

УДК 691.327.332

А.Д. Курзанов, С.В. Леонтьев

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

**СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА
НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА**

Представлен новый метод оптимизации процесса производства неавтоклавного газобетона в условиях использования сырья нестабильного качества. Предлагаемый метод основан на синтезе двух известных методов – метода экспертных систем и метода Нелдера–Мида. Представленный подход позволяет достичь синергетического эффекта, что заключается в существенном снижении среднего числа экспериментов, необходимых для адаптации процесса производства материала к использованию сырья с нестабильными свойствами.

Ключевые слова: системный подход, синергетический эффект, эмерджентность, экспертная система, метод Нелдера–Мида, неавтоклавный газобетон, технологический процесс производства.

A.D. Kurzanov, S.V. Leont'ev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**SYSTEMATIC APPROACH TO THE OPTIMIZATION
OF NON-AUTOCRAVED AERATED CONCRETE PRODUCTION
TECHNOLOGICAL PROCESS**

A new optimization method of non-autoclaved aerated concrete production process in terms of unstable quality raw materials use is presented in this article. The proposed method is based on a two well-known methods synthesis: method of expert systems and the Nelder–Mead method. The presented approach allows to achieving a synergistic effect, which is a significant decrease in the average number of experiments needed to adapt the material production process to unstable properties raw materials use.

Keywords: systematic approach, synergistic effect, emergence, expert system, Nelder–Mead method, non-autoclaved aerated concrete, production technological process.

При анализе систем в первую очередь обращают внимание на такие их свойства, как целостность, открытость, внутреннюю неоднородность, структурированность [1–3]. Ряд таких свойств, как целесообразность, функциональность и стимулируемость, в искусственно создаваемых системах признаются фундаментальными вследствие сво-

ей очевидности. Такому же свойству, как эмерджентность [4], в процессе проектирования технических систем не уделяется должного внимания.

Это вполне объяснимо, если проектируемые системы не относятся к категории так называемых сложных систем, их функциональность ограничена, а алгоритм функционирования достаточно очевиден. В этом случае проектирование системы может базироваться на какой-либо одной формальной модели.

Ситуация существенно осложняется в случае проектирования сложной системы, характеризующейся большой размерностью решаемой этой системой задачи и, как следствие, слабой изученностью предметной области и высокой чувствительностью результата к малым изменениям условий функционирования.

В качестве примера можно привести проблемы, связанные с управлением адаптацией технологического процесса производства неавтоклавного газобетона (ТПП НГБ) к местному сырью с непостоянными и быстроменяющимися свойствами.

Главным во всей технологии производства НГБ является процесс структурообразования, представляющий собой сочетание двух процессов – вспучивания и набора пластической прочности. Первый протекает за счет газовыделения водорода в результате взаимодействия щелочей и алюминия, второй – за счет гидратации вяжущего, причем все необходимые компоненты в том или ином виде присутствуют в составе используемого сырья.

Оптимальный режим протекания указанных процессов выглядит следующим образом. В начальный период времени подвижность смеси высока, вязкость минимальна. На этом этапе происходит процесс активного газовыделения (период времени $t_{\text{вспуч}}^0 - t_{\text{вспуч}}^1$ показан на рисунке). Пористая структура формируется в виде ячеек с формой, близкой к сферической. По мере увеличения высоты подъема смеси и приближения ее к требуемому значению ($H_{\text{треб}}$) интенсивность газообразования уменьшается, вязкость смеси η возрастает.

В момент времени $t_{\text{вспуч}}^2$ ($t_{\text{пласт}}^0$) ячеистобетонная смесь достигает оптимальной высоты ($H_{\text{треб}}$) и окончательно теряет подвижность: пластическая прочность достигает такого значения $R_{\text{пласт}}^1$, при котором

изменения макропористости уже не происходит. После этого пластическая прочность сформированного газобетонного массива продолжает увеличиваться и в момент времени $t_{\text{пласт}}^{\text{расп}}$ достигает значения $R_{\text{пласт}}^{\text{расп}}$, при котором структурообразование практически завершается [5–7].

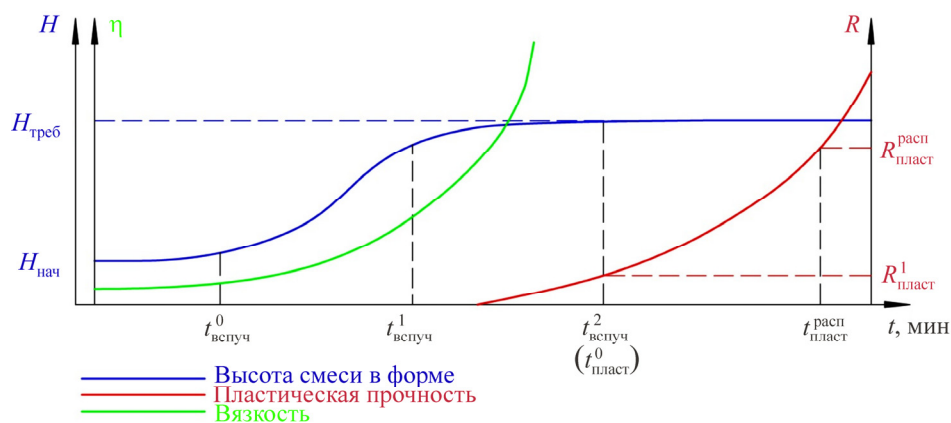


Рис. Оптимальный режим структурообразования неавтоклавного газобетона

Рассмотренный оптимальный режим реализуется лишь при условии точного соблюдения параметров технологического процесса и в первую очередь при использовании сырья неизменного качества. В противном случае возможны два сценария негативного развития процесса. В первом из них процесс вспучивания опережает процесс набора прочности; смесь при этом поднимается на слишком большую высоту, после чего опадает. Во втором случае процесс вспучивания отстает от процесса набора прочности; смесь при этом не поднимается до заданной высоты, затвердевая преждевременно. В обоих случаях качество произведенного НГБ снижается, вплоть до недопустимого.

Задача адаптации ТПП НГБ к быстроменяющимся свойствам используемого сырья связана с поиском оптимального решения в многомерном пространстве альтернатив. Для ее решения можно использовать классические численные методы поиска экстремума [8–10], однако, если на практике ограничиться одним лишь подобным методом, процедура поиска не будет рациональной, что объясняется следующими соображениями.

Любой формальный метод поиска для активизации требует серии экспериментов в окрестности начальной точки. Так, для реализации

метода простого или деформируемого симплекс-поиска необходимо изучить целевую функцию в числе точек, на единицу превышающем размерность пространства факторов. Градиентный метод требует определения частных производных, которое может быть реализовано лишь численным методом, в свою очередь, требующим значительного числа экспериментов для фильтрации зашумления. Затраты на поиск кратно увеличиваются, если целевая функция является многомодальной и поиск проводится несколько раз из различных исходных точек.

Процесс поиска замедляется в случае, если пространство поиска вытянуто по некоторым переменным (т.е. при наличии «оврага») и приходится передвигаться мелким зигзагом относительно его дна. Именно такая ситуация складывается в процессе подбора параметров ТПП НГБ в связи с высокой чувствительностью указанных выше процессов, во-первых, к соотношению концентрации алюминия и каустика, а во-вторых, к содержанию портландцемента и воды.

Реализация критерия окончания поиска также предполагает исследование некоторого числа точек, даже после того как окрестность точки глобального экстремума будет достигнута. Особенно сложной процедура окончания поиска становится при наличии в пространстве поиска точек перегиба профиля и седловых точек.

Другой формальной моделью, на которой может быть основана оптимизация ТПП НГБ, является логический вывод на основе правил продукции. Для его применения предварительно должна быть сформирована база знаний, содержащая множество продукционных правил, являющихся парами «условие – действие», которые определяют отдельные шаги, выполняемые в процессе решения задачи. Условие (антецедент) правила представляет собой образец, по которому можно определить, нужно ли в данный момент применить данное правило для выполнения очередного этапа решения задачи, а действие (консеквент) определяет содержание соответствующего этапа решения:

ЕСЛИ « $K_{всп}^0 \in [1,0...2,0]$ »

И « $R_{пласт}^0 < R_{пласт}^1$ »

И « $\Delta H^0 \in [0...1,0]$ »

ТО «Количество выделяющегося газа малое»

И «Осадки смеси нет»

И «Увеличить Al на 30 %»

И «Увеличить NaOH на 10 %»

Кроме того, машина логического вывода должна включать в свой состав рабочую память, в которую помещаются образцы, отражающие состояние предметной области в каждый момент времени (например, «Осадки смеси нет»). Рабочий цикл машины логического вывода состоит в сравнении образцов из рабочей памяти с антецедентами продукции. В случае полного совпадения по «И» консеквент продукции записывается в рабочую память, а также предъявляется человеку – оператору – в качестве рекомендаций.

Качество сформированных такой экспертной системой рекомендаций полностью определяется качеством совокупного набора правил, на основании которого данные рекомендации получены. Качество же набора правил полностью определяется квалификацией экспертов (в рассматриваемом примере – технологов, специалистов по ТПП НГБ), привлеченных к разработке, а также широтой охвата территорий, на которой привлеченные эксперты оттачивали свою профессиональную компетентность. Главная проблема при этом состоит в крайне жесткой привязке рецептурно-технологических параметров НГБ к свойствам местного сырья. В связи с этим опыт эксперта, накопленный в условиях одного какого-либо географического региона, может оказаться бесполезным или даже вредным для организации ТПП НГБ в другом регионе. Это может проявиться, в частности, в том, что качество продукции в результате коррекции состава смеси в соответствии с рекомендациями экспертной системы не только не улучшится, а даже ухудшится.

Очевидно, что ни один из известных подходов к оптимизации не лишен недостатков. На практике они проявляются в увеличении числа необходимых экспериментов, что значительно удорожает процесс адаптации производства к изменению качества сырья, особенно если такие изменения происходят непрерывно и достаточно быстро. Избавиться от избыточности можно, наделив систему поиска экстремума дополнительными свойствами, которыми не обладает ни в один отдельно взятый компонент, но которые возникают при их правильном сочетании, т.е. наделив проектируемую систему свойством эмерджентности. Источником эмерджентности при этом должна стать структура системы, а именно соединение и организация взаимодействия отдельных частей системы, обеспечивающих искомый синергетический эффект.

Предположим, что реализация цикла производства НГБ (например, после смены поставщика сырья) окончился неудачей: масса не вспучилась или подседа после перевспучивания, а ее итоговая средняя плотность недопустимо отличается от заданной. Для подбора нового состава смеси, способного парировать отклонение в качестве сырья, например методом деформированного симплекса, необходимо продолжить эксперименты, чтобы определить, какой будет плотность газобетона, произведенного из смеси ингредиентов, процентное содержание которых (относительно исходной рецептуры) определяется геометрией недостающих вершин многомерной пирамиды. При этом теория поиска экстремума не вооружает технолога ни размерами симплекса, ни ориентацией, поэтому выбор стартовых точек поисковой процедуры в условиях реального производства производится случайным образом.

В случае же когда формальному поисковому алгоритму предшествует обращение к экспертной системе, выбор стартовых точек перестает быть случайным. Знания, накопленные специалистами по производству неавтоклавного газобетона и сконцентрированные в экспертной системе, позволяют для различных типовых ситуаций указать направление, в котором ранее удавалось наиболее быстро уйти от брака. Это направление определяется величиной изменений процентного содержания ингредиентов, которые, по мнению экспертов, нужно внести в состав смеси. Для этого необходимо вручную или автоматически ввести в рабочую память экспертной системы информацию о результатах последнего (неудачного) производственного цикла и привести в действие машину логического вывода. В зависимости от результатов срабатывания экспертной системы возможны различные варианты последующих действий.

Возможна ситуация, при которой сочетание свойств сырья в неудачном эксперименте соответствует свойствам сырья, с которым уже сталкивались эксперты – разработчики базы знаний. В таком случае среди правил содержатся рекомендации по изменениям исходного состава смеси, которые максимально приблизят качество НГБ к ожидаемому. В связи с этим поисковый этап вообще может не понадобиться.

В случае если свойства используемого сырья отличаются от оптимальных в том же направлении, что и в практике экспертов, но в значимо большей степени, первый эксперимент с откорректирован-

ной рецептурой покажет результат лучше, чем исходный опыт, но достаточно далекий от ожидаемого. В этом случае характеристики полученного в этом эксперименте НГБ нужно поместить в рабочую память экспертной системы, повторить процедуру логического вывода и провести второй эксперимент. В случае если и второй эксперимент приближает качество НГБ к ожидаемому, цепочку логических выводов и реализацию экспериментов с внесением предлагаемых корректив рецептуры следует итеративно продолжать. Переход к формальному алгоритму поиска понадобится лишь в том случае, если экспертная процедура завершится вдали от искомой точки. Синергетический эффект от сочетания двух методов в таком случае состоит, во-первых, в отсутствии необходимости проведения дополнительных экспериментов для активизации формальной поисковой процедуры, а во-вторых, в сокращении числа шагов формального поиска, поскольку экспертная система уже приблизила качество НГБ к ожидаемому.

В случае если первый эксперимент не дал ожидаемого приближения или привел даже к ухудшению качества НГБ, следует повторить попытку, но уже с учетом первого негативного результата. Если после второй попытки произойдет улучшение качества НГБ, следует действовать по предыдущему алгоритму. Если и второе экспертное решение окажется неудачным, затраты на три первых опыта не будут лишними, поскольку они могут использоваться в качестве вершин исходного симплекса формальной процедуры поиска.

Когда свойства местного сырья слишком сильно отличаются от тех, с которыми ранее сталкивались разработчики, экспертная система может вообще не дать никаких рекомендаций. В этом случае дальнейший поиск осуществляется исключительно на основе формальной методики поиска экстремума.

Очевидно, что синергетический эффект проявляется, когда свойства местного сырья не слишком отличаются от аналогичных свойств, с которыми уже сталкивались разработчики экспертных правил. Однако вероятность его проявления может быть значительно увеличена по мере учета экспертами опыта промышленной эксплуатации предлагаемой системы. Предположим, что экспертная система не смогла оптимизировать состав смеси, а формальная процедура поиска достигла результата. В этом случае исходные параметры ТПП НГБ и найденные изменения состава должны стать основой формулирования новых экспертных правил.

Если новые правила будут противоречить уже имеющимся в системе (например, при одних и тех же antecedентах правила содержат разные консеквенты), необходимо произвести детализацию исходной информации. В частности, можно провести полный лабораторный анализ сырья, использованного в экспериментах, на основе которых указанные правила были сформулированы, и найти именно ту разницу свойств, которая как раз и приводит к различию консеквентов. Тогда база правил должна пополниться еще одной рекомендацией: при данных antecedентах консеквент должен заключаться в требовании проведения лабораторного анализа сырья, но не полного, а сокращенного (и удешевленного) настолько, чтобы лишь обеспечить разрешение конфликта. Конфликт правил будет разрешен дополнением их antecedентов результатами рекомендованного анализа.

Очевидно, что подобное соединение и организация взаимодействия двух компонентов – экспертного и формального математического – позволяет добиться искомого синергетического эффекта – существенного снижения среднего числа экспериментов, необходимых для адаптации ТПП НГБ к использованию сырья с нестабильными свойствами, что доказывает появления у предлагаемой системы такого свойства, как эмерджентность.

Список литературы

1. Волкова В.Н., Денисов А.А. Теория систем: учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 2006. – 511 с.
2. Месарович М., Мако Д., Такахара И.М. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1978. – 311 с.
3. Чернышов В.Н., Чернышов А.В. Теория систем и системный анализ: учеб. пособие. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 96 с.
4. Альбеков Н.Н., Альбеков Н.Н. Поле эмерджентности в структуре речевой ситуации [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-1. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=20901> (дата обращения: 28.11.2017).
5. Книгина Г.И., Загоренко В.Д. Значения пластичности газобетонной массы при формировании макроструктуры // Строительные материалы. – 1966. – № 1. – С. 35.

6. Сулейманова Л.А., Кара К.А. Регулирование свойств газобетонной смеси и бетона с помощью введения различных добавок // Проблемы инновационного биосферно-совместимого социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном комплексах: материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конф. – Брянск, 2010. – С. 258.

7. Анизотропия физико-механических свойств ячеистого бетона в изделиях, изготовляемых способом вертикальной резки / И.Б. Удачкин, В.В. Васильев, М.Т. Ларионов, А.И. Супрун, С.М. Кокорев // Строительные материалы. – 1981. – № 11. – С. 13.

8. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. – М.: Наука, 1980. – 552 с.

9. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. – М.: Наука, 1983. – 384 с.

10. Сухарев А.Г. Глобальный экстремум и методы его отыскания. – М.: Изд-во МГУ, 1981. – 421 с.

References

1. Volkova V. N., Denisov A. A. *Teoriia sistem: Uchebnoe posobie* [Systems theory: a tutorial], Moscow, High school, 2006, 511 p.

2. Mesarovich M., Mako D., Takakura I. M. *Teoriia ierarkhicheskikh mnogourovnevnykh system* [Theory of hierarchical multilevel systems], Moscow, World, 1978, 311 p.

3. Chernyshov V.N., Chernyshov A.V. *Teoriia sistem i sistemnyi analiz: ucheb. posobie* [Systems theory and system analysis: textbook], Tambov, Publ. of Tambov state technical university, 2008. 96 p.

4. Al'bekov N.N., Al'bekov N.N. *Pole emerdzhentnosti v strukture rechevoi situatsii* [Emergence field in the structure of the speech situation] – *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*, 2015, Vol. 2-1. available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=20901>.

5. Knigina G.I., Zagorenko V.D. *Znacheniiia plastichnosti gazobetonnoi massy pri formirovanii makrostruktury* [Concrete mass plasticity values of during the macrostructure formation] - *Stroitel'nye materialy*. 1966. Vol. 1, pp. 35-36.

6. Suleimanova L.A., Kara K.A. *Regulirovanie svoistv gazobetonnoi smesi i betona s pomoshch'iu vvedeniia razlichnykh dobavok* [Regulation of the properties of concrete mixtures and concrete with the introduction of

various additives] *Materialy 2-oi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy innovatsionnogo biosferno-sovmestimogo sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiia v stroitel'nom, zhilishchno-kommunal'nom i dorozhnom kompleksakh»*. (Proc. of the 2nd International scientific-practical conference "problems of innovative biosphere-compatible socio-economic development in the construction, housing and communal services and road complex", Briansk, November 8 2010), 2010. pp. 258-260.

7. Udachkin I.B., Vasil'ev V.V., Larionov M.T, Suprun A.I., Koko- rev S.M. *Anizotropiia fiziko-mekhanicheskikh svoistv iacheistogo betona v izdeliakh, izgotovliaemykh sposobom vertikal'noi rezki* [Anisotropy of physical and mechanical properties of aerated concrete products manufactured by way of vertical cutting] - *Stroitel'nye materialy*. 1981. Vol 11. pp. 13-16.

8. Vasil'ev F.P. *Chislennye metody resheniia ekstremal'nykh zadach* [Numerical methods for solving extremal problems], Moscow, Science, 1980, 552 p.

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

10. Sukharev A.G. *Global'nyi ekstremum i metody ego otyskaniia* [A global extremum and methods of finding], Moscow, Publ. of Moscow State University, 1981, 421 p.

Получено 30.11.2017

Об авторах

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

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

About the authors

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

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