

А.А. Орлов¹, С.В. Леонтьев², А.Д. Курзанов²

¹Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет),

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА

В технологии производства ячеистых бетонов, в частности газобетона неавтоклавного твердения, проблема обеспечения требуемого качества готового продукта в настоящее время остается нерешенной. Данная проблема решается за счет изменения параметров технологического процесса (ТП). Необходимость изменения рецептурно-технологических параметров (РТП) обуславливается меняющимися условиями производства, к примеру, использованием сырья переменной качества. В статье представлены результаты сравнения эффективности применения различных методов решения задач оптимизации технологического процесса производства неавтоклавного газобетона. Для сравнения были выбраны метод экспертных систем (технология экспертных систем), метод деформируемого многогранника, а также разработанная авторами настоящей статьи методика. Данная методика представляет собой синтез двух вышеперечисленных методов поиска. Авторами была выдвинута гипотеза, что комплексное использование формального и неформального методов поиска оптимального решения позволит достичь синергетического эффекта, который будет заключаться в сокращении используемых ресурсов, временных и материальных, для оптимизации ТП. В качестве критерия эффективности было выбрано количество итераций, необходимое для успешного решения оптимизационной задачи каждым из рассматриваемых методов. Для проверки гипотезы был спланирован и проведен лабораторный эксперимент. В результате анализа данных эксперимента установлено, что разработанная методика является эффективной, в частности, она позволяет получать результат за меньшее количество итераций, чем при использовании метода деформируемого многогранника. С другой стороны, преимущество предлагаемой методики по сравнению с решением задачи экспертной системой состоит в том, что она позволяет получать решение в большинстве случаев.

Ключевые слова: неавтоклавный газобетон, технологический процесс производства, оптимизация, эксперимент, качество, технология экспертных систем, метод деформируемого многогранника.

Орлов А.А., Леонтьев С.В., Курзанов А.Д. Экспериментальная оценка эффективности методики оптимизации технологического процесса производства неавтоклавного газобетона // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2018. – № 1. – С. 114-124. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.01.08

Orlov A., Leont'ev S., Kurzanov A. Experimental evaluation of the effectiveness of non-autoclaved aerated concrete manufacturing process optimization method. PNRPU. Applied ecology. Urban development. 2018. No. 1. Pp. 114-124. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.01.08

Производство мелкоштучных стеновых блоков из неавтоклавного газобетона (НГБ) по литьевой технологии – развивающееся направление отрасли промышленности строительных материалов. Этому способствует, главным образом, относительная простота технологического процесса производства (ТПП) данного материала, не требующая использования сложного и дорогостоящего оборудования [1, 2].

Производство стеновых блоков из НГБ, соответствующих требованиям нормативной документации, осложняется использованием сырья нестабильного качества, характеристики которого изменяются как от партии к партии, так и в рамках одной партии. Таким образом, перед технологом возникает задача постоянной оптимизации технологического процесса для поддержания заданного качества выпускаемой продукции. На современных предприятиях поддержание качества продукции на допустимом уровне обеспечивается за счет коррекции рецептурно-технологических параметров (РТП) производства. Величина корректирующих воздействий, т.е. изменение локальной рецептуры смеси и некоторых технологических параметров, определяется технологом исходя из его теоретических знаний и практического опыта [3].

В условиях низкой квалификации кадров на заводах НГБ, когда компетенция технолога не позволяет реализовать эффективное управление, задача изменения РТП может быть решена при использовании различных методов. Одним из эффективных методов решения задач отладки технологических процессов производства является метод экспертных систем [4–6]. Основным компонентом экспертной системы является база знаний, которая на основании обобщенного и формализованного опыта экспертов позволяет определить последовательность мероприятий для выхода из некоторой проблемной ситуации.

Другим вариантом решения задач настройки параметров ТПП может быть использование формальных алгоритмов поиска области допустимых решений [7, 8], например, метода деформируемого многогранника (метод Нелдера–Мида).

В статье [9] описан системный подход к оптимизации процесса производства НГБ, заключающийся в использовании новой методики подбора РТП для производства продукции стабильно высокого качества. Новая методика представляет собой синтез двух методов поиска оптимального решения – технологии экспертных систем и формальной процедуры поиска. Предполагается, что предлагаемый алгоритм их взаимодействия позволяет достичь синергетического эффекта, состоящего в том, что при успешном указании экспертной системой точки экстремума необходимость

поисковой процедуры полностью отпадает, а при неуспешной попытке указанные экспертной системой точки используются в качестве стартовых для поисковой процедуры.

Эффективность предлагаемой методики подтверждена экспериментально. Для этого была подготовлена и проведена серия лабораторных экспериментов, суть каждого из которых заключалась в определении необходимого количества шагов для решения задачи оптимизации ТПП НГБ.

Предлагаемая методика сравнивалась с поиском оптимального решения при использовании экспертной системы (ЭС) и с методом деформируемого многогранника (МДМ) [10]. В качестве критерия эффективности принималось количество шагов, затрачиваемых на выполнение процедуры оптимизации ТП каждым из рассматриваемых методов.

В соответствии с правилами, содержащимися в базе знаний (БЗ) экспертной системы, процедура оптимизации заканчивается при условии одновременного наступления следующих событий: высота смеси по завершении процесса газообразования достигает требуемого уровня ($K_{всп} \in [3,16...3,49]$ для газобетона марки по средней плотности D500), при этом осадка смеси не превышает допустимую величину (до 1 см).

При использовании метода деформируемого многогранника критерием оптимизации (целевой функции) служит комплексный критерий, рассчитываемый по методике, описанной в статье [10]. Использование механизмов комплексного оценивания позволяет одновременно учитывать несколько показателей процесса структурообразования, что способствует наиболее полному описанию рассматриваемого процесса [11, 12].

Исходные данные эксперимента. Задача оптимизации была решена дважды на сырье различного качества, характеристики которого представлены в табл. 1.

В качестве варьируемых факторов (вектора управляемых параметров) были выбраны следующие параметры ТП: расход алюминиевой пасты (U_1 , г), расход каустической соды (U_2 , г), заливочная температура смеси (U_3 , °С), расход воды (U_4 , кг), цементно-песчаное соотношение (U_5).

В качестве контролируемых параметров процесса структурообразования определялись коэффициент вспучивания ($K_{всп}$), пластическая прочность (ПП, Па) в момент окончания увеличения высоты вспучивания массива, величина осадки смеси (ΔH , см).

Теоретический состав НГБ, а также прочие технологические параметры были определены в соответствии с рекомендациями СН 277–80, наряду с начальным вектором управлений представлены в табл. 2.

Таблица 1

Характеристика сырьевых материалов

Компонент	Состав 1	Состав 2
Вяжущее	ЦЕМ I 42,5 Н («Горнозаводскцемент») $R_{ц} = 53$ МПа Начало схват. 160 мин Конец схват. 210 мин Н.Г. 27,6 %	ЦЕМ I 32,5 Б («Сухоложскцемент») $R_{ц} = 50,2$ МПа Начало схват. 225 мин Конец схват. 300 мин Н.Г. 24,25 %
Песок	Заюрчумское месторождение $M_k = 1,8$ Наиб. круп. частиц 2,5	Пролетарский карьер $M_k = 1,5$ Наиб. круп. частиц 1,25
Алюминиевая паста	Stara Alupog N905 TM Содержание акт. Al > 92 % Удел. пов-ть 30 000 см ² /г	Stara Alupog RO500 TM Содерж. акт. Al > 91 % Удел. пов-ть 27 000 см ² /г
Каустик	Массовая доля гидроксида натрия > 98,5 %	
Вода	по ГОСТ 23732–79	

Таблица 2

Исходные данные экспериментальных исследований

Исходный состав газобетона		Начальный вектор управлений	
ПЦ, кг	230	U_1	560
Песок, кг	230	U_2	1500
АП, г	560	U_3	45
КС, г	1500	U_4	172,9
Вода, кг	172,9	U_5	1,0

ПЦ – портландцемент, АП – алюминиевая паста, КС – каустическая сода.

Решение задачи оптимизации при использовании экспертной системы. В табл. 3 и 4 представлена последовательность шагов оптимизации при использовании технологии экспертных систем. Стоит обратить внимание, что в первом случае экспертная система за 5 шагов позволила оптимизировать процесс структурообразования материала.

С другой стороны, во втором случае решение задачи экспертной системой не было получено. При переборе всех предлагаемых ЭС альтернатив наблюдалось «кипение» массива. Данное явление вызвано чрезмерной интенсивностью реакции газообразования и сопровождается выходом пузырей через верхнюю поверхность смеси. В конечном итоге массиву присущи недостаточная высота подъема, а также рваная структура материала.

Известно, что кипение массива, равно как и его осадка, являются сложными ситуациями для интерпретации даже для опытного человека-эксперта. Экспертная система, в которой на начальном этапе заложены лишь самые общие правила, не справилась с предложенной задачей.

Таблица 3

Результаты оптимизации для состава 1 при использовании ЭС

Шаг	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	$K_{всп}$	ΔH , см	ПП, Па	$\Delta^1 U_1$	$\Delta^1 U_2$	$\Delta^2 U_3$	$\Delta^1 U_4$	$\Delta^1 U_5$
1	560	1500	45	172,9	1	2,34	0	244	0	0	-3	0	0
2	560	1500	42	172,9	1	2,38	0	205	0	0	-3	+5	0
3	560	1500	39	181,1	1	2,79	2,5	125	+5	+2	-3	0	0
4	588	1530	36	181,1	1	3,07	4,5	73	0	+2	+3	0	0
5	588	1560	39	181,1	1	3,24	0,5	108					

¹Рекомендация ЭС по изменению управляющего параметра, %.²Рекомендация ЭС по изменению управляющего параметра, °С.

Таблица 4

Результаты оптимизации для состава 2 при использовании ЭС

Шаг	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	$K_{всп}$	ΔH , см	ПП, Па	$\Delta^1 U_1$	$\Delta^1 U_2$	$\Delta^2 U_3$	$\Delta^1 U_4$	$\Delta^1 U_5$
1	560	1500	45	172,9	1	2,34	0	175	+10	0	-3	0	0
2	616	1500	42	172,9	1	2,79	2,5	144	+5	+2	-3	0	0
3	647	1530	39	172,9	1	кипение			+5	+2	-3	+2	0
4	647	1530	39	176,4	1	кипение			+5	+2	-3	+2	-2
5	647	1530	39	176,4	0,98	кипение							

¹Рекомендация ЭС по изменению управляющего параметра, %.²Рекомендация ЭС по изменению управляющего параметра, °С.

Исходя из результатов, полученных в ходе первого эксперимента, может быть сделан вывод, что метод экспертных систем позволяет достаточно быстро получить требуемое решение, однако в некоторых случаях решение может быть не получено вообще.

Решение задачи оптимизации методом деформируемого многогранника. Ранее было отмечено, что в качестве функции оптимизации был выбран комплексный критерий, учитывающий несколько характеристик процесса структурообразования. При этом в соответствии с выбранной методикой комплексный критерий может принимать значения из диапазона [1;4]. С учетом того, что при использовании метода ДМ необходимо искать экстремум функции, то в качестве целевой функции оптимизации корректнее принять соотношение

$$F(U_i) = 4 - KO_i, \quad (1)$$

где KO_i – значение комплексного критерия в i -й точке с координатами $u_i^1, u_i^2, u_i^3, u_i^4, u_i^5$.

Значение функции оптимизации всегда находится в диапазоне $[0;3]$. В рамках решаемой задачи она должна быть минимизирована:

$$F(U_i) \rightarrow 0. \quad (2)$$

При этом решение задачи считается достигнутым при условии попадания значения целевой функции в диапазон $[0; \varepsilon]$, где ε – величина допустимого интервала, равная 0,2. Допустимый интервал функции отклика был определен исходя из следующих требований:

1. Значение коэффициента вспучивания должно быть не менее 3,15 и не более 3,49. Это условие позволяет получать изделия из НГБ с требуемыми значениями средней плотности.

2. Величина осадки массива не должна превышать 4 см. Иначе структура материала характеризуется большим количеством дефектов.

Исходя из этих условий были рассчитаны значения комплексного критерия в граничных точках, которые удовлетворяют вышеперечисленным требованиям, а также определены допустимые значения целевой функции (от 0 до 0,2 включительно).

В учебной литературе [13, 14] представлен алгоритм решения задачи методом Нелдера–Мида. Данный метод характеризуется несомненными преимуществами по сравнению с простым симплекс-поиском, позволяющими существенно уменьшать количество шагов при поиске оптимума, а также повысить точность решения задачи [15].

В табл. 5, 6 представлены результаты поиска экстремальных значений целевой функции: координаты точек симплексов, значения коэффициента вспучивания, осадки смеси в натуральных значениях, значения комплексного критерия и функции оптимизации.

Таблица 5

Результаты оптимизации методом Нелдера–Мида (состав 1)

Шаг	Значения управляющих параметров					Значения в фазовом простр.		Значения в квалимет. простр.		КО	$F(U_i)$
	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	$K_{всп}$	ΔH^1	$K_{всп}$	ΔH^1		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	550	1486	44	172,1	0,99	2,24	0	1,77	4	2,52	1,48
2	570	1486	44	172,1	0,99	2,37	0,5	1,97	3,95	2,64	1,36
3	560	1515	44	172,1	0,99	2,35	0	1,92	4	2,61	1,39
4	560	1500	47	172,1	0,99	2,34	2,5	1,88	3,76	2,51	1,49
5	560	1500	45	176,1	0,99	2,35	0	1,92	4	2,61	1,39
6	560	1500	45	172,9	1,03	2,3	0	1,87	4	2,59	1,41
	562^2	1500	45	173,1	1,00						

Окончание табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7	574	1515	46	174,0	1,01	2,59	0,5	2,38	3,95	2,9	1,1
8	586	1529	47	175,0	1,01	2,62	2	2,42	3,8	2,88	1,12
	565	1503	45	173,4	1,00						
9	579	1520	46	174,8	1,01	2,6	2	2,4	3,8	2,87	1,13
10	594	1538	46	176,1	1,02	2,83	2	2,98	3,8	3,26	0,74
	572	1510	45	174,1	1,00						
11	583	1521	45	175,3	0,97	2,65	2,5	2,52	3,76	2,94	1,06
12	595	1531	45	176,5	0,95	2,85	1,5	3,07	3,85	3,33	0,67
	579	1517	45	174,2	0,99						
13	597	1533	45	172,2	0,99	2,92	2	3,32	3,8	3,48	0,52
14	616	1550	45	170,3	1,00	3,08	1,5	3,82	3,85	3,84	0,16

¹Единица измерения – см.

²Курсивом обозначены координаты вспомогательных точек.

Таблица 6

Результаты оптимизации методом Нелдера–Мида (состав 2)

Шаг	Значения управляющих параметров					Значения в фазовом простр.		Значения в квалимет. простр.		КО	$F(U_i)$
	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	$K_{всп}$	ΔH^1	$K_{всп}$	ΔH^1		
1	550	1486	44	172,1	0,99	2,24	0	1,77	4	2,52	1,48
2	570	1486	44	172,1	0,99	2,37	0,5	1,97	3,95	2,64	1,36
3	560	1515	44	172,1	0,99	2,35	0	1,92	4	2,61	1,39
4	560	1500	47	172,1	0,99	2,34	2,5	1,88	3,76	2,51	1,49
5	560	1500	45	176,1	0,99	2,35	0	1,92	4	2,61	1,39
6	560	1500	45	172,9	1,03	2,3	0	1,87	4	2,59	1,41
	562 ²	1500	45	173,1	1,00						
7	574	1515	46	174,0	1,01	2,59	0,5	2,38	3,95	2,9	1,1
8	586	1529	47	175,0	1,01	2,62	2	2,42	3,8	2,88	1,12
	565	1503	45	173,4	1,00						
9	579	1520	46	174,8	1,01	2,6	2	2,4	3,8	2,87	1,13
10	594	1538	46	176,1	1,02	2,83	2	2,98	3,8	3,26	0,74
	572	1510	45	174,1	1,00						
11	583	1521	45	175,3	0,97	2,65	2,5	2,52	3,76	2,94	1,06
12	595	1531	45	176,5	0,95	2,85	1,5	3,07	3,85	3,33	0,67
	579	1517	45	174,2	0,99						
13	597	1533	45	172,2	0,99	2,92	2	3,32	3,8	3,48	0,52
14	616	1550	45	170,3	1,00	3,08	1,5	3,82	3,85	3,84	0,16

¹Единица измерения – см.

²Курсивом обозначены координаты вспомогательных точек.

В результате эксперимента установлено, что решение задачи оптимизации в обоих случаях найдено за 14 итераций.

Решение задачи оптимизации при использовании предложенной методики. В соответствии с представленной в статье [4] методикой поиска вектора управляющих параметров первоначально оптимизация осуществляется при помощи экспертной системы, которая формирует вектор изменений управляющих воздействий. При условии, что ЭС не дает возможности получить материал с качественной макроструктурой, на второй стадии оптимизации альтернативы формируются на основе метода деформируемого многогранника.

При подборе РТП, когда использовались сырьевые материалы состава 1, ЭС самостоятельно определила такие параметры, при которых макроструктура материала соответствовала предъявляемым к ней требованиям качества. Следовательно, нет необходимости продолжать поиск формальным математическим методом. При подборе РТП при использовании сырья состава 2, экспертная система не смогла предложить качественного решения задачи. Таким образом, возникла необходимость применения МДМ.

При продолжении оптимизации методом деформируемого многогранника были использованы результаты поиска оптимальных значений экспертной системой (первые 4 шага из табл. 4), на основе которых в соответствии с разработанным алгоритмом были рассчитаны координаты начального симплекса. Это позволило сократить количество проводимых экспериментальных замесов (табл. 7).

Таблица 7

Результаты продолжения оптимизации методом Нелдера–Мида

Шаг	Значения управляющих параметров					Значения в фазовом простр.		Значения в квалимет. простр.		КО	$F(U_i)$
	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	$K_{всп}$	ΔH^1	$K_{всп}$	ΔH^1		
1	596	1460,5	43	169,6	0,97	2,94	3,5	3,4	3,35	3,38	0,62
2	616	1500	42	172,9	1,00	2,79	2,5	2,86	3,76	3,12	0,88
3	606	1504	43	169,6	0,97	2,65	0,5	2,52	3,95	3,00	1,0
4	606	1475	44	169,6	0,97	2,92	2,0	3,37	3,8	3,51	0,49
5	606	1475	43	173,55	0,97	2,91	2,0	3,26	3,8	3,44	0,56
6	606	1475	43	170,4	1,13	2,85	1,0	3,07	3,9	3,35	0,65
	606	1477,1	43	171,21	1,01						
7	606	1450,2	43	172,82	1,05	3,02	3,5	3,63	3,35	3,54	0,46
8	606	1423,3	43	174,43	1,08	3,12	3,0	3,85	3,7	3,8	0,2

¹Единица измерения – см.²Курсивом обозначены координаты вспомогательных точек.

Таким образом, решение задачи оптимизации состава 2 предложенной методикой было выполнено за 12 итераций.

Результаты экспериментальных исследований. На основании изложенных результатов определено количество шагов, затраченных для поиска таких значений вектора управляющих параметров, при которых на стадии структурообразования формируется макроструктура, обеспечивающая получение качества НГБ, соответствующего требованиям нормативно-технической документации на данный материал. Общее количество выполненных итераций в зависимости от метода оптимизации представлено в табл. 8.

Таблица 8

Сводная ведомость количества затраченных шагов

№ п/п	Метод	Количество шагов	
		Состав 1	Состав 2
1	Метод экспертной системы	5	–
2	Метод деформируемого многогранника	14	14
3	Комбинированный метод	–	12

Экспериментальным путем установлено, что база знаний экспертной системы позволяет получить решение задачи достаточно быстро (5 шагов – состав 1), однако в некоторых случаях (состав 2) рекомендации ЭС оказываются ошибочными. В этом случае ЭС позволяет приблизиться к области требуемых значений целевой функции, после чего поиск продолжается методом деформируемого многогранника (комбинированный метод). Метод деформируемого многогранника позволяет найти решения в подавляющем большинстве случаев, однако поиск решения включает крайне большое количество шагов, что неприменимо в условиях промышленного эксперимента. Таким образом, может быть сделан вывод, что предлагаемая комбинированная методика оптимизации является эффективной при поиске значений управляющих параметров технологического процесса, обеспечивающих выпуск изделий из неавтоклавного газобетона стабильно высокого качества.

Библиографический список

1. Сахаров Г.П., Скориков Е.П. Неавтоклавный энергоэффективный поробетон естественного твердения // Изв. вузов. Строительство. – 2005. – № 7. – С. 49–55.
2. Narayanan N., Ramamurthy K. Structure and properties of aerated concrete: a review // Cement & Concrete Composites. – 2000. – № 22. – P. 321.
3. Laukaitis A. Influence of technological factors on porous concrete formation mixture and product properties. Summary of the research report presented for habilitation. – Kaunas University of Technology, 1999. – 70 p.
4. Телков А.Ю. Экспертные системы: учеб. пособие для вузов. – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2007. – 83 с.
5. Экспертная система мониторинга технологического процесса / А.Н. Буров, А.Л. Калабин, А.В. Козлов, Э.А. Пакшвер // Программные продукты и системы. – 2015. – № 2. – С. 39–43.
6. Edwards J.S. Expert Systems in Management and Administration – Are they really different from Decision Support Systems? // European Journal of Operational Research. – 1992. – Vol. 61. – P. 114.

7. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1985. – 327 с.
8. Бочкарев В.В. Оптимизация технологических процессов органического синтеза: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2010. – 185 с.
9. Курзанов А.Д., Леонтьев С.В. Системный подход к оптимизации технологического процесса производства неавтоклавного газобетона // Прикладная математика и вопросы управления. – 2017. – № 4. – С. 107-117.
10. Курзанов А.Д., Леонтьев С.В. Применение метода Нелдера–Мида при многокритериальной оптимизации производства неавтоклавного газобетона // Актуальные проблемы науки XXI века: сб. ст. / Междунар. исслед. орг. «Cognitio». – М., 2017. – Ч. 1.
11. Харитонов В.А., Винокур И.Р., Бельх А.А. Функциональные возможности механизмов комплексного оценивания с топологической интерпретацией матриц свертки // Управление большими системами. – 2007. – № 18 – С. 129–140.
12. Интеллектуальные технологии обоснования инновационных решений: моногр. / под ред. В.А. Харитоновой. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 342 с.
13. Лемешко Б.Ю. Методы оптимизации: конспект лекций. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 126 с.
14. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. – М.: Наука, 1983. – 384 с.
15. Аоки М. Введение в методы оптимизации. – М.: Наука, 1977. – 344 с.

References

1. Saharov G.P., Skorikov E.P. Neavtoklavnyj jenergojeffektivnyj porobeton estestvennogo tverdenija [Energy efficient non-autoclaved natural hardening cellular concrete]. *Izvestija vuzov. Stroitel'stvo*, 2005, no. 7, pp. 49-55.
2. Narayanan N., Ramamurthy K. Structure and properties of aerated concrete: a review // *Cement & Concrete Composites*, 2000, no. 22, pp. 321.
3. Laukaitis, A. Influence of technological factors on porous concrete formation mixture and product properties. Summary of the research report presented for habilitation. Kaunas University of Technology, 1999. 70 p.
4. Telkov A.Ju. Jekspertnye sistemy. uzov [Expert systems]. Voronezh: Izd-vo Voronezh. gos. un-ta, 2007. 83 p.
5. Burov A.N., Kalabin A.L., Kozlov A.V., Pakshver Je.A. Jekspertnaja sistema monitoringa tehnologicheskogo processa [The expert system of technological process monitoring]. *Programmnye produkty i sistema*, 2015, no. 2, pp. 39-43.
6. Edwards J.S. Expert Systems in Management and Administration – Are they really different from Decision Support Systems? *European Journal of Operational Research*, 1992, vol. 61, pp. 114.
7. Ahnazarova S.L., Kafarov V.V. Metody optimizacii jeksperimenta v himicheskoj tehnologii. Ucheb. posobie dlja him.-tehnol. spec. vuzov [Methods for optimization of experiment in chemical technology. Textbook for chemical technology special universities]. Moscow: High school, 1985. 327 p.
8. Bochkarev V.V. Optimizacija tehnologicheskikh processov organicheskogo sinteza: uchebnoe posobie [Optimization of technological processes of organic synthesis: Textbook]. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2010. 185 p.
9. Kurzanov A.D., Leont'ev S.V. Sistemnyj podhod k optimizacii tehnologicheskogo processa proizvodstva neavtoklavnogo gazobetona [A systematic approach to the optimization of the non-autoclaved aerated concrete technological production process]. *Prikladnaja matematika i voprosy upravlenija*, 2017, no. 4, pp. 107-117.
10. Kurzanov A.D., Leont'ev S.V. Primenenie metoda Neldera-Mida pri mnogokriterial'noj optimizacii proizvodstva neavtoklavnogo gazobetona [The Nelder-Mead method Application for non-autoclaved aerated concrete production multi-objective optimization]. *XXVII mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija «Aktual'nye problemy nauki XXI veka»*. Moscow, 2017. Vol. 1.
11. Haritonov V.A., Vinokur I.R., Belyh A.A. Funkcional'nye vozmozhnosti mehanizmov kompleksnogo ocenivanija s topologicheskoi interpretaciej matric svertki [The functionality of the complex estimation mechanisms with matrix convolution topological interpretation]. *Upravlenie bol'shimimi sistemami. Sbornik trudov*, 2007, no. 18, pp. 129-140.
12. Haritonov V.A., Elohova I.V., Stamatina V.I., Belyh A.A., Shajdulina R.F., Alekseev A.O., Lykov M.V., Vinokur I.R., Kaloshina E.A., Gureev K.A. Intellektual'nye tehnologii obosnovanija innovacionnyh reshenij: monografija [Intellectual technology of innovative solutions justification: monograph]. Perm': Izd-vo Perm. gos. tehn. un-ta, 2010. 342 p.

13. Lemeshko B.Ju. Metody optimizacii: konspekt lekcij [Optimization methods: lectures]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2009. 126 p.

14. Poliak B.T. Vvedenie v optimizatsiiu [Introduction to optimization], Moscow: Science, 1983. 384 p.

15. Aoki M. Vvedenie v metody optimizacii [Introduction to optimization methods]. Moscow: Science, 1977. 344 p.

Получено 27.01.2018

A. Orlov, S. Leont'ev, A. Kurzanov

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF NON-AUTOCLAVED AERATED CONCRETE MANUFACTURING PROCESS OPTIMIZATION METHOD

In the article the results of the comparison of the effectiveness of various non-autoclaved aerated concrete manufacturing process optimization methods are presented. The expert systems method, the Nelder-Mead method and the method developed by the authors of this article were chosen for comparison. The latter is a synthesis of the two methods mentioned above. A number of iterations necessary for the successful solution of the optimization problem with the help of each of the considered methods was suggested as the effectiveness criterion. As a result of the experimental data analysis it was found that the developed method is effective. In particular, it allows obtaining results in less iteration than when using the Nelder-Mead method. On the other hand, an advantage of the proposed method in comparison with the expert systems method is that the former allows getting a solution in most cases.

Keywords: non-autoclaved aerated concrete, manufacturing process, optimization, experiment, quality, expert systems technology, deformable polyhedron method.

Орлов Александр Анатольевич (Челябинск, Россия) – канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, e-mail: Orlova@susu.ru).

Леонтьев Степан Васильевич (Пермь, Россия) – канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительный инжиниринг и материаловедение», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: n1306cl@yandex.ru).

Курзанов Александр Дмитриевич (Пермь, Россия) – ст. преподаватель кафедры «Строительный инжиниринг и материаловедение», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kurzanov_sm_st@mail.ru).

Orlov Alexander (Chelyabinsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical sciences, Associate Professor of Department of Building materials and products, South Ural State University (National Research University) (454080, Chelyabinsk, Lenin av., 76, e-mail: Orlova@susu.ru).

Leont'ev Stepan (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical sciences, Associate Professor of Department of Construction Engineering and Material Sciences, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: n1306cl@yandex.ru).

Kurzanov Alexander (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer of Department of Construction Engineering and Material Sciences, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: kurzanov_sm_st@mail.ru).