

## Управление рецептурой в гибком производстве сухих магнезиальных тампонажных смесей для цементирования колонн в нефтяных и газовых скважинах

*М.В. Ваталева, А.Г. Шумихин*

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь*

**Аннотация:** Рассматривается метод управления рецептурой сухих магнезиальных тампонажных смесей (СМТС) при их производстве, предназначенных для тампонажных растворов для цементирования нефтяных и газовых скважин, отличающийся тем, что рецептура смеси подбирается исходя из требований к характеристикам тампонажного раствора и качеству цементного камня, определяемых в заказе применительно к горно-геологическим условиям конкретной скважины.

Метод основан на решении многокритериальной оптимизационной задачи, в которой в качестве критериев выступают отклонения частных характеристик получаемого из СМТС раствора от заданных значений в заказе на изготовление партии. Обобщенный критерий задачи формируется как аддитивная целевая функция из взвешенных частных критериев.

**Ключевые слова:** нефтяные и газовые скважины, сухие магнезиальные смеси, рецептура, тампонажные растворы, показатели качества, модели, оптимизация.

Сухие магнезиальные тампонажные смеси (СМТС) предназначены для приготовления растворов тампонажных материалов при проведении цементировочных работ в нефтяных и газовых скважинах, находящихся в осложненных горно-геологических условиях [1,2]. Производство СМТС в промышленных масштабах осуществляется на стационарных предприятиях. Важным этапом в жизненном цикле сухой магнезиальной тампонажной смеси является разработка рецептуры для получения тампонажного раствора-каменя с заданными характеристиками. Требуемые показатели качества СМТС зависят от горно-геологических особенностей и условий обустройства скважин. Эти значения определяются, в частности, назначением скважины, её глубиной, температурой окружающей среды на участке проведения работ и в самой скважине, технико-технологическими условиями и конструктивными особенностями оборудования, применяемого при приготовлении тампонажного раствора, а также зависят от характеристик жидкости для затворения магнезиальной смеси на скважине, температуры сухой смеси и жидкости. Разработка оптимальной рецептуры для каждой

---

партии СМТС требует больших затрат времени, что, в свою очередь, увеличивает временные задержки между поступлением заказа для конкретной группы скважин и отгрузкой уже приготовленной партии. Время схватывания тампонажного раствора и прочностные характеристики цементного камня обсадных колонн в скважине зависят от таких характеристик раствора как время загустевания ( $\tau_{\text{заг}}$ ), пластическая вязкость (ПВ), седиментационная стабильность ( $C_{20}$ ). Переменными параметрами рецептуры, определяющими характеристики раствора, являются химическая активность MgO, содержание химически активного тонкодисперсного магниезального вяжущего и отношение Ж:Т [3]. Исходя из изложенного, по признаку изменения рецептуры в зависимости от требований к характеристикам тампонажного раствора и качеству цементного камня в заказываемой партии СМТС, её производство следует считать гибким. Метод управления в этих условиях рецептурой СМТС, заключающийся в реализации последовательности ее подбора, рассматривается в статье на частном примере.

Предприятие – производитель СМТС, получив заказ на изготовление партии продукции, обеспечивающей получение на скважине тампонажного раствора с заданными значениями его характеристик, осуществляет разработку соответствующей рецептуры с исследованием характеристик раствора в лабораторных условиях. Все данные об условиях на скважинах и требуемых показателях качества хранятся в PLM-системе [5].

Рассматривается частный пример определения необходимого компонентного состава СМТС в партии продукции, требования к характеристикам которой заданы конкретным Заказчиком для скважин с определенными горно-геологическими особенностями и условиями обустройства.

В общем случае задача составления рецептуры решается как оптимизационная многокритериальная, в которой в качестве критериев выступают отклонения частных характеристик полученного раствора от заданных значений. Т.е. задачу подбора рецептуры можно сформулировать как задачу создания новых материалов с заданными свойствами, для которой модель оптимизации с критерием как сумма взвешенных квадратичных функций отклонений может быть представлена в следующем виде:

$$\left\{ R = \sum_{i=1}^n b_i \left( \frac{y_i - y_i^{(ном)}}{y_i^{(ном)}} \right)^2 \rightarrow \min_{\vec{x}} \left| y_i = \varphi_i(\vec{x}) \in [y_i^{\min}, y_i^{\max}], \forall i = \overline{1, n}; \right. \right. \\ \left. \left. x_l \in [x_l^{\min}, x_l^{\max}], \forall l = \overline{1, k} \right\} \rightarrow \vec{x}^{opt}, \quad (1)$$

где  $R$  – обобщенная целевая функция;

$y_i = \varphi_i(\vec{x})$  – модель связи « $i$ -тая характеристика-рецептура»,  $i = \overline{1, n}$ ;

$\vec{x} = \{x_l | l = \overline{1, k}\}$  – вектор рецептуры материала;

$b_i$  – весовой коэффициент приоритета  $i$ -той характеристики материала;

$y_i^{(ном)}$  – номинальное (заданное) значение  $i$ -той характеристики материала, ( $i = \overline{1, n}$ );

$\vec{x}^{opt}$  – вектор оптимальной рецептуры материала.

Решение задачи (1) дает прогнозируемый оптимальный состав. Материал синтезируется с найденным оптимальным составом, и определяются его характеристики  $y_i, \forall i = \overline{1, n}$ . Если характеристики значимо отличаются от прогнозируемых по модели, то планируются дополнительные синтезы в окрестности  $\vec{x}_{opt}$  и либо корректируется модель  $\vec{y} = \vec{\varphi}(\vec{x})$ , либо осуществляется поиск оптимального состава шагами непосредственно с затворением смеси, например, методом симплекс-планирования. Решение задачи (1) повторяется до тех пор, пока не будет найдена рецептура,

удовлетворяющая лабораторию. В случае несовместности ограничений в (1) изменяется качественный состав рецептуры, т.е. модифицируется вектор  $\vec{x}$ .

Анализ результатов лабораторных исследований, а также результатов контрольных затворений СМТС при выходном контроле каждой партии произведенной на предприятии продукции по заданной рецептуре, позволил установить, что зависимости показателей  $\tau_{\text{заг}}$ , ПВ,  $C_{20}$  растворов от рецептуры, в исследованных диапазонах изменения факторов, ее характеризующих, нелинейны. Поэтому для оценки комплексного влияния факторов, характеризующих качественно новую рецептуру, на реологические характеристики тампонажных растворов  $\tau_{\text{заг}}$ , ПВ и  $C_{20}$ , составляется и реализуется трёхфакторный планируемый эксперимент [4,5,6]. Программа эксперимента, представляющая из себя некомпозиционный план второго порядка, предусматривает 15 опытов (с тремя в центре плана) для трёх факторов на трёх уровнях. В рассматриваемом примере переменными параметрами изучаемой системы являлись: химическая активность MgO ( $x_1$ ), содержание химически активного тонкодисперсного магнезиального вяжущего ( $x_2$ ) и отношение Ж:Т ( $x_3$ ). Уровни и интервалы варьирования факторов выбраны на основе и с учётом априорной информации и представлены в таблице 1. При реализации планируемого эксперимента содержание остальных компонентов сухой магнезиальной тампонажной смеси было постоянным [7,8]. Химическую активность порошков определяли по времени загустевания ( $\tau_{\text{заг}}$ ) их растворов при температуре равной 20°C, полученных затворением этих порошков водным раствором хлористого магния плотностью 1280 кг/м<sup>3</sup>.

Таблица № 1

## Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Кодовое обозначение факторов	Интервал варьирования и уровни факторов в натуральной размерности			
		$\Delta\vec{z}$	$\vec{z}^0$	$\vec{z}_{\max}$	$\vec{z}_{\min}$
$\tau_{\text{заг MgO}}$ , МИН	$x_1$	22	73	95	51
Содержание $\text{MgO}_{\text{акт}}$ , %	$x_2$	10	10	20	0
Ж:Т	$x_3$	0,05	0,8	0,85	0,75

В результате обработки данных реализации плана эксперимента получены следующие уравнения регрессии:

$$y_1(x_1, x_2, x_3) = \tau_{\text{заг}} = 243 + 47 \cdot x_1 - 13,75 \cdot x_2 + 29,75 \cdot x_3 - 9,25 \cdot x_1 \cdot x_2 + 8,75 \cdot x_1 \cdot x_3 - 3,25 \cdot x_2 \cdot x_3 - 18,38 \cdot x_1^2 - 2,88 \cdot x_2^2 - 7,38 \cdot x_3^2; \quad (2)$$

$$y_2(x_1, x_2, x_3) = \text{ПВ} = 194,2 - 51,85 \cdot x_1 - 90,25 \cdot x_2 - 91,55 \cdot x_3 + 33,48 \cdot x_1 \cdot x_2 + 22,08 \cdot x_1 \cdot x_3 + 42,89 \cdot x_2 \cdot x_3 + 51,86 \cdot x_1^2 + 51,86 \cdot x_2^2 + 13,61 \cdot x_3^2; \quad (3)$$

$$y_3(x_1, x_2, x_3) = C_{20} = 63 + 30,63 \cdot x_1 - 8,63 \cdot x_2 + 34 \cdot x_3 - 9,25 \cdot x_1 \cdot x_2 + 11 \cdot x_1 \cdot x_3 - 11,5 \cdot x_2 \cdot x_3 - 18,13 \cdot x_1^2 - 3,63 \cdot x_2^2 + 0,13 \cdot x_3^2. \quad (4)$$

Адекватность каждой из полученных моделей проверена и подтверждена по критерию Фишера при 5%-ном уровне значимости. Факторы в уравнениях (2) -(4) имеют кодированные в диапазоне [-1;+1] значения.

Поскольку в полученных уравнениях значимыми оказались не только линейные эффекты, но и большая часть квадратичных эффектов, а также эффектов взаимодействия, предположения о нелинейности зависимостей «характеристика тампонажного раствора – показатели рецептуры СМТС» подтверждается. Примеры типичного вида графиков полученных зависимостей представлены на рис. 1-3.

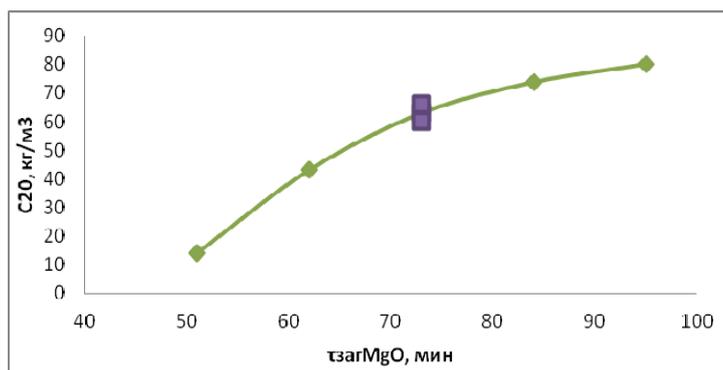


Рис. 1. –График зависимости седиментационной стабильности раствора магнезиального тампонажного материала ( $C_{20}$ ) от времени загустевания MgO ( $\tau_{zag} MgO$ ) при фиксированных значениях содержания  $MgO_{акт}$  и Ж:Т

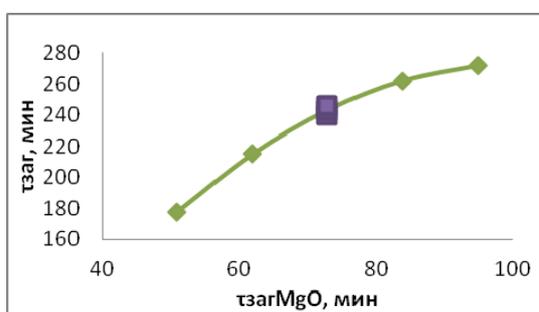


Рис. 2. – График зависимости времени загустевания раствора магнезиального тампонажного материала ( $\tau_{zag}$ ) от времени загустевания MgO ( $\tau_{zag} MgO$ ) при фиксированных значениях содержания  $MgO_{акт}$  и Ж:Т

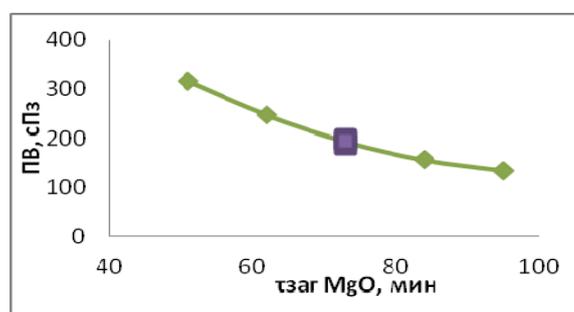


Рис. 3. – График зависимости пластической вязкости раствора магнезиального тампонажного материала (PB) от времени загустевания MgO ( $\tau_{zag} MgO$ ) при фиксированных значениях содержания  $MgO_{акт}$  и Ж:Т

От потребителя СМТС поступают требования к номинальным значениям характеристик  $\tau_{zag}^{zd} = y_1^{zd}$ ,  $PB^{zd} = y_2^{zd}$ ,  $C_{20}^{zd} = y_3^{zd}$  тампонажного раствора. В выражении (1) для обобщенной целевой функции задачи многокритериальной оптимизации [9] ее слагаемые являются частными целевыми функциям для каждой характеристики раствора СМТС и будут иметь вид:

$$r_1(x_1, x_2, x_3) = \left( \frac{y_1(x_1, x_2, x_3) - y_1^{30}}{y_1^{30}} \right)^2 = \frac{1}{(y_1^{30})^2} (y_1(x_1, x_2, x_3) - y_1^{30})^2; \quad (5)$$

$$r_2(x_1, x_2, x_3) = \left( \frac{y_2(x_1, x_2, x_3) - y_2^{30}}{y_2^{30}} \right)^2 = \frac{1}{(y_2^{30})^2} (y_2(x_1, x_2, x_3) - y_2^{30})^2; \quad (6)$$

$$r_3(x_1, x_2, x_3) = \left( \frac{y_3(x_1, x_2, x_3) - y_3^{30}}{y_3^{30}} \right)^2 = \frac{1}{(y_3^{30})^2} (y_3(x_1, x_2, x_3) - y_3^{30})^2. \quad (7)$$

На кодированные в диапазоне  $[-1; +1]$  в плане эксперимента переменные  $x_1, x_2, x_3$ , характеризующие качество компонентов и рецептуру СМТС, накладываются ограничения, обусловленные проверкой адекватности полученных регрессионных зависимостей (2)-(4) для диапазонов варьирования переменных в плане, которые имеют вид:

$$\begin{aligned} x_1 - 1 \leq 0; \quad x_2 - 1 \leq 0; \quad x_3 - 1 \leq 0; \\ -x_1 - 1 \leq 0; \quad -x_2 - 1 \leq 0; \quad -x_3 - 1 \leq 0. \end{aligned} \quad (8)$$

С учетом соотношений (5)-(8) и зависимостей (2)-(4) задачи получения маргинальных решений с частными целевыми функциями  $r_i$  формируются следующим образом:

$$\begin{aligned} \{r_i(x_1, x_2, x_3) = \frac{b_i}{(y_i^{30})^2} (y_i(x_1, x_2, x_3) - y_i^{30})^2 \rightarrow \\ \min_{x_1, x_2, x_3} | x_l - 1 \leq 0; -x_l - 1 \leq 0, l = \overline{1, 3} \} \rightarrow x_i^{opt}, i = \overline{1, 3}. \end{aligned} \quad (9)$$

Формулировка задачи многокритериальной оптимизации с обобщенной целевой функцией  $R$  будет следующей:

$$\begin{aligned} \{R(x_1, x_2, x_3) = \sum_{i=1}^3 \frac{b_i}{(y_i^{30})^2} (y_i(x_1, x_2, x_3) - y_i^{30})^2 \rightarrow \\ \min_{x_1, x_2, x_3} | x_l - 1 \leq 0; -x_l - 1 \leq 0, \sum_{i=1}^3 b_i = 1, l = \overline{1, 3} \} \rightarrow x_i^{opt}, i = \overline{1, 3}. \end{aligned} \quad (10)$$

Переход от значений кодированных переменных  $x_i$  в решениях задач (9)-(10) к значениям в натуральных размерностях факторов  $Z_i$ , являющихся показателями качества компонентов СМТС, осуществляется по формуле:

$$z_i^{opt} = \frac{1}{2}(z_{i\min} + z_{i\max}) + \frac{1}{2}(z_{i\max} - z_{i\min})x_i^{opt}, i = \overline{1,3}, \quad (11)$$

где  $z_{i\min}$ ,  $z_{i\max}$  - верхний и нижний уровни варьирования факторов при реализации плана эксперимента.

Вычисление значений характеристик раствора СМТС с найденной оптимальной рецептурой проводится по уравнениям (2)-(4).

Пусть в заказе на партию СМТС заданы следующие значения реологических характеристик раствора:  $y_1^{3d} = 287$  мин;  $y_2^{3d} = 290$  сПз;  $y_3^{3d} = 98$  кг/м<sup>3</sup>. Значения в натуральных размерностях уровней варьирования факторов в реализации плана следующие:  $z_{1\min} = 51$  мин;  $z_{1\max} = 95$  мин;  $z_{2\min} = 0\%$ ;  $z_{2\max} = 20\%$ ;  $z_{3\min} = 0,75$ ;  $z_{3\max} = 0,85$ . Кодирование факторов осуществляется по формуле:

$$x_i = \frac{2z_i - z_{i\max} - z_{i\min}}{z_{i\max} - z_{i\min}}.$$

При построении обобщенной целевой функции (10) объединение частных целевых функций (критериев), соответствующих трем характеристикам качества раствора СМТС, осуществляется на основе аддитивного преобразования  $\sum_{i=1}^3 b_i r_i(x_1, x_2, x_3)$ , в котором значения коэффициентов  $b_i$  отражают важность вклада критерия  $z_i$  в общую эффективность (полезность) тампонажных свойств раствора СМТС при применении ее на скважине. Определение значений  $b_i$  произведено по результатам опроса группы экспертов (специалистов) с последующей их обработкой по методике, описанной в работе [10].

Для рассматриваемого примера по результатам оценки согласованности мнений экспертов все три критерия могут быть признаны равноценными со значениями весовых коэффициентов  $b_i = 1/3$ ,  $\forall i = \overline{1,3}$ .

Решение задач (9) и (10) осуществлено в пакете программ компьютерной математики Matlab.

Получены маргинальные решения, соответствующие частным целевым функциям (5)-(7), представленные в таблице 2.

Таблица № 2

## Маргинальные решения задач (9)

Частная целевая функция	Оптимальные значения показателей качества рецептуры					
	Кодированные значения			Значения натуральной размерности		
	$x_{1m}^{opt}$	$x_{2m}^{opt}$	$x_{3m}^{opt}$	$z_{1m}^{opt}$	$z_{2m}^{opt}$	$z_{3m}^{opt}$
Для $\tau_{заг} \rightarrow r_1(\vec{x})$ ,	0.799	-0.9992	-0.0012	90,58	0,008	0,79
Для $ПВ \rightarrow r_2(\vec{x})$ ,	1	1	-1	95	20	0,75
Для $C_{20} \rightarrow r_3(\vec{x})$	0.7751	-0.5886	0.2853	90,05	4,11	0,823

Решение задачи (10) с обобщенной целевой функцией дало следующие оптимальные значения кодированных переменных:  $x_1^{opt}=0,8139$ ;  $x_2^{opt}=-0,993$ ;  $x_3^{opt}=0,20691$ .

В полученных как маргинальных решениях, так и в решении задачи с обобщенной целевой функцией для перехода к натуральной размерности показателей качества компонентов рецептуры  $z_1^{opt}$ ,  $z_2^{opt}$ ,  $z_3^{opt}$  следует воспользоваться формулой (11).

В результате для обобщенной целевой функции получим  $z_1^{opt} = 87,31$  мин.,  $z_2^{opt} = 0,07\%$ ,  $z_3^{opt} = 0,82$ .

Для верификации полученного для обобщенного критерия решения, подставив в модели связи «характеристика тампонажного раствора – показатели рецептуры СМТС» (2)-(4) найденное оптимальное решение  $x_1^{opt}$ ,  $x_2^{opt}$ ,  $x_3^{opt}$ , получили следующие расчетные характеристики раствора из

СМТС:  $\tau_{\text{заг}} = 276,6$  мин; ПВ = 295,35 сПз;  $C_{20} = 99,6$  кг/м<sup>3</sup>. Отклонения от заданных значений показателей качества сухой тампонажной смеси составляют, соответственно, 3,6%, 1,84% и 1,63%.

Таким образом, рассмотренный метод и результаты решения примера свидетельствуют о возможности его применения при управлении рецептурой в гибком производстве СМТС с получением расчетных значений показателей её качества и компонентного состава, обеспечивающих расчетные характеристики тампонажного раствора, близкие к значениям, установленным требованиями заказа на производство партии СМТС. Применение метода позволяет повысить оперативность разработки СМТС качественно нового состава.

### Литература

1. Козлов А.С., Пастухов А.М. Тампонажный материал для цементирования обсадных колонн в интервалах многолетнемерзлых пород. // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. № 10, 2014. С. 42-48
2. Well Cementing, Volume 28 1st Edition. / Nelson E.B. – Elsevier Science, 1990. – 1515 p.
3. Щербань Е.М., Гольцов Ю.И., Ткаченко Г.А., Стельмах С.А. Рецептурно-технологические факторы и их роль в формировании свойств пенобетонов, полученных из смесей, обработанных переменным электрическим полем // Инженерный вестник Дона, 2012, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/905.
4. Анисимова А.В., Ваталева 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

5. Mathematical Modeling/Mark Meerschaert – Academic Press, 2013 – 384 p.
6. Спиридонов А.А., Васильев Н.Г. Планирование эксперимента при исследовании и оптимизации технологических процессов. – Учебное пособие. Свердловск: изд. УПИМ им. СМ. Кирова, 1975 – 184с.
7. Ваталева М.В., Шумихин А.Г. Управление разработкой рецептур тампонажных смесей для цементирования нефтяных и газовых скважин на основе применения метода прецедентов и экспертных оценок. // Химия. Экология. Урбанистика. 2017. Т. 1. С. 462-465.
8. Ваталева М.В., Шумихин А.Г. Планирование исследований при разработке рецептур и технологий гибкого производства сухих тампонажных магниезальных смесей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2014. № 1. С. 7-18.
9. Шуйский А.И., Халюшев А.К., Стельмах С.А., Щербань Е.М., Холодняк М.Г. Оптимизация состава неавтоклавного газобетона с доменным молотым гранулированным шлаком по критериям предела прочности при сжатии и средней плотности // Инженерный вестник Дона, 2017, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4309](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4309).
10. Никифоров А.Д. Управление качеством: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Дрофа, 2004. – 720 с.

### References

1. Kozlov A.S., Pastuhov A.M. Vestnik PNIPU. Geologija. Neftegazovoe i gornoe delo. № 10, 2014. pp. 42-48.
  2. Well Cementing, Volume 28 1st Edition. Nelson E.B. Elsevier Science, 1990. 1515 p.
-



3. Shherban' E.M., Gol'cov Ju.I., Tkachenko G.A., Stel'mah S.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №3 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/905](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/905).
4. Anisimova A.V., Vataleva M.V., Kozlov A.S., Skorogonov M.S. Mezhdunarodnyj Nauchnyj Institut "Educatio" 2014. №5. pp. 130-133
5. Mathematical Modeling. Mark Meerschaert. Academic Press, 2013. 384 p.
6. Spiridonov A.A., Vasil'ev N.G. Planirovanie jeksperimenta pri issledovanii i optimizacii tehnologicheskikh processov [Planning an experiment in the study and optimization of technological processes]. Uchebnoe posobie. Sverdlovsk: izd. UPM im. SM. Kirova, 1975. 184 p.
7. Vataleva M.V., Shumihin A.G. Himija. Jekologija. Urbanistika. 2017. V. 1. pp. 462-465.
8. Vataleva M.V., Shumihin A.G. Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Himicheskaja tehnologija i bioteknologija. 2014. № 1. pp. 7-18.
9. Shujskij A.I., Haljushev A.K., Stel'mah S.A., Shherban' E.M., Holodnjak M.G. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №3 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4309](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4309).
10. Nikiforov A.D. Upravlenie kachestvom: Ucheb. Posobie dlja vuzov [Quality Management: Textbook. Allowance for universities]. M.: Drofa, 2004. 720 p.