

# Методологические основы интеллектуальной поддержки управления технологическими процессами производства строительных материалов в условиях неопределенности

А. В. Антинескул<sup>1</sup>, В. А. Харитонов<sup>2</sup>, Д. Н. Кривоги́на<sup>3</sup>, А. Д. Курзанов<sup>4</sup>

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

<sup>1</sup>aantineskul@mail.ru, <sup>2</sup>cems@pstu.ru, <sup>3</sup>darya.krivogina@gmail.com, <sup>4</sup>kurzanov\_sm\_st@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются методологические основы решения задач разработки алгоритмов интеллектуальной поддержки технологических процессов производства строительных материалов с различными источниками неопределенности. Рассмотрены два класса неопределенности: неопределенность, связанная с воздействием на технологический процесс группы возмущений, и неопределенность, исходящая от потребителей и связанная с особенностями функционального назначения и условий эксплуатации.

**Ключевые слова:** *строительные материалы; неавтоклавный газобетон; технологический процесс производства; функциональное назначение; условия эксплуатации*

Выбор подходов к разработке алгоритмов интеллектуальной поддержки технологических процессов производства (ТПП) строительных материалов (СМ) часто связывают с различными источниками их неопределенности. В данной работе рассматриваются методологические основы решения этих задач при неопределенности, возникающей в результате воздействия на технологический процесс группы возмущений, и при неопределенности, исходящей от потребителя, задающего особенности функционального назначения и условий эксплуатации строительных конструкций.

## I. МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА

Процесс производства строительных материалов, в частности, изделий из неавтоклавного газобетона (НГБ) представляет собой сложную многосвязную систему, текущее состояние которой определяется большим количеством параметров, внешних и внутренних. Изменение параметров, в общем случае, влечет за собой снижение качества готового материала [1, 2].

Проблема выпуска продукции, удовлетворяющей требованиям нормативной документации, усугубляется использованием сырья нестабильного качества, характеристики которого изменяются быстро и в широком диапазоне. В этих условиях поддержание качества

готовой продукции на допустимом уровне обеспечивается за счет коррекции рецептурно-технологических параметров (РТП). Принимаемые управленческие решения, касающиеся изменения РТП, должны в максимальной степени приблизить свойства продукции к ожидаемым показателям. Необходимость формирования указанных решений требует от лица, принимающего решения (ЛПР), весьма высокого уровня компетентности, достижение которого возможно лишь при наличии достаточно глубоких знаний и многолетнего опыта работы, что в условиях современного производства не всегда возможно [3].

Одним из путей решения указанной проблемы является использование интеллектуальных систем, в частности, систем поддержки принятия решений (СППР), которые призваны помочь человеку при решении сложных неструктурированных задач.

Предложена концепция интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении процессом структурообразования НГБ (рис. 1) в условиях неопределенности, которая заключается в отсутствии возможности своевременного определения причин снижения качества структуры материала. Очевидно, что в таких условиях решение об изменении значений управляющих параметров должно быть принято на основе фактических параметров процесса структурообразования НГБ, а также на основе известной взаимосвязи между изменениями отдельных управляющих воздействий и результатом процесса структурообразования (СО).

Такая взаимосвязь, выявляемая специалистом в процессе его производственной деятельности, формирует его опыт и компетенцию, на основе которых, в конечном итоге, может быть сформирована база знаний (БЗ). С другой стороны, С учетом того, что база знаний экспертной системы может полностью не охватывать пространство состояний ТПП НГБ, экспертная система была дополнена поисковой системой, в которой реализован формальный метод поиска оптимума (метод Нелдера-Мида).

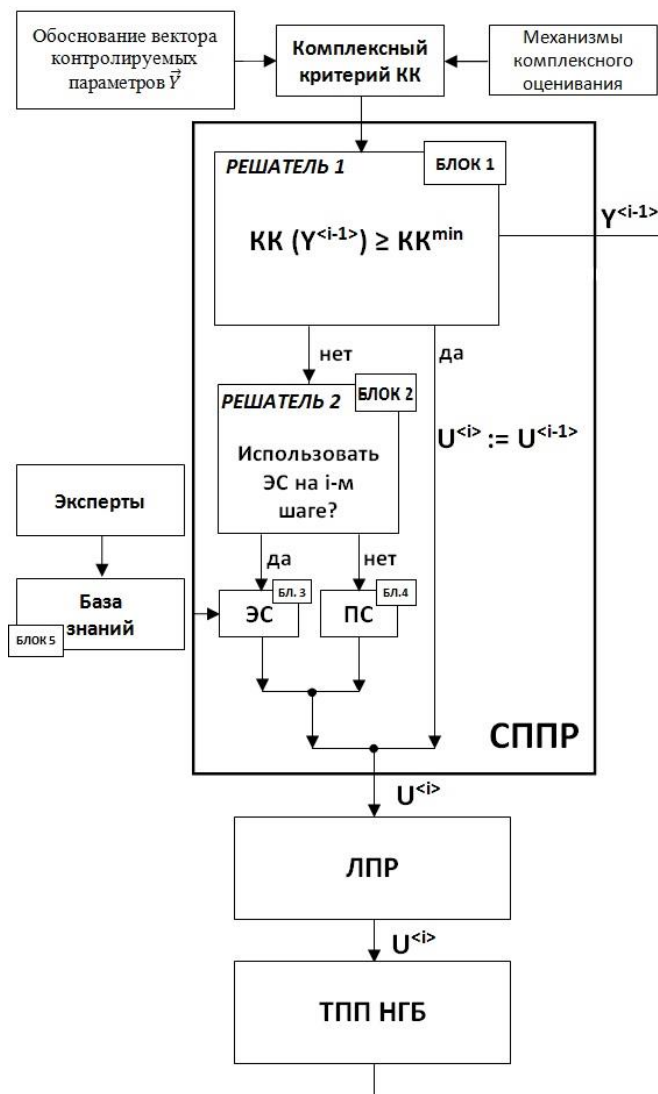


Рис. 1. Концепция системы поддержки принятия решений при управлении процессом структурообразования неавтоклавного газобетона в условиях неопределенности

Работа интеллектуальной системы основана на результатах предыдущего  $\langle i-1 \rangle$ -го цикла ТПП НГБ. Т.е. в качестве исходной информации выступают значения частных характеристик процесса структурообразования  $Y^{\langle i-1 \rangle}$ . Рассчитывается значение критерия управления  $КК(Y^{\langle i-1 \rangle})$  и сравнивается с минимально допустимым пороговым значением  $КК_{\min}$  (блок 1). В случае, если критерий управления  $КК(Y^{\langle i-1 \rangle})$  оказался не ниже некоторого порогового значения  $КК_{\min}$ , то рекомендация СППР  $U^{\langle i \rangle}$  будет состоять в сохранении имеющихся значений уставок регуляторов.

В противном случае дальнейший алгоритм формирования рекомендации базируется на работе той системы (поисковой или экспертной), чьи рекомендации представляются более эффективными (блок 2).

Первоначально предпочтение отдается экспертной системе (блок 3), которая должна формировать

рекомендации по изменению РТП на основе правил, заложенных в базу знаний (блок 5). В случае, если рекомендации ЭС не позволили существенно улучшить значение критерия управления, на смену ей приходит поисковая система (блок 4), которая реализует один из множества известных алгоритмов поиска экстремума функции.

Рецептурно-технологические параметры, изменение которых обеспечит наиболее эффективное управление процессом СО, обоснованы при использовании методов экспертной оценки [2]. В качестве управляющих параметров выбраны расход алюминиевой пасты ( $U_1$ ), расход каустической соды ( $U_2$ ), заливочная температура смеси ( $U_3$ ), расход воды ( $U_4$ ), соотношение между цементом и песком ( $U_5$ ).

В качестве критерия управления процессом структурообразования может быть использован критерий, учитывающий несколько частных качественных характеристик процесса СО (выходные параметры процесса): коэффициент вспучивания ( $K_{\text{всп}}$ ), осадка смеси ( $\Delta H$ ), предельное напряжение сдвига в момент завершения вспучивания смеси ( $P_{\text{пред}}$ ). С помощью известных механизмов комплексного оценивания [4] данные частные характеристики могут быть агрегированы в единый комплексный критерий (КК).

Таким образом, принятие решений об изменении управляющих параметров при производстве НГБ в условиях неопределенности может быть выполнено при использовании систем поддержки принятия решений, в которой формализованный опыт экспертов дополнен поисковой системой, реализующей алгоритм Нелдера-Мида поиска экстремума, что в конечном итоге, позволит достичь синергический эффект от совместного использования двух отдельных методов поиска оптимума.

## II. МЕТОДОЛОГИЯ СУБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТПП АССОРТИМЕНТА СМ

При создании объекта недвижимости (ОН) используется множество строительных конструкций, в дальнейшем воспринимающих на себя значительно отличающиеся друг от друга нагрузки и воздействия. В связи с этим становится актуальной оптимизация производства ассортимента СМ, предназначенная для улучшения баланса их характеристик, исходя из интересов потребителя, рассматриваемого в данной задаче как основной источник неопределенности. При таком проектировании СК необходим субъективный учет нагрузок и воздействий, воспринимаемых каждой отдельной СК в ОН. После чего по формализованным требованиям к характеристикам СМ в соответствии с функциональным назначением (ФН) и условиями эксплуатации (УЭ) данной конструкции осуществлять подбор материала для ее изготовления. Процесс реализации подхода к обоснованию требований, предъявляемых к производимым СМ в рамках единой технологии изготовления, представлен в виде инновационной концепции субъектно-ориентированной оптимизации и управления ТПП ассортимента СМ (рис. 2).

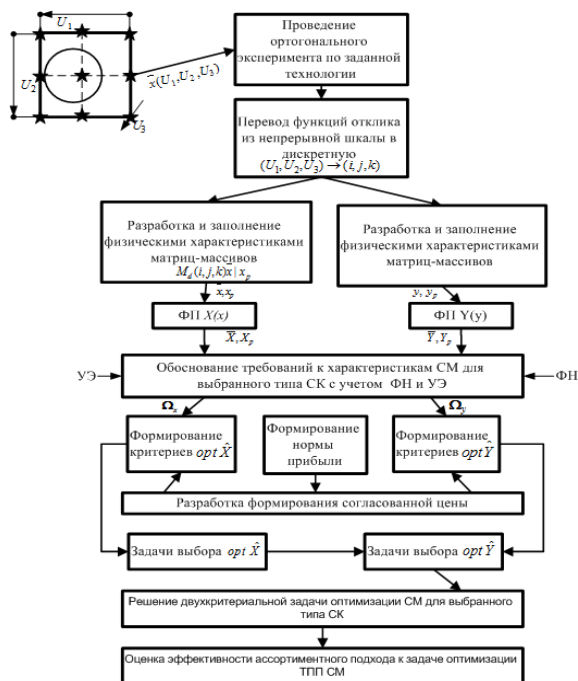


Рис. 2. Концепция субъектно-ориентированной оптимизации и управления ТПП ассортимента СМ

### Модель множества альтернатив ТПП СМ

Во главе предлагаемой концепции лежит построение модели множества альтернатив ТПП СМ, полученной на основе проведения ортогонального эксперимента в области варьирования выбранных параметров управления ТПП  $U_1, U_2, U_3$  по заданной технологии, и получение функций отклика (уравнений регрессии) для каждой востребованной характеристики материала  $\bar{x}$ , зависящей от изменения параметров  $U_1, U_2, U_3$  [5].

Для описания множества альтернатив ТПП СМ необходимо построить базовые универсальные матрицы – массивы  $M_d(i, j)_k$  с предварительным определением и установкой на них шага дискретности [6]. Процесс выбора оптимального ТПП СМ в рамках данного подхода предлагается рассматривать с позиции предпочтений двух участников производства – потребителя и производителя. Поэтому, в соответствии с предлагаемой концепцией, необходима разработка двух отдельных групп матриц-массивов –  $M_d(i, j)_k \bar{y}_p$  и  $M_d(i, j)_k \bar{x}_p$ . Матрицы-массивы производителя  $M_d(i, j)_k \bar{y}$  и потребителя  $M_d(i, j)_k \bar{x}$ , заполняются основными характеристиками СМ в соответствии с результатами ортогонального эксперимента, а матрицы-массивы  $M_d(i, j)_k \bar{y}_p$ ,  $M_d(i, j)_k \bar{x}_p$  – ценой, состоящей из себестоимости продукта и нормы прибыли от его реализации. Однако, на данном этапе реализации предлагаемого подхода, мы не имеем представления о конечной цене каждого ТПП СМ из всего множества альтернатив, поэтому всем ячейкам этих массивов присваивается нулевое значение.

Дальнейшие действия по подбору оптимального ТПП СМ для изготовления СК с учетом их ФН и УЭ индивидуальны и поэтому представлены в виде цикла.

### Выбор оптимального ТПП на основе формализованных требований к СМ для СК с учетом ФН и УЭ

Данный цикл начинается с обоснования требований к СК на основе их ФН и УЭ и последующей формализации этих требований к характеристикам СМ, после чего осуществляется подбор оптимального ТПП СМ.

В соответствии с предложенным подходом подбор оптимального ТПП СМ необходимо осуществлять на основе решения многокритериальной задачи выбора СМ из множества альтернатив, представленных матрицами-массивами  $M_d(i, j)_k \bar{y}_p$  и  $M_d(i, j)_k \bar{x}_p$ , по результатам применения процедуры комплексного оценивания уровня привлекательности каждой альтернативы для потребителя и производителя на основе применения механизма СОУ, позволяющего перевести значения физических характеристик материала из фазового пространства в безразмерное квалиметрическое с помощью разработки и построения участниками производства функций приведения (ФП) [7]. Однако необходимые для комплексного оценивания данные, касающиеся цены продукта, труднодоступны, поэтому целесообразно разработать процедуру формирования согласованной цены на основе механизма субъектно-ориентированного ценообразования [8]. Данный механизм позволяет находить согласованную цену в случае участия в процессе ценообразовании лиц с различными предпочтениями.

Дальнейшая задача оптимизации сводится к построению автоматизированной процедуры поиска наилучшего решения на построенном множестве. В основе данной процедуры лежит разработка алгоритмов, строящихся на применении известных подходов к постановке задач многокритериальной оптимизации. Работа алгоритмов направлена на поиск оптимальных ТПП СМ в соответствии с критериями оптимизации потребителя  $opt X$  и производителя  $opt Y$ . Изначально осуществляется поиск всех допустимых ТПП СМ, имеющих максимальные комплексные оценки, на матрицах-массивах потребителя, а затем на матрицах-массивах производителя определяется наиболее экономически выгодный ТПП СМ. В основе «процедуры» перечисления искомых многокритериальных задач предлагается использовать принцип поэтапного усложнения обстоятельств оптимизации потребителя и производителя при приоритете предпочтений потребителя, касающихся качественных параметров готовой продукции.

На основе изложенных принципов управления ТПП СМ разработаны модели и алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия решений в условиях неопределенности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Горяинов К.Э., Скрипник В.П. Формирование структуры ячеистого бетона // Строительные материалы. 1974. 5. С. 25-26.

- [2] Леонтьев С.В., Курзанов А.Д., Радугин Р.В. Комплексный подход при обосновании факторов управления качеством процесса структурообразования неавтоклавного газобетона // Инженерный вестник Дона [Electronic resource]. 2018. № 1. 17 с. Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4685>.
- [3] Сахаров Г.П., Корниенко П.В. Образование оптимальной структуры ячеистого бетона // Строительные материалы. 1973. № 10. С. 30-32.
- [4] Андронникова Н.Г., Бурков В.Н., Леонтьев С.В. Комплексное оценивание в задачах регионального управления. М.: ИПУ РАН, 2002. 58 с.
- [5] Халафян А.А., Промышленная статистика: Контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете STATISTICA, МОСКВА: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2013.
- [6] Шаманов В.А., Леонтьев С.В., Голубев В.А., Харитонов В.А., «Концепция автоматизации и управления технологическими процессами производства газобетона автоклавного твердения» // Научно-технический вестник Поволжья, № 5, pp. 558-563, 2015.
- [7] Алексеев А.О., Харитонов В.А., «Концепция субъектно-ориентированного управления в социальных и экономических системах» Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2015.
- [8] Харитонов В.А., Гейхман Л.К., Кривогино Д.Н. «Механизмы субъектно-ориентированного ценообразования в задачах управления венчурными проектами» // Вестник Пермского университета. Сер. "Экономика", т. 12, pp. 61-77, 2017.