

УПРАВЛЕНИЕ СТАДИЕЙ РАЗРАБОТКИ РЕЦЕПТУРЫ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СУХИХ ТАМПОНАЖНЫХ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН

А.Г. Шумихин, М.В. Малимон

В статье рассмотрен подход к разработке рецептуры сухих магниезиальных тампонажных смесей для приготовления раствора при тампонировании нефтяных и газовых скважин, основанный на формализованной обработке накопленных данных о рецептуре таких смесей, применяемых ранее на скважинах с учетом условий их обустройства и горно-геологических особенностей месторождения. С этой целью используются два метода, рассматриваемые в статье, - метод прецедентов и метод экспертных оценок. Для сокращения времени на поиск информации всеми участниками жизненного цикла сухой тампонажной магниезиальной смеси создается единое информационное пространство на базе PLM-системы.

Ключевые слова: нефтяные и газовые скважины, сухая магниезиальная тампонажная смесь, рецептура, метод экспертных оценок, метод прецедентов.

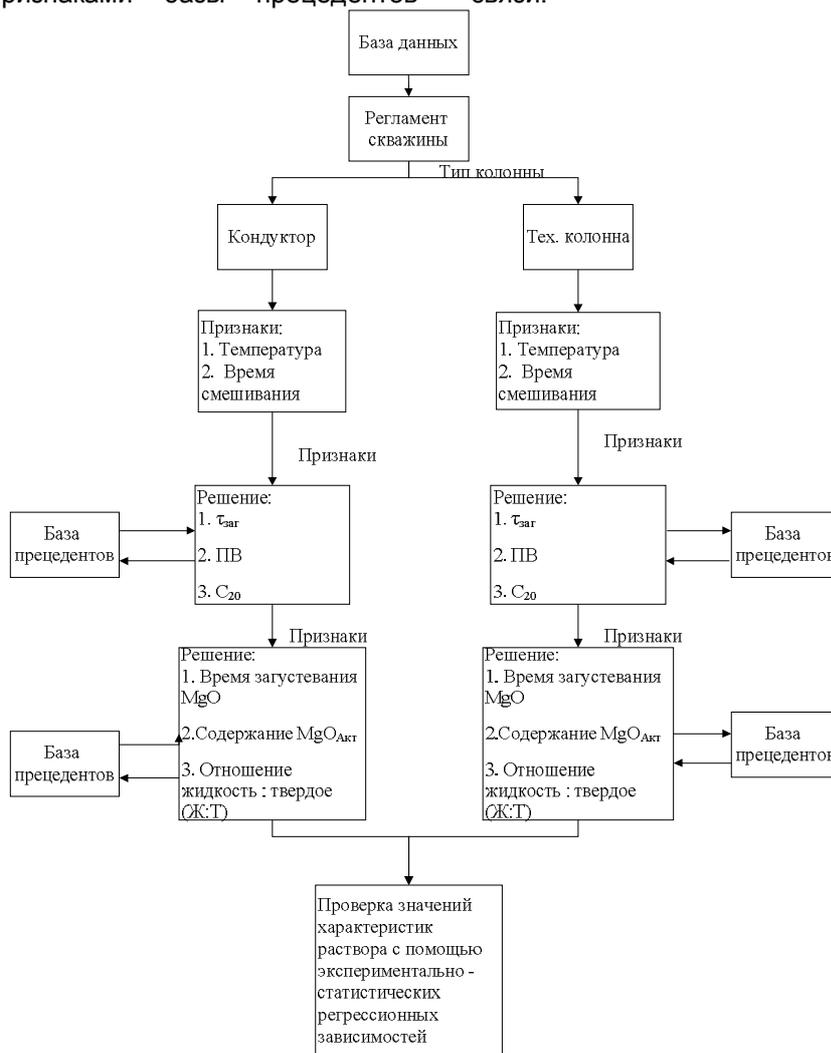
При создании сухой магниезиальной тампонажной смеси (СМТС) главной задачей является обеспечение точности дозирования исходных компонентов смеси во всем объеме получаемого продукта. Такая задача трудновыполнима, если смесь готовится непосредственно на буровой [1]. В полевых условиях строительства скважин, как правило на значительном удалении от баз производственного обслуживания, сложно обеспечить своевременный завоз и долговременную сохранность исходных материалов и компонентов. Поэтому производство сухих магниезиальных тампонажных смесей возможно только на специально подготовленных площадках в закрытых помещениях, оборудованных всеми необходимыми техническими средствами. Важным этапом в жизненном цикле сухой магниезиальной тампонажной смеси является создание рецептуры. Разработка и оптимизация рецептуры для каждой партии требует больших затрат времени, что в свою очередь увеличивает временные задержки между поступлением заказа и отгрузкой уже приготовленной партии. Для каждой скважины с определенными горно-геологическими особенностями и условиями обустройства разрабатывается своя рецептура. Для составления рецептуры необходимо знать время загустевания магниезиального раствора, который зависит от многих факторов, таких как, глубина колонны,

температура окружающей среды, назначение скважины, технико-технологические условия и конструктивные особенности оборудования, применяемого при приготовлении тампонажного раствора, от характеристик жидкости для затворения магниезиальной смеси, температуры сухой смеси и жидкости. Далее, после установления требуемого времени загустевания раствора, необходимо подобрать такие компоненты и их количество чтобы получить смесь с требуемыми характеристиками. К таким характеристикам относятся: время загустевания ($T_{\text{заг}}$), пластическая вязкость (ПВ), седиментационная стабильность (C_{20}), время схватывания раствор и прочностные характеристики цементного камня [2].

Для принятия решений по подбору рецептуры рассмотрен подход на основании метода прецедентов (метод вывода по случаям). Метод прецедентов при принятии решений основан на использовании знаний о предыдущих ситуациях или случаях (прецедентах). При рассмотрении новой проблемы (текущего случая) отыскивается похожий прецедент в базе знаний. Прецедент в базе знаний включает в себя проблемную ситуацию, которая описывает состояние исследуемого процесса, решение этой проблемы. Вместо того, чтобы искать решение каждый раз, используется решение, принятое в сходной ситуации, адаптированное к изменившейся ситуации текущего случая. После того, как текущий

случай будет обработан, он вносится в базу знаний вместе со своим решением для его возможного использования в будущем. Применение метода прецедентов схематично представлено на рис.1. Получая заказ по регламенту введенному на скважине определяется тип колонны. Кондуктор – колонна устанавливаемая после обсадной колонны. Она защищает пресноводные пласты от загрязнения нефтью, газом или соленой водой из более глубоких продуктивных слоев. Тех. колонна – промежуточная обсадная колонна, предохраняющая скважину от потерь бурового раствора в пластах неглубокого залегания. В зависимости от типа колонны выбирается база прецедентов. Из базы данных передаются данные о температурном диапазоне окружающей среды и требуемом времени перемешивания смеси в машинах заказчика, зависящим от их типа. Они являются признаками базы прецедентов

(знаний). В базе знаний по заданному правилу на основе признаков подбирается наиболее близкий к текущей проблемной ситуации на скважине прецедент с отвечающим ему решением проблемы, включающие значения времени загустевания ($T_{заг}$), пластической вязкости (ПВ), седиментационной стабильности (C_{20}). Это решение включается в вектор признаков на базы прецедентов рецептуры СМТС. Из базы прецедентов по заданному правилу выбирается прецедент с известным решением по рецептуре, наиболее близкие к текущей проблемной ситуации. Решение проверяется затем на значениях характеристик цементного раствора ($T_{заг}$, ПВ, C_{20}) путем подстановки значений компонентного состава смеси в экспериментально - статистические модели связи «характеристики раствора - компонентный состав» из базы моделей связи.



**УПРАВЛЕНИЕ СТАДИЕЙ РАЗРАБОТКИ РЕЦЕПТУРЫ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СУХИХ
ТАМПОНАЖНЫХ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ НЕФТЯНЫХ И
ГАЗОВЫХ СКВАЖИН**

Рисунок 1 – Алгоритм применения метода прецедентов.

Важной задачей является отыскание в базе знаний прецедента, наиболее близко соответствующего возникшей текущей проблемной ситуации. Для извлечения подходящего ситуации прецедента рассматривается следующий подход, основанный на нечетком алгоритме метода динамических сгущений [3].

Пусть каждый из k прецедентов $P_1, \dots, P_2, \dots, P_k$ характеризуется m признаками, достаточно полно характеризующими объект. Введем в рассмотрение m -мерное пространство R^m . Тогда каждому прецеденту в признаковом пространстве соответствует точка $\vec{x} \in R^m$, а текущей проблемной ситуации точка $\vec{V}(t) \in R^m$.

Текущая проблемная ситуация с определенной мерой $\mu_j^l = 1(j = \overline{1, m}; l = \overline{1, k})$ для каждого j -го признака будет принадлежать к пространству признаков каждого из прецедентов $P_l, (l = \overline{1, k})$.

Причем

$$\mu_j^l(x) \in [0,1], \sum_{i=1}^n \mu_j^l = 1(j = \overline{1, m}; l = \overline{1, k}).$$

Значения мер принадлежности $\mu_j^l(x), (x \equiv x_j \in R^m; j = \overline{1, m}; l = \overline{1, k})$ для всех признаков $x_j^l; (j = \overline{1, m}; l = \overline{1, k})$ рассчитываются в соответствии с выражениями

$$\mu_j^l(x) = \frac{1 / \|x_j^l - V_j\|^2}{\sum_{i=1}^k \left(1 / \|x_j^l - V_j\|^2 \right)} \text{ при}$$

$$x_j^l \neq V_j; j = \overline{1, m}; l = \overline{1, k}$$

и

$$\mu_j^c(x) = \begin{cases} 1, \text{ и} \delta \text{ } x_j^l = V_j, c = l \\ 0, \text{ и} \delta \text{ } x_j^l \neq V_j, c \neq l \end{cases}$$

для логических переменных x_j^l .

Для выбора в базе знаний ситуации вводится норма

$$F^l(x) = \|\vec{\mu}\|, l = \overline{1, k}; \dim \vec{\mu}^l = m$$

Для каждого из прецедентов вычисляются значения функции

Прецедент, отвечающий текущей проблемной ситуации, выбирается в соответствии со следующим правилом

$$\max_i \{\|\vec{\mu}\|\} \rightarrow P^v$$

где P^v - извлеченный из базы знаний прецедент.

Рассмотрим пример подбора рецептуры для цементирования колонны типа кондуктор при следующих условиях: температура окружающей среды более 15°C, и время перемешивания 29 минут. Из базы прецедентов выбирается наиболее близкое в смысле функции $F^l(x)$ решение к данной проблемной ситуации (таблица 1).

Таблица 1
Фрагмент базы прецедентов характеристик раствора.

№ прецедента	Решение проблемной ситуации			Признаки	
	T _{заг} , мин	C _{20,3} , кг/м ³	ПВ, сПз	T _{окружающей среды} , °C	Время перемешивания, мин
1	242	56	150,5	более 15	26
...
6	310	105	142,6	более 15	30
...
10	195	16	210	менее 15	23
...

При обработке данных по алгоритму метода прецедентов ближе всего к новой проблемной ситуации подходит ситуация из таблицы 1 с порядковым номером 6. Из таблицы 2 выбирается рецептуру по признакам, подходящим к нашей проблемной ситуации.

Таблица 2
Фрагмент базы прецедентов рецептуры
СМТС

№ со-ста-ва	Решение проблемной ситуации			Признаки		
	T _{заг} MgO, мин	Соде-ржан-ие MgO акт, %	Ж:Т	T _{заг} , мин	C _{20,3} кг/м ³	ПВ, сПз
1	95	20	0,8	242	56	150,5
...
6	95	10	0,85	310	105	142,6
...
10	75	20	0,75	195	16	210
...

При обработке данных была подобрана рецептура со следующими массовыми долями компонентов в составе: активная вяжущая добавка - 83,5%; MgO_{акт} - 9,2%; расширяющая добавка - 4,2%; облегчающая добавка -3,1%.

Выбранные в рецептуре компоненты имеют следующие свойства: время загустевания MgO - 95 мин; отношение Ж:Т - 0,85.

Так как многие качественные характеристики компонентов зависят от партий, необходимо на складе подобрать компоненты со схожими показателями качества.

Для подтверждения достоверности полученных с применением метода прецедентов результатов при разработке рецептуры дополнительно использован метод экспертных оценок. И если рецептура смеси, предлагаемая для конкретных условий, не отвергается методом экспертных оценок, то ее можно рекомендовать для проверки путем лабораторного смешивания с дальнейшей передачей на производство. В противном случае следует провести дополнительные лабораторные исследования по подбору рецептуры, с учетом результатов и метода прецедентов и метода экспертных оценок. Сущность метода экспертных оценок заключается в проведении экспертами интуитивно-логического анализа проблемы с количественной оценкой суждений и формальной обработкой результатов. Наиболее распространенными методами оценки опроса экспертов являются метод рангов, метод непосредственного

оценивания, метод сопоставлений. Для рассматриваемой проблемы был выбран метод рангов[4,5].

Выбранной группе экспертов в эксперименте по оценки возможности применения метода экспертных оценок при планировании исследования было предложено по имеющимся данным о горно-геологических особенностях скважины разработать рецептуру в которую входят 6 основных компонентов. Экспертам (Э_i) необходимо было приписать каждому компоненту ранги (K_j), характеризующие их роль в составе смеси как основы для качественного цементирования обсадных колонн в скважинах (более важным факторам присваиваются первые номера). По результатам опроса составляется таблица 3.

Таблица 3
Результаты экспертного опроса

Эксперты	Компоненты K _j (j = 1,6)					
	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆
Э ₁	1	2	2	3	3	1
Э ₂	1	2	2	2	3	1
Э ₃	1	2	3	3	3	2
Э ₄	1	1	2	3	2	1
Э ₅	1	1	1	2	3	2

Для последующего анализа необходимо нормировать таблицу 3, нормированный ранг оценок экспертов, представляющий собой среднее арифметическое их мест в таблице 3.

Таблица 4
Нормированные ранги

Эксперты	Компоненты K _j (j = 1,6)					
	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆
Э ₁	1,5	3,5	3,5	5,5	5,5	1,5
Э ₂	1,5	4	4	4	6	1,5
Э ₃	1	3,5	5	4	5	3,5
Э ₄	2	2	4,5	6	4,5	2
Э ₅	2	2	2	4,5	6	4,5
$\sum_{i=1}^m x_{ij}$	8	15	19	25	27	13

В качестве характеристики степени согласованности мнений специалистов целесообразно взять коэффициент конкордации. Значимость которого оценивается по χ^2 – критерию. Вычисленное значение χ^2 статистики равно 15,3. Табличное значение χ^2 для v = 5 и 5% уровня значимости $\chi^2_{табл.} = 11,07$. Поскольку $11,07 < 15,3$ то гипотеза о согласованности мнений

**УПРАВЛЕНИЕ СТАДИЕЙ РАЗРАБОТКИ РЕЦЕПТУРЫ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СУХИХ
ТАМПОНАЖНЫХ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ НЕФТЯНЫХ И
ГАЗОВЫХ СКВАЖИН**

экспертов в ранжировках принимается. На основе усредненных данных экспертного опроса составляется пробная рецептура, затворяется пробная смесь и оцениваются значения характеристик раствора.

При обработке данных была подобрана рецептура со следующими массовыми долями компонентов в составе: активная вяжущая добавка - 82,7%; MgO_{акт} - 10%; расширяющая добавка - 4,3%; облегчающая добавка - 3%.

Выбранные в рецептуре компоненты имеют следующие свойства: время загустевания MgO - 93 мин; отношение Ж:Т - 0,8.

Уравнения связи «характеристики раствора - компонентный состав» были получены в виде уравнений регрессии, с использованием ранее реализованного в натурном эксперименте некомпозиционного плана второго порядка [6]. Факторами при трехфакторном эксперименте являлись: содержание химически активного тонкодисперсного магнезимального вяжущего, химическая активность MgO и отношение Ж:Т. Уровни и интервалы варьирования

факторов были выбраны на основе и с учётом априорной информации и представлены в таблице 5.

Таблица 5

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Кодовое значение	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
			основной, 0	верхний, +1	нижний, -1
T _{заг} MgO, мин	x ₁	22	73	95	51
Содержание MgO _{акт} т, %	x ₂	10	10	20	0
Ж:Т	x ₃	0,05	0,8	0,85	0,75

Матрица некомпозиционного планирования приведена на в таблице 6.

Таблица 6

Матрица некомпозиционного плана второго порядка для трех факторов

Номер опыта	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₃ ²	у
1	+1	+1	+1	0	+1	0	0	+1	+1	0	y ₁
2	+1	+1	-1	0	-1	0	0	+1	+1	0	y ₂
3	+1	-1	+1	0	-1	0	0	+1	+1	0	y ₃
4	+1	-1	-1	0	+1	0	0	+1	+1	0	y ₄
5	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y ₅
6	+1	+1	0	+1	0	+1	0	+1	0	+1	y ₆
7	+1	+1	0	-1	0	-1	0	+1	0	+1	y ₇
8	+1	-1	0	+1	0	-1	0	+1	0	+1	y ₈
9	+1	-1	0	-1	0	+1	0	+1	0	+1	y ₉
10	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y ₁₀
11	+1	0	+1	+1	0	0	+1	0	+1	+1	y ₁₁
12	+1	0	+1	-1	0	0	-1	0	+1	+1	y ₁₂
13	+1	0	-1	+1	0	0	-1	0	+1	+1	y ₁₃
14	+1	0	-1	-1	0	0	+1	0	+1	+1	y ₁₄
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y ₁₅

В результате обработки экспериментальных данных, получены следующие уравнения регрессии:

$$T_{заг} = 243 + 47 \cdot x_1 - 13,75 \cdot x_2 + 29,75 \cdot x_3 - 9,25 \cdot x_1 \cdot x_2 + 8,75 \cdot x_1 \cdot x_3 - 3,25 \cdot x_2 \cdot x_3 - 18,38 \cdot x_1^2 - 2,88 \cdot x_2^2 - 7,38 \cdot x_3^2$$

$$ПВ = 194,2 - 51,85 \cdot x_1 - 90,25 \cdot x_2 - 91,55 \cdot x_3 + 33,48 \cdot x_1 \cdot x_2 + 22,08 \cdot x_1 \cdot x_3 + 42,89 \cdot x_2 \cdot x_3 + 51,86 \cdot x_1^2 + 51,86 \cdot x_2^2 + 13,61 \cdot x_3^2$$

$$C_{20} = 63 + 30,63 \cdot x_1 - 8,63 \cdot x_2 + 34 \cdot x_3 - 9,25 \cdot x_1 \cdot x_2 + 11 \cdot x_1 \cdot x_3 - 11,5 \cdot x_2 \cdot x_3 - 18,13 \cdot x_1^2 - 3,63 \cdot x_2^2 + 0,13 \cdot x_3^2$$

Подстановка в уравнения регрессии нормированных значений факторов, соответствующих полученным при применении метода экспертных оценок и метода прецедентов, дали следующие значения характеристик тампонажного раствора:

- для метода прецедентов: T_{заг} = 305,3 мин; ПВ = 140,2 сПз; C₂₀ = 123,5 кг/м³;

- для метода экспертных оценок: $T_{\text{заг}} = 299,6$ мин; $PВ = 131,5$ сПз; $C_{20} = 109,2$ кг/м³.

Из базы (таблица 1) был выбран прецедент для которого $T_{\text{заг}} = 310$ мин; $PВ = 142$ сПз ; $C_{20} = 105$ кг/м³, что позволяет сделать вывод о корректности применения метода прецедентов. Для подтверждения достоверности результатов было проведено пробное затворение СМТС в лабораторных условиях с рецептурой, соответствующей выбранному прецеденту, и получены следующие характеристики раствора $T_{\text{заг}} = 304$ мин; $PВ = 137$ сПз ; $C_{20} = 112$ кг/м³.

Результаты полученные при пробном затворении СМТС с выбранной по методу прецедентов рецептурой свидетельствуют, что метод приемлем для практического применения. При этом полученные рецептуры и характеристики раствора заносятся в базу знаний как новый прецедент.

Для обеспечения информацией всех участников жизненного цикла тампонажной смеси и управление его стадиями создается единое информационное пространство на базе PLM-системы, которое позволяет уменьшить время на поиски нужного прецедента в базе, организовать электронный документооборот, эффективно управлять производством и логистикой с наименьшими затратами времени, обеспечить гибкость производства СМТС [8].

Таким образом в процессе исследования были рассмотрены и оценены подходы основанные на методе прецедентов и методе экспертных оценок которые позволяют снизить затраты времени и ресурсов на создание и оптимизацию рецептуры для производства СМТС. Применимость этих методов и достоверность результатов исследования доказана с помощью регрессионных моделей связи «характеристики раствора - компонентный состав» и лабораторных затворений СМТС с подобранной рецептурой. Поскольку для применения метода прецедентов необходим большой объем информации предложено создание PLM-системы, в которой вся информация о предыдущих прецедентах будет упорядочена и легкодоступна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толкачев Г.М., Шилов А.М., Козлов А.С., Угольников Ю.С. Мялицин В.А., Бортников С.А.,

Коптев И.Р. Приготовление сухих смесей магниезиальных тампонажных материалов в стационарных условиях // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2008. №8. С. 43–45.

2. Применение магниезиальных цемента при бурении скважин и добыче нефти // Толкачев Г.М., Дулепов Ю.А., Шилов А.М. и др. – М: Изд. ЦП НТО НГП им. академика И.М. Губкина, 1987.

3. Шумихин А.Г., Дадиомов Р.Ю. Алгоритм поиска прецедентов производственных ситуаций в базе знаний // ММТТТ-2002: сб. тр. междунар. науч. конф. Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2002. – Т. 5.

4. Малимон М.В., Соколичик П.Ю. Определение степени влияния показателей качества исходных компонентов на качество получаемой смеси в производстве сухих тампонажных смесей. // Наука. Технология. Производство – 2013: тезисы докладов Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых – 2013. С. 91 – 93.

5. Малимон М.В., Шумихин А.Г. Планирование исследований при разработке рецептур и технологий гибкого производства сухих тампонажных магниезиальных смесей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2014. № 1. С. 7-18.

6. Анисимова А.В., Малимон М.В., Козлов А.С., Скорогонов М.С. Оптимизация составов магниезиальных тампонажных материалов с использованием регрессионных зависимостей // Международный Научный Институт "Educatio" 2014г. №5. - С. 130-133

7. Шумихин А.Г., Малимон М.В. Применение PDM-технологии при управлении жизненным циклом магниезиальных тампонажных смесей для цементирования нефтяных и газовых скважин // Южно-Сибирский научный вестник . 2014. №2(6). С. 106-109.

Шумихин Александр Георгиевич
(Пермь, Россия) – профессор, д.т.н.,
заведующий кафедрой автоматизации
технологических процессов химико-
технологического факультета Пермского
национального исследовательского
политехнического университета

Малимон Мария Владимировна
(Пермь, Россия) – аспирант Пермского
национального исследовательского
политехнического университета (614990,
Пермский край, г. Пермь - ГСП,
Комсомольский проспект, д. 29, e-mail:
monoceros@mail.ru)