 1999. – вып.1. – С.53-57.