

УДК 622.276

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ГЕЛЕОБРАЗОВАНИЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ НЕФЕЛИНА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Ленченкова Л.Е.¹, Ленченков Н.С.^{2*}, Акчурин Х.И.¹

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

² Санкт-Петербургский государственный горный институт, г. Санкт-Петербург

*e-mail: nekit555@mail.ru

Аннотация. *Статья посвящена изучению кинетики гелеобразования состава на основе нефелина и соляной кислоты, используемого для проведения водоизоляционных работ в нефтяных скважинах. Лабораторные эксперименты и математическое моделирование показали, что между временем гелеобразования состава и основными влияющими факторами существуют нелинейные зависимости, которые хорошо описываются с помощью метода нейронных сетей. Таким образом, обосновано применение метода нейронных сетей при планировании водоизоляционных работ в промышленных условиях.*

Ключевые слова: *кинетика гелеобразования, метод нейронных сетей, водоизоляционные технологии*

Текущий период нефтедобычи в стране характеризуется ухудшением структуры запасов нефтяных месторождений, вовлечением в разработку низкопроницаемых и высоконеоднородных коллекторов, залежей высоковязких нефтей и переходом основных эксплуатационных объектов в позднюю стадию разработки с высокой обводненностью добываемой продукции и низкими дебитами скважин. В этих условиях особую значимость приобретает внедрение эффективных водоизоляционных технологий, позволяющих снизить обводненность продукции добывающих скважин.

Одним из наиболее перспективных методов ограничения водопритокков является применение технологий на основе гелеобразующих составов. Образование геля непосредственно в пластовых условиях позволяет создавать зоны (барьеры и экраны) с повышенным фильтрационным сопротивлением и исключить прорыв воды по высокопроницаемым пропласткам к забоям добывающих скважин [1, 2, 3].

Одним из основных требований применения гелеобразующих составов в промышленных условиях для водоизоляционных технологий является возможность регулирования времени гелеобразования. При этом необходимо разработать методы и алгоритмы, которые позволят описать кинетику гелеобразования в различных геолого-физических условиях. Неточная оценка кинетики гелеобразования состава в промышленных условиях может привести к неправильному подбору ис-

ходных концентраций компонентов в составе и, как следствие, резкому повышению сил трения в процессе закачки состава в скважину.

В работе на основе физико-химических лабораторных экспериментов по оценке кинетики гелеобразования неорганического состава, состоящего из нефелина и соляной кислоты, предложена методика прогнозирования времени гелеобразования с использованием математических моделей.

Результаты лабораторных экспериментов по оценке кинетики гелеобразования состава на основе нефелина и соляной кислоты

Установлено [1, 2], что минеральные кислоты и нефелин, представляющий собой алюмосиликат натрия и калия структуры Na(K)AlSiO_4 , в определенных условиях формируют гелеобразующие композиции с различной вязкостью и временем гелеобразования. Гелеобразующая композиция – это прозрачный, слегка желтоватый раствор исходной вязкостью 1,6-2,5 мПа·с, который превращается в гелеобразную массу вязкостью до 20-200 мПа·с. Время застывания геля составляет 5-25 ч и более в зависимости от состава композиции.

Основным преимуществом нефелина является дешевизна, наличие достаточно больших ресурсов для крупномасштабного применения в сочетании с возможностью управления процессами гелеобразования в пористой среде. Указанный алюмосиликат относится к доступным, достаточно дешевым реагентам, легко растворяется в минеральных кислотах с образованием устойчивых гелей.

По внешнему виду нефелин представляет собой серый порошок. В состав концентрата входят: Al_2O_3 – 28 %; SiO_2 – 42,8 %; Na_2O – 12,1 %; CaO – 23 % и K_2O – 7,5 %.

Способность нефелина (далее – АС) к гелеобразованию определяется содержанием оксидов кремния и алюминия. При их растворении в минеральных кислотах образуются гели, состоящие из аморфных положительно заряженных оксидов алюминия и отрицательно заряженных поликремниевых кислот.

В ходе лабораторных экспериментов по оценке кинетики гелеобразования были установлены зависимости времени гелеобразования состава от концентрации исходных компонентов, минерализации пластовой воды и температуры окружающей среды (рис. 1-2, табл. 1).

На рис. 1 представлена зависимость времени гелеобразования от концентрации исходных компонентов в составе при постоянной температуре $-30\text{ }^\circ\text{C}$. Увеличение концентрации АС и соляной кислоты (далее – HCl) в составе приводит к уменьшению времени гелеобразования. При этом в случае композиций, приготовленных на растворах HCl низкой концентрации (8,6 % масс.), наблюдается более резкое снижение времени гелеобразования, чем для композиции с HCl (12, 10 % масс.). При увеличении температуры (табл. 1) происходит также снижение времени гелеобразования. Полученные закономерности объясняются тем, АС и HCl яв-

ляются катализаторами реакций, приводящих к росту мицелл золя после с последующим образованием трехмерной структуры геля.

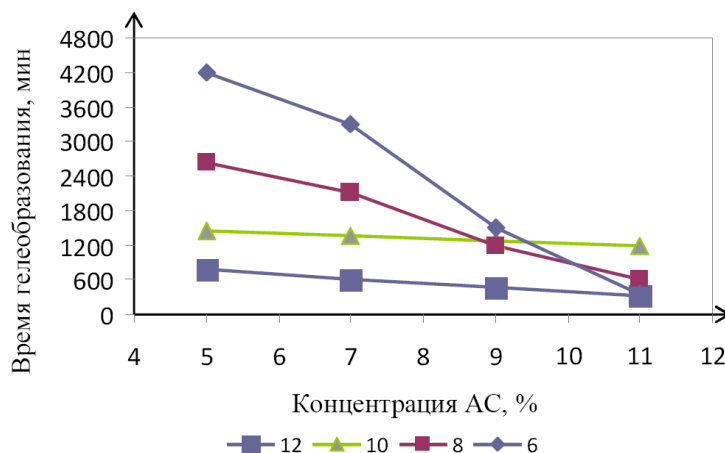


Рис. 1. Зависимость времени гелеобразования от концентрации исходных компонентов в составе при температуре исследований 30 °С

Табл. 1. Зависимость времени гелеобразования от концентрации исходных компонентов в составе при температурах исследования 50 °С и 82 °С

Содержание HCl, %	Температура, °С	Время гелеобразования, мин			
		Содержание алюмосиликата в композиции, %			
		5	7	9	11
12	50	234	234	230,88	221,52
10	50	358,8	343,2	344,76	343,2
8	50	681,72	680,72	468	240,24
6	50	936	780	522,6	187,2
12	82	90	90	88,8	85,2
10	82	138	132	132,6	132
8	82	261,6	262,2	180	92,4
6	82	360	300	201	72

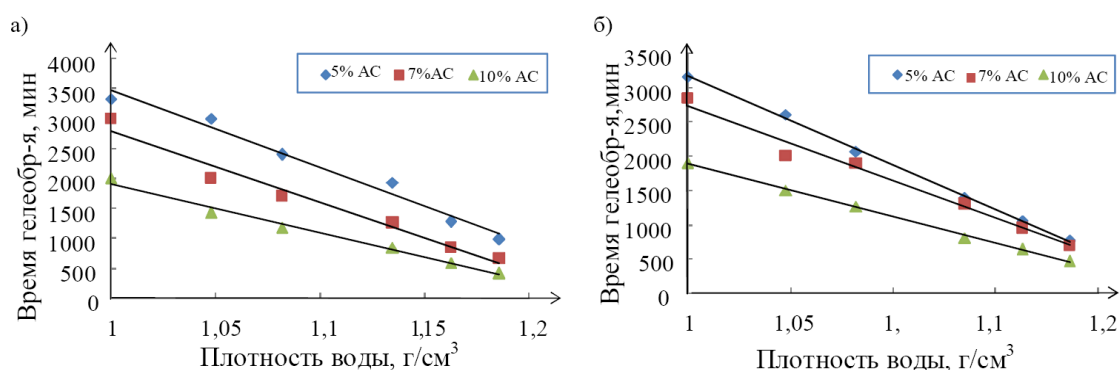


Рис. 2. Зависимость времени гелеобразования состава от плотности минерализованной воды (эксперименты проводились при температуре 22 °С): а) при содержании в составе 8% HCl; б) при содержании в составе 10% HCl

Эксперимент по исследованию влияния минерализованной воды на кинетику гелеобразования выполнялся на дистиллированной воде с растворенными в ней солями. Состав минерализованных вод представлен, в основном, солями натрия, калия, кальция и в незначительной степени солями магния. Присутствие катионов Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} в кислых растворах рассматриваемого реагента АС, приготовленного на минерализованной воде, вызывает уменьшение времени гелеобразования (степень изменения времени гелеобразования зависит от температуры и минерализации воды) по сравнению с растворами, приготовленными только на дистиллированной воде. Это может быть объяснено коагулирующим действием катионов Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , присутствующих в воде, и уменьшением агрегативной устойчивости коллоидного раствора, что приводит к возрастанию скорости структурирования частиц золя.

Концентрация кислоты, а также нефелина в промышленных условиях должны подбираться таким образом, чтобы время гелеобразования было больше, чем время между смешиванием композиции в агрегате и прохождением этой композиции до призабойной зоны пласта.

Математическое моделирование кинетики гелеобразования состава на основе нефелина и соляной кислоты

Для прогнозирования времени гелеобразования в промышленных условиях необходимо учитывать влияние указанных факторов. Для этого были построены две математические модели и определены погрешности расчета времени гелеобразования.

Модель № 1

Полученные экспериментальные данные (рис. 1-2, табл. 1) показывают нелинейную зависимость между временем гелеобразования и влияющими факторами. Для математического описания полученных закономерностей в работе [1] предлагается применение уравнения Гульдберга-Вааге и Аррениуса в виде (1). Однако, данная модель гелеобразования не учитывает влияние минерализации пластовой воды.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = z_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) C_1^1 C_2^2, \quad (1)$$

где C – концентрация образовавшегося геля из раствора, %; z_0 – предэкспоненциальный множитель, мин^{-1} ; R – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К; E_a – энергия активации гелеобразования, кДж/моль; T – температура, К; C_1 – концентрация соляной кислоты, далее HCl, д.ед; C_2 – концентрация АС, д.ед., t – время гелеобразования, мин.

В результате численного решения системы нелинейных уравнений были найдены параметры уравнения (1): $n = 1,28$; $l = 2,32$; $z_0 = 1,68 \text{ мин}^{-1}$. При этом энергия активации гелеобразования не зависит от концентрации исходных реагентов и равна 38 кДж/моль.

Для экспериментальной зависимости, представленной на рис. 2, был выполнен регрессионный анализ с помощью метода наименьших квадратов, который позволил получить однофакторную зависимость вида (2). Среднеквадратичное отклонение составило 0,98:

$$\frac{t_{\text{минер}}}{t_{\text{пресн}}} = -3,95 \cdot z_0 \cdot \frac{\rho_{\text{минер}}}{\rho_{\text{пресн}}} + 4,93, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{минер}}$ – плотность минерализованной воды, г/см³; $\rho_{\text{пресн}}$ – плотность пресной воды, г/см³; $t_{\text{минер}}$ – время гелеобразования состава, приготовленного на воде с плотностью $\rho_{\text{минер}}$, мин; $t_{\text{пресн}}$ – время гелеобразования состава, приготовленного на пресной воде с плотностью $\rho_{\text{пресн}}$, мин.

Уравнение (2) позволяет оценивать снижение времени гелеобразования неорганического состава на основе нефелина при влиянии минерализации пластовой воды, что является необходимым при планировании технологии водоизоляционных работ в промышленных условиях.

Выполненные расчеты по модели №1 показали высокую относительную погрешность определения времени гелеобразования (табл. 2). При этом основной вклад в погрешность расчетов вносит уравнение (1), плохо описывающее особенности кинетики гелеобразования. Для снижения погрешности расчетов предлагается создать модель на основе нейронной сети (модель №2), которая является мощным инструментом имитации процессов и явлений, позволяющим воспроизводить чрезвычайно сложные зависимости [4].

Модель № 2

Для решения поставленной задачи была использована нейронная сеть, состоящая из двух слоев (рис. 4). Сети с такой архитектурой могут воспроизводить весьма сложные нелинейные зависимости между входом и выходом сети. В слоях были использованы дифференцируемые функции активации: в первом слое – гиперболическая тангенциальная функция активации ($A = \text{tansig}(N)$); во втором – линейная функция ($A = \text{purelin}(N)$). Обучение сети выполнялось на основе алгоритма Левенберга-Марквардта, который обеспечивает максимальное быстродействие. На вход сети подавалось четыре параметра (минерализация пластовой воды, концентрации в композиции АС и HCl, а также пластовая температура).

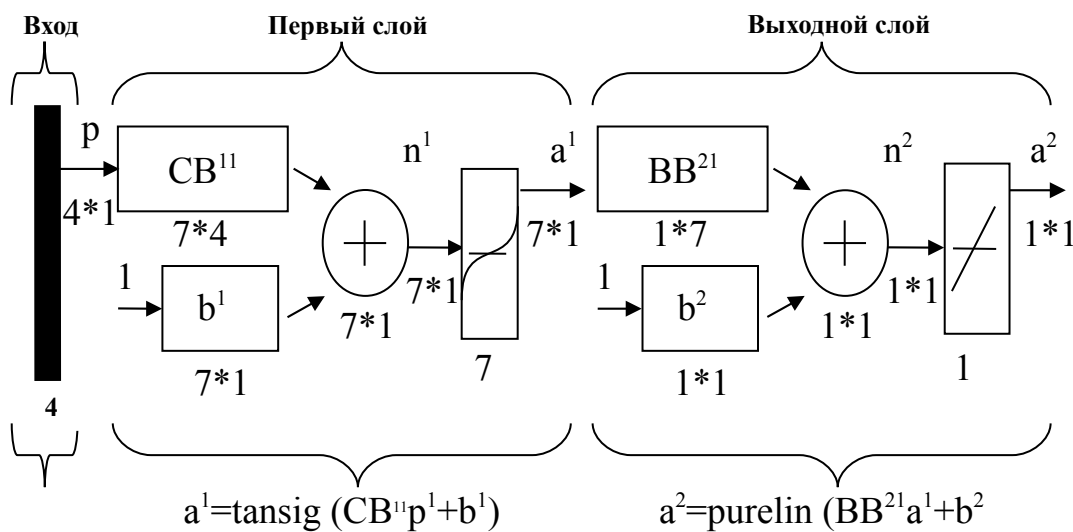


Рис. 4. Схема двухслойной нейронной сети:

CB – матрица весов размера $S \times R$ в скрытом слое; BB – матрица весов размера $S \times R$ в выходном слое; S – количество нейронов в слое; R – количество входов в слой; p^1 – вектор входа в скрытый слой; n^i – вход функции активации в i -м слое; a^i – выход i -го слоя; b^i – смещение i -го слоя

Обучающая выборка нейронной сети состояла из 170 значений времени гелеобразования, полученных экспериментально для различной комбинации основных влияющих факторов. Контрольная выборка была представлена 13 значениями. Необходимое число нейронов в первом слое сети оценивалось по формуле (3), представленной в работе [5]:

$$N = \sqrt{\frac{P}{n}}, \quad (3)$$

где N – количество нейронов в первом слое, ед.; P – количество определений в обучающей выборке, ед.; n – количество входов, ед.

В нашем случае при $P = 170$ ед. и $n = 4$ ед., $N \approx 7$ ед. Таким образом, в первом слое нейронной сети принимаем 7 нейронов.

Представленная на рис. 4 сеть в каждом слое имеет свою матрицу весов B , вектор смещения b и вектор выхода a . Чтобы различать весовые матрицы, векторы выхода и т.д., для каждого из этих слоев введен номер слоя как верхний индекс.

Обозначим весовую матрицу, связанную с входами, через BB^{11} , верхние индексы которой указывают, что источником входов является первый слой (второй индекс) и адресатом является также первый слой (первый индекс). Элементы этого слоя, такие, как смещение b^1 вход функции активации n^1 и выход слоя a^1 , имеют верхний индекс 1, чтобы обозначить, что они связаны с первым слоем.

Проведенный анализ реакции сети показал высокую корреляцию между экспериментальным временем гелеобразования и временем гелеобразования, полученным по нейронной сети (рис. 5). Это свидетельствует о том, что нейронная

сеть хорошо описывает кинетику гелеобразования состава на основе нефелина и соляной кислоты.

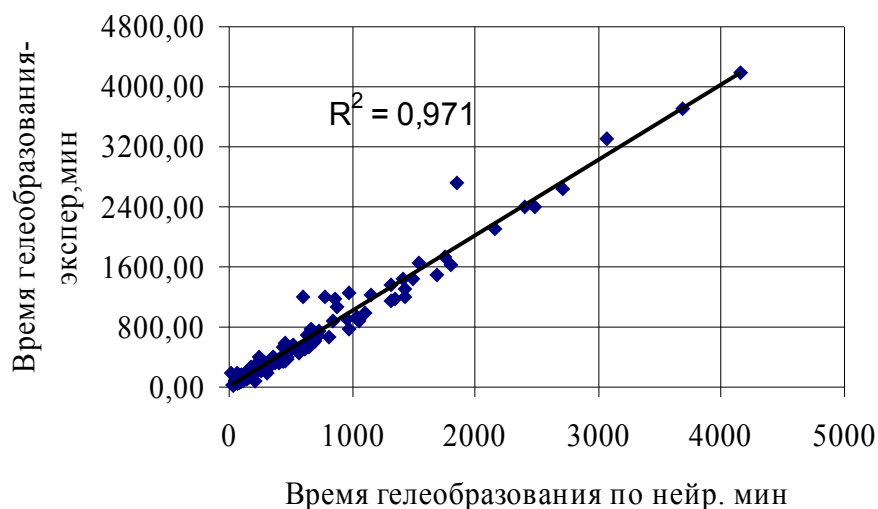


Рис. 5. Реакция нейронной сети

Таблица 2. Результаты оценки относительной погрешности для различных моделей описания времени гелеобразования неорганического гелеобразующего состава на основе нефелина

№ п/п	Концентрации исходных компонентов в исследуемой композиции (C _{АС} /C _{НCl} /Temp/Min)	Относит. погрешность по модели № 1, %	Относит. погрешность по модели № 2, %
1	2	3	4
1	5/8/30/1	18,49	2,73
2	7/8/30/1	33,44	3,11
3	11/8/30/1	30,47	12,45
4	5/8/82/1	9,82	20,49
5	11/8/82/1	7,12	5,49
6	8/6/50/1	36,80	23,00
7	11/10/30/1	61,17	49,78
8	5/10/82/1	1,76	3,61
9	7/10/82/1	30,90	9,55
10	9/10/82/1	50,16	17,87
11	8/6/30/1,08	4,31	1,89
12	10/8/30/1,14	0,76	11,32
13	8/10/30/1,14	42,45	20,13
14	10/12/30/1,16	21,30	8,40
15	8/12/30/1,05	12,19	9,20
Ср. значение		24	13

Примечание: C_{АС} – концентрация алюмосиликата в композиции, % по масс.; C_{НCl} – концентрация соляной кислоты в композиции, % по масс.; Temp – пластовая температура, °С; Min – минерализация пластовой воды, г/л

В результате проведенных расчетов по оценке погрешности описания кинетики гелеобразования по двум представленным моделям видно, что наибольшей погрешностью обладает модель № 1, включающая уравнение Гульдберга-Вааге - Аррениуса (1) и уравнение линейной регрессии в виде (2) – 24 %. Наименьшей погрешностью характеризуется модель № 2, представленная нейронной сетью – 13 %.

Таким образом, модель № 2, построенная на основе нейронной сети может быть рекомендована для практического применения в промышленных условиях для оценки времени гелеобразования неорганических гелеобразующих составов на основе нефелина.

Литература

1. Ленченкова Л.Е. Повышение нефтеотдачи пластов физико-химическими методами. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1998. 394 с.
2. Бабалян Г.А. Физико-химические процессы в добыче нефти. М.: Недра, 1974. 200 с.
3. Айлер Р. Химия кремнезема. М.: Мир, 1982. 810 с.
4. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. Matlab 6 / Под общ. редакцией В.Г. Потемкина. М.: ДИАЛОГ - МИФИ, 2002. 496 с.
5. Ежов А.А., Шумский С.А., Нейрокомпьютинг и его применение в экономике и бизнесе. Учебное пособие. Москва: МИФИ, 1998. 224 с.

**FORECASTING OF GELLING FORMATION TIME
FOR NON-ORGANIC COMPOUNDS ON NEPHELINE BASE
WITH THE HELP OF NEURAL NETWORKS METHOD**

L.E. Lenchenkova¹, N.S. Lenchenkov^{2*}, Kh.I. Akchurin¹

¹ Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

² Saint-Petersburg State Mining University, Saint Petersburg, Russia

*e-mail: nekit555@mail.ru

Abstract. *This article is dedicated to gelling kinetics of compound on nepheline and hydrochloric acid base which is used for carrying out water control operations in oil wells. Laboratory experiments and mathematical simulation of chemical process have shown that there are non-linear relationship between both gelling time and influencing factors. This relationship are well described by the neural networks method. Therefore, it is reasonable to apply neural networks method for planning of water control works in conditions of oil fields.*

Keywords: *gelling kinetics, neural networks method, water control technologies*

References

1. Lenchenkova L.E. Povyslenie nefteotdachi plastov fiziko-khimicheskimi metodami (Improved oil recovery by physicochemical methods). Moscow: "Nedra-Biznessentr", 1998. 394 p.
2. Babalyan G.A. Fiziko-khimicheskie protsessy v dobyche nefti (Physical and chemical processes in oil production). Moscow: Nedra, 1974. 200 p.
3. Iler R. Khimiya kremnezema (Chemistry of silica). Moscow: Mir, 1982. 810 p.
4. Medvedev V.S., Potemkin V.G. Neironnye seti. Matlab 6 (Neural networks. Matlab 6). Moscow: DIALOG-MIFI, 2002. 496 p.
5. Ezhov A.A., Shumskii S.A., Neirokomp'yuting i ego primeneniye v ekonomike i biznese. Uchbnoe posobie (Neurocomputing and its application in economics and business. Textbook.). Moscow: MIFI, 1998. 224 p.