

УДК 661.179 + 66.012

**М.В. Малимон, А.Г. Шумихин**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**ПЛАНИРОВАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РЕЦЕПТУР И ТЕХНОЛОГИЙ ГИБКОГО ПРОИЗВОДСТВА СУХИХ ТАМПОНАЖНЫХ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ СМЕСЕЙ**

*Рассматривается применение метода экспертных оценок при планировании исследований по разработке новых рецептур и соответствующей корректировке технологических регламентов производства сухих тампонажных магниевых смесей на предприятии, инфраструктурно являющемся научно-производственной организацией. Применение метода в условиях «гибкого» производства позволяет на основе предыдущего опыта по созданию рецептур минимизировать затраты времени и материальных ресурсов на организацию выпуска смеси нового компонентного состава.*

*При цементировании обсадных колонн в нефтяных и газовых скважинах, находящихся в осложненных горно-геологических условиях, используются многокомпонентные магниевые тампонажные растворы, приготовляемые затворением смеси сухих компонентов водным раствором хлорида магния. Для каждого отдельного месторождения, имеющего определенные сложные горно-геологические условия, разрабатывается определенный состав сухой тампонажной магниевой смеси с конкретными показателями качества, необходимыми именно для данной скважины. На предприятии, производящем смеси, для каждой вновь поступающей заявки от потребителей разрабатывается новая рецептура с отличным массовым компонентным составом. При создании новой рецептуры перед лабораторией стоит задача подбора массового соотношения компонентов смеси. Данная задача трудоемка и занимает много времени, вследствие чего происходит задержка выпуска новой продукции. Эту задачу можно рассматривать как задачу оптимизации и управления процессом создания новой рецептуры. Процесс создания рецептуры включает стадию обработки априорной информации и дальнейший экспериментальный отбор факторов, подлежащих подробному изучению. В данном случае метод экспертных оценок применяется как для оценки сте-*

*пени влияния исходных сухих компонентов на показатели качества получаемой продукции, так и для определения диапазонов значений параметров технологических процессов, протекающих при производстве сухих магнезиальных тампонажных смесей.*

***Ключевые слова:** нефтегазодобыча, обсадная колонна скважины, цементирование, сухая тампонажная смесь, качество, рецептура, гибкое производство, управление, метод экспертных оценок.*

**M.V. Malimon, A.G. Shumikhin**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **RESEARCH PLANNING DURING DEVELOPMENT OF RECIPES AND FLEXIBLE PRODUCTION TECHNOLOGIES OF DRY CEMENT MAGNESIA MIXTURES**

*The article describes the application of the method of expert estimations in research planning of the development of new formulations and the corresponding adjustment of technological regulations for manufacturing of magnesia oil-well cement in the enterprise, which is an infrastructure of scientific and industrial organization. The method application in a "flexible" conditions allows to minimize time expense material resources for the organization of production of mixture of a new component stock based on previous experience to create formulations.*

*At cementing of casing strings in oil and gas wells which are located in the complicated geological conditions, multicomponent magnesia oil-well cement which prepared by mixing the dry mixture with an aqueous solution of the components of magnesium chloride are used. For each field, which has complex geological conditions, a composition of magnesia oil-well cement mixture with specific quality indicators which are necessary for this well, is developed.*

*For each new incoming request from consumers a new formulation with different weight component composition is developed at the factory, which produces mixtures. The laboratory task is to find out the mass mixing ratio during creating a new recipe. This task is laborious and time consuming, resulting in a delay of release of new products. This problem can be considered as an optimization and control the process of creating a new recipe problem. The process of creating the recipe includes the step of treating a priori information and continued experimental selection of the factors to be studied in detail. In this case, the method of expert estimates used to assess the degree of influence of*

*the initial dry ingredients on quality of the manufactured products, and for determining the range of values of parameters of technological processes during the production of magnesia oil-well cement.*

**Keywords:** *oil and gas production, casing strings, cementing, magnesia oil-well cement, quality, recipe, flexible manufacturing, management, method of expert evaluations.*

Сухие тампонажные смеси (СТС) предназначены для приготовления высококачественных тампонажных растворов при производстве на нефтяных и газовых скважинах:

- первичного цементирования обсадных колонн, в том числе в интервале межколонного пространства и в горизонтальных участках ствола скважины, хвостовиков;
- работ по изоляции зон поглощения технологических жидкостей;
- работ по установке упорных мостов;
- ремонтно-изоляционных работ, связанных с ликвидацией негерметичности обсадных колонн, заколонных и межколонных перетоков, ограничением притока воды в нефтяную скважину и т.д.;
- работ по ликвидации и консервации скважин.

Производство сухих магнезиальных тампонажных смесей в составе научно-производственной организации (далее НПФ) имеет признаки гибкой производственной системы, обеспечивающей возможность быстрого перехода на выпуск модернизированной или новой продукции.

В ООО «НПФ „Монолит“» производятся составы смеси для месторождений, имеющих разные геологические условия, поэтому для каждого отдельного месторождения разрабатывается определенный состав смеси с конкретными показателями качества, необходимыми именно для данной скважины<sup>1</sup>.

Столь разнообразный выбор продукции обусловливается тем, что для каждого месторождения существуют свои особенные термобарические условия крепления обсадных колонн (температура крепления

---

<sup>1</sup> RUS ISO 10426-1-2000. Промышленность нефтяная и газовая. Цементы и материалы для цементирования скважин. Ч. 1. Технические условия / Федер. а-во по техн. регулированию и метрологии. – М., 2000. – 58 с.

RUS ISO 10426-2-2003. Промышленность нефтяная и газовая. Цементы и материалы для цементирования скважин. Ч. 2. Испытания цементов / Федер. а-во по техн. регулированию и метрологии. – М., 2003. – 172 с.

колеблется от 25 до 40 °С, а, как известно из уравнения Аррениуса, при повышении температуры на 10 градусов скорость химической реакции возрастает в 2 раза), поэтому сроки схватывания и загустевания тампонажного материала должны быть подобраны с учетом всех условий применения магнезиального тампонажного материала, способа доставки ее на место производства цементировочных работ и хранения, состава и количества используемой цементировочной техники [1, 2, 3].

Поскольку смесь представляет собой мелкодисперсную композицию, состоящую из множества компонентов, для каждой вновь поступающей заявки на сырье разрабатывается новая рецептура с отличным массовым компонентным составом. При создании новой рецептуры перед лабораторией стоит задача подбора массового соотношения компонентов смеси. Данная задача трудоемка, требует больших затрат времени и ресурсов, вследствие чего происходит задержка выпуска новой продукции. Для повышения скорости и эффективности принимаемых решений как инструмент оценки альтернатив при создании новой рецептуры используется метод экспертных оценок. Метод предполагает создание рецептуры на основе предыдущего опыта с выделением основных компонентов разрабатываемой смеси.

Для реализации метода экспертных оценок при планировании исследований необходимо решить задачи подбора экспертов, проведения опроса и обработки результатов данного опроса. В процессе принятия решений эксперты выполняют информационную и аналитическую работу по формированию и оценке решений. Все многообразие решаемых задач сводится к трем типам:

- формирование объектов;
- оценка характеристик;
- формирование объектов и оценка их характеристик.

Качественный состав экспертов определяется такими характеристиками, как компетентность, креативность, отношение к экспертизе, конформизм, конструктивность мышления, коллективизм, самокритичность. В частности, компетентность – это степень квалификации эксперта в определенной области знаний, которая определяется на основе анализа профессиональной деятельности специалиста, уровня и широты его знакомства с достижениями мировой науки и техники, понимания актуальности проблем и перспектив развития в рассматриваемой проблемной области знаний. Большинство перечисленных ха-

рактических оцениваются качественно, однако для некоторых из них вводят количественные оценки [4, 5].

Для определения значений оценок ряду специалистов ( $j = \overline{1, m}$ ) предлагается высказать суждение о целесообразности включения определенных лиц ( $i = \overline{1, m}$ ) в экспертную группу для решения некоторой проблемы. По результатам проведенного опроса составляется матрица, в ячейках которой проставляются значения переменных  $x_{ij}$ . При этом

$x_{ij} = 1$ , если  $j$ -й эксперт назвал  $i$ -го эксперта, и

$x_{ij} = 0$ , если  $j$ -й эксперт не назвал  $i$ -го эксперта.

По данным матрицы вычисляются коэффициенты компетентности как относительные веса экспертов по формуле

$$k_i = \frac{\sum_{j=1}^m x_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m x_{ij}}; \quad i = \overline{1, m}, \quad (1)$$

где  $k_i$  – коэффициент компетентности  $i$ -го эксперта,  $m$  – количество экспертов (размерность матрицы  $m \times m$ ). Коэффициенты компетентности нормированы так, что их сумма равна единице.

В НПФ в состав группы для проверки компетентности экспертов предложено включить 6 экспертов. На основе их опроса была составлена следующая матрица размерности  $6 \times 6$ :

	$\mathcal{E}_1$	$\mathcal{E}_2$	$\mathcal{E}_3$	$\mathcal{E}_4$	$\mathcal{E}_5$	$\mathcal{E}_6$
$\mathcal{E}_1$	1	0	1	1	1	0
$\mathcal{E}_2$	1	0	0	1	1	1
$\mathcal{E}_3$	1	1	1	1	1	1
$\mathcal{E}_4$	1	0	1	1	1	1
$\mathcal{E}_5$	0	1	0	0	1	0
$\mathcal{E}_6$	1	0	1	1	0	1

по значениям элементов которой в соответствии с формулой (1) для экспертов вычислены следующие значения коэффициентов компетентности:  $k_1 = \frac{4}{25} = 0,16$ ;  $k_2 = \frac{4}{25} = 0,16$ ;  $k_3 = \frac{6}{25} = 0,24$ ;  $k_4 = \frac{5}{25} = 0,2$ ;

$k_5 = \frac{2}{25} = 0,08$ ;  $k_6 = \frac{4}{25} = 0,16$ .

По найденным значениям коэффициентов можно сделать вывод, что компетентность пятого эксперта слишком мала, и его мнение можно не учитывать в принятии решений по планированию исследований. Остальные перечисленные выше характеристики экспертов носят качественный характер. Это влечет за собой в некоторых случаях проблемы согласования характеристик и выбора экспертов с учетом противоречивости их качеств.

Выбранной группе экспертов в эксперименте по оценке возможности применения метода экспертных оценок при планировании исследования было предложено по уже имеющимся данным по типу продукции разработать рецептуру, в которую входит 6 компонентов. Экспертам предлагалось приписать каждому компоненту ранги, характеризующие их роль в составе смеси как основы для качественного цемнтирования обсадных колонн в скважинах (более важным факторам присваиваются первые номера). По результатам опроса была составлена табл. 1.

Таблица 1  
Результаты экспертного опроса

Эксперты	Компоненты $K_j (j = \overline{1,6})$					
	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$
$\mathcal{E}_1$	1	2	2	3	3	1
$\mathcal{E}_2$	1	2	2	2	3	1
$\mathcal{E}_3$	1	2	3	3	3	2
$\mathcal{E}_4$	1	1	2	3	2	1
$\mathcal{E}_5$	1	1	1	2	3	2

В табл. 1 идентификатор эксперта  $\mathcal{E}_6$  заменен на  $\mathcal{E}_5$ . Для дальнейшего анализа необходимо пронормировать ранги табл. 1. Нормированный ранг оценок экспертов представляет собой среднее арифметическое их мест в табл. 1 [6, 7].

Таблица 2  
Нормированные ранги

Эксперты	Компоненты $K_j (j = \overline{1,6})$					
	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$
$\mathcal{E}_1$	1,5	3,5	3,5	5,5	5,5	1,5
$\mathcal{E}_2$	1,5	4,0	4,0	4,0	6,0	1,5
$\mathcal{E}_3$	1,0	3,5	5,0	4,0	5,0	3,5
$\mathcal{E}_4$	2,0	2,0	4,5	6,0	4,5	2,0
$\mathcal{E}_5$	2,0	2,0	2,0	4,5	6,0	4,5
$\sum_{i=1}^m x_{ij}$	8,0	15,0	19,0	25,0	27,0	13,0

Любая строка табл. 2 содержит натуральный ряд чисел, расположенных в различном порядке. Поскольку среднее арифметическое натурального ряда чисел равно  $0,5(k+1)$ , то среднее для всей таблицы

$$a = 0,5m(k+1) = 17,5,$$

где  $m$  – количество экспертов,  $k$  – количество компонентов, и тогда сумма квадратов отклонений

$$\sum_{j=1}^k d^2 = \sum_{j=1}^k \left( \sum_{i=1}^m x_{ij} - a \right)^2 = 265,5,$$

где  $x_{ij}$  – элемент матрицы в табл. 2,  $i$  – номер эксперта,  $j$  – номер компонента.

В качестве характеристики степени согласованности мнений специалистов целесообразно взять коэффициент конкордации [4]:

$$W = \frac{12 \sum_{j=1}^k d^2}{m^2 (k^3 - k) - m \sum_{i=1}^l T_i}, \quad (2)$$

где  $T_i$  – показатель связанных рангов в  $i$ -ранжировке.

$$T_i = \frac{1}{12} \sum_{v=1}^n (t_v^3 - t_v) = 10,$$

где  $n$  – число типов связанных рангов в строке,  $t$  – число равных рангов в  $i$ -й строке,  $l$  – число строк.

Вычисленное по формуле (2) значение коэффициента конкордации равно 0,612.

Значимость коэффициента конкордации оценивается по  $\chi^2$ -критерию при числе степеней свободы  $\nu = 5$ . Значение  $\chi^2$ -статистики вычисляется по формуле

$$\chi^2 = m(k-1)W = 15,3.$$

Табличное значение для  $\nu = 5$  и 5%-ного уровня значимости  $\chi^2_{\text{табл}} = 11,07$ . Поскольку  $11,07 < 15,3$ , то гипотеза о согласованности экспертов в ранжировках принимается. На основе усредненных данных экспертного опроса будет составляться пробная рецептура, затворяться

пробная смесь и оцениваться значения показателей качества. После подтверждения соответствия качества смеси требуемым значениям будет составлена рецептура и произведена смесь для отгрузки потребителю.

С использованием рассмотренного метода была решена также следующая задача [8].

Четырем экспертам предложено оценить влияние компонентов на показатели качества получаемой смеси. В исследуемом составе используется 8 исходных компонентов. Показателей качества для каждого компонента – 8, т.е. матрица показателей качества компонентов будет содержать 64 элемента. Для оценки введена пятибалльная шкала от 0 до 4, в которой значение 0 означает, что компонент не влияет на показатель качества готовой смеси, 1 – влияние незначительно, 2 – влияние среднее, 3 – влияние значительно, 4 – влияние сильное. Для оценки мнений экспертов применен метод ранговой корреляции (метод ранжирования). Элементы матрицы показателей качества были поделены на 8 групп. Первая группа соответствует влиянию первого компонента на плотность ( $K_1$ ), предел прочности ( $K_2$ ), прочность сцепления ( $K_3$ ), подвижность ( $K_4$ ), время загустевания ( $K_5$ ), сроки схватывания ( $K_6$ ), фильтратоотдачу ( $K_7$ ), объемное расширение ( $K_8$ ). Вторая группа соответствует влиянию второго компонента на те же показатели качества и т.д. По итогам опроса экспертов для первого компонента составлена табл. 3.

Таблица 3

Результаты опроса экспертов для первого компонента смеси

Эксперты	Показатели качества $K_j$ ( $j=\overline{1,8}$ )							
	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$
1	2	4	2	3	3	4	1	2
2	3	3	1	2	4	4	2	1
3	2	4	3	2	3	4	1	2
4	1	4	2	3	3	4	1	2

Произведено нормирование таблицы опроса (табл. 4). Нормированный ранг оценок экспертов представляет собой среднее арифметическое их мест в таблице.

Степень согласованности мнений экспертов оценивается с помощью коэффициента конкордации. Вычисленное для первого компонента значение коэффициента конкордации равно 0,68.



Таблица 4

Нормированные ранги

Эксперты	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	K <sub>5</sub>	K <sub>6</sub>	K <sub>7</sub>	K <sub>8</sub>
1	3,0	7,5	3,0	5,5	5,5	7,5	1,0	3,0
2	5,5	5,5	1,5	3,5	7,5	7,5	3,5	1,5
3	3,0	7,5	5,5	3,0	5,5	7,5	1,0	3,0
4	1,5	7,5	3,5	5,5	5,5	7,5	1,5	3,5
$\sum_{i=1}^m u_{ij}$	13,0	28,0	13,5	17,5	24,0	30,0	7,0	11,0

При  $W \geq 0,5$  мнение экспертов согласовано более чем на 50 %, т.е. результаты опроса могут быть использованы в дальнейшем для принятия решений. При  $W \leq 0,5$  мнение не согласовано, поэтому следует подобрать новый состав группы экспертов, пересмотреть методику опроса и провести новый экспертный опрос. В нашем случае, при  $W = 0,68$ , мнение экспертов считается согласованным.

Аналогично рассчитываются коэффициенты конкордации для других компонентов. После усреднения мнений всех экспертов была составлена табл. 5, отражающая степень влияния показателей качества исходных компонентов на показатели качества получаемой смеси.

Таблица 5

Влияние компонентов на показатели качества продукции

Компоненты	Показатели качества							
	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	K <sub>5</sub>	K <sub>6</sub>	K <sub>7</sub>	K <sub>8</sub>
Порошок магнетитовый каустический	2	4	2	2	4	4	1	2
Брусит обожженный	2	3	2	2	3	3	1	2
Триполифосфат натрия	1	1	0	4	1	1	2	0
Суперфосфат	1	4	2	1	4	4	4	2
Реабур	1	4	4	1	4	4	1	4
Микрокремнезем	4	1	2	1	1	1	1	1
Диатемитовая мука	4	1	2	1	1	1	1	1
Natrosol	1	1	1	4	2	1	2	1

В дальнейшем полученные данные могут использоваться для построения первоначальных моделей связи состав – качество, качество – качество, для других исследований при производстве сухих тампонажных смесей.

Таким образом, рассмотренный подход на основе метода экспертных оценок к планированию исследований на начальном этапе разработки рецептуры сухих магниезиальных тампонажных смесей позволяет учесть предыдущий опыт, сократить затраты времени и ресурсов, способствует обоснованному принятию решений ЛПР и владельцем проблемы.

### **Список литературы**

1. Приготовление сухих смесей магниезиальных тампонажных материалов в стационарных условиях / Г.М. Толкачев, А.М. Шилов, А.С. Козлов, Ю.С. Угольников, В.А. Мяслицин, С.А. Бортников, И.Р. Коптев // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2008. – № 8. – С. 43–45.
2. Никифоров А.Д. Управление качеством: учеб. пособие для вузов. – М.: Дрофа, 2006. – С. 161–176.
3. Жаворонкова М.С., Папанцева Е.И. Метрология, стандартизация и сертификация: метод. указания и задания для выполнения лаб. работ. – Ставрополь: Сервис-школа, 2011. – 52 с.
4. Рузинов Л.П. Статистические методы оптимизации химических процессов. – М.: Химия, 1972. – 200 с.
5. Малимон М.В., Сокольчик П.Ю. Определение степени влияния показателей качества исходных компонентов на качество получаемой смеси в производстве сухих тампонажных смесей // Наука. Технология. Производство – 2013: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. студ., аспирантов и молод. ученых. – Уфа, 2013. – С. 91–93.
6. Ефимов В.В. Улучшение качества продукции, процессов, ресурсов: учеб. пособие. – М.: КНОРУС, 2007. – 232 с.
7. Приготовление сухих смесей магниезиальных тампонажных материалов в стационарных условиях / Г.М. Толкачев [и др.] // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений / Всерос. науч.-исслед. ин-т организации, управления и экономики нефтегаз. пром-ти. – М., 2008. – № 8. – С. 43–45.
8. Магниезиальный тампонажный материал как альтернатива портландцементным тампонажным составам для повышения качества крепления скважин на Верхнечонском НГКМ / Г.М. Толкачев, А.С. Козлов, А.В. Анисимова, А.М. Пастухов // Бурение и нефть. – 2012. – № 12. – С. 32–37.

### **References**

1. Tolkachev G.M., Shilov A.M., Kozlov A.S., Ugolnikov Ju.S., Myalitsin V.A., Bortnikov S.A., Koptev I.R. Prigotovlenie sukhikh smesey magnezial-

nykh tamponazhnykh materialov v statsionarnykh usloviyakh [Preparation of magnesia oil-well cement blends in stationary conditions]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2008, no. 8, pp. 43-45.

2. Nikiforov A.D. Upravlenie kachestvom [Quality Management]. Moscow: Drofa, 2006, pp.161-176.

3. Zhavoronkova M.S, Papantseva E.I. Metrologiya, standartizatsiya i sertifikatsiya [Metrology, standardization and certification]. Stavropol: Servis shkola, 2011. 152 p.

4. Ruzinov L.P. Statisticheskie metody optimizatsii khimicheskikh protsessov [Statistical methods for optimization of chemical processes]. Moscow: Khimiya, 1972. 200 p.

5. Malimon M.V., Sokolchik P.Ju. Opredelenie stepeni vliyaniya pokazateley kachestva iskhodnykh komponentov na kachestvo poluchaemoy smesi v proizvodstve sukhikh tamponazhnykh smesey [Determination of the degree of influence of quality metrics to the quality of the starting components of the resulting mixture in the production of dry cement mixes]. *Nauka. Tekhnologiya. Proizvodstvo – 2013*. Ufa, 2013, pp.91-93.

6. Efimov V.V. Uluchshenie kachestva produktsii, protsessov, resursov [Improving the quality of products, processes, resources]. Moscow: Knorus, 2007. 223 p.

7. Tolkachev G.M. [et al.]. Prigotovlenie sukhikh smesey magnezialnykh tamponazhnykh materialov v statsionarnykh usloviyakh [Preparation of dry mixtures of magnesia cement materials in stationary conditions]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*. Moscow: Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut organizatsii, upravleniya i ekonomiki neftegazovoy promyshlennosti, 2008, no. 8, pp. 43-45.

8. Tolkachev G.M., Kozlov A.S., Anisimova A.V., Pastukhov A.M. Magnezialnyy tamponazhnyy material kak alternativa portlandtsementnym tamponazhnyy sostavam dlya povysheniya kachestva krepleniya skvazhin na Verkhnechonskom NGKM [AM Magnesia plugging material as an alternative to Portland cement grouting compositions for improving the quality of well casing on VC NGKM]. *Burenie i nef't*, 2012, no. 12, pp. 32-37.

### Об авторах

**Малимон Мария Владимировна** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры автоматизации технологических процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: monoceross@mail.ru).

**Шумихин Александр Георгиевич** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: atp@pstu.ru).

### **About the authors**

**Mariya V. Malimon** (Perm, Russian Federation) – graduated student, department of automation of technological processes, Perm National Research Polytechnic University (Komsomolsky av., 29, Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: monoceross@mail.ru).

**Aleksandr G. Shumikhin** (Perm, Russian Federation) – doctor of technical sciences, professor, head of department of automation of technological processes, Perm National Research Polytechnic University (Komsomolsky av., 29, Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: atp@pstu.ru).

Получено 10.04.2014