

УДК 622.33:550.372

**Д.И. Рудковский, С.М. Простов, А.В. Покатилов**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГЕЛЕОБРАЗОВАНИЯ СИЛИКАТНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ ОДНОСТАДИЙНОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ЗАКРЕПЛЕНИЯ**

*Приведены результаты лабораторных исследований процессов гелеобразования силикатных растворов, изучено влияние температуры на изменение времени гелеобразования силикатных растворов, установлены закономерности и получены эмпирические зависимости необходимые для обоснования оптимальных режимов технологии однорастворного ЭХЗ неустойчивых грунтов.*

*Ключевые слова: глинистые грунты, электрохимическое закрепление, укрепление горных пород, гелеобразование силикатных растворов.*

**Семинар № 2**

**D.I. Rudkovskiy, S.M. Prostov,  
A.V. Pokatilov**

### **THE STUDY ON GELLATION OF SILICATE MUD FOR THE ONE STAGED ELECTRICAL AND CHEMICAL CONSOLIDATION**

*The results on the laboratory studies on gellation of silicate mud are given; the effects of the temperature on the time of gellation of silicate mud is studied; the principles and empirical dependences are defined. The empirical dependences are needed for justifying the optimal regimes for the technology of electrochemical single-bath protection of unstable ground.*

*Key words: clayey soil, electric and chemical fixation, rock reinforcement, gellation of silicate mud.*

**Д**ля управления свойствами глинистых грунтов с коэффициентом фильтрации менее  $10^{-6}$  м/с применяют электрохимическое закрепление (ЭХЗ), основанное на комбинированном применении электрического тока и химических растворов. Особенностью метода ЭХЗ является необратимое повышение

механической прочности и водонепроницаемости грунта в результате его обработки постоянным электрическим током.

Для укрепления горных пород с повышенным содержанием глинистых частиц перспективно применять силикатные растворы, рецептуры которых содержат кремнефтористоводородные, силикатно-органические и лигносульфанохромовые компоненты. Силикатные растворы обладают большой проникающей способностью, которая обусловлена их низкой вязкостью, близкой к вязкости воды. Поэтому они применяются для закрепления грунтов с широким диапазоном фильтрационных свойств.

В работе [1] проводилось исследование влияния ЭХЗ на свойства глинистых грунтов. Использовался двухрастворный метод, в качестве укрепляющего раствора применялось "жидкое стекло"  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  и хлористый кальций  $\text{CaCl}_2$ . В результате опытов было доказано, что с ростом концентрации "жидкого стекла" в диапазоне

Таблица 1

**Растворы на основе силиката натрия**

Состав раствора	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Объемное соотношение компонентов	Характеристики растворов		Прочность укрепленного грунта, МПа
			Время гелеобразования T, ч	Вязкость $\mu \cdot 10^{-3}$ Па·с	
Сернокислый аммоний	1,06	1,0	1,0–16,0	2,0–3,0	0,5–0,4
Силикат натрия	1,19	3,9–4,2			
Силикат натрия	1,12	1,0	4,0–10,0	2,0–3,0	0,2–0,3
Фосфорная кислота	1,025	3,0–4,0			
Серная кислота	1,06	2,0–2,1			
Силикат натрия	1,15	3,5	0,5–2,0	< 2,2	0,15–0,2
Алюминит натрия	1,05	1,0			
Силикат натрия	1,04	1,0	0,5–15,0	1,2–7,5	0,2
Кремнефтористоводородная кислота	1,037	0,12			
Силикат натрия	1,3	10,0	0,1–1,0	3,0–5,0	3,0–4,0
Кремнефтористоводородная кислота	1,08–1,1	2,5–3,0			

плотностей  $\gamma = 1,02\text{--}1,10$  г/см<sup>3</sup> происходит уменьшение размера зоны электрохимического насыщения, а также получен оптимальный диапазон концентраций раствора  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 - \gamma = 1,04\text{--}1,08$  г/см<sup>3</sup>.

В связи с тем, что трудно добиться равномерного насыщения грунта крепителем и отвердителем, а, следовательно, и равномерного закрепления при двухрастворном методе, целесообразно использовать однорастворные рецептуры, обеспечивающие более равномерную обработку грунтов и повышающие их устойчивость к воздействию агрессивных сред.

На основе силиката натрия разработано большое число рецептур инъекционных растворов [2] (табл. 1).

Рецептура, использующая кремнефтористоводородную кислоту  $\text{H}_2\text{SiF}_6$ , обеспечивает простоту контроля времени гелеобразования и применяется для повышения прочностных характеристик пород. Данная кислота получается при растворении  $\text{SiF}_4$  в воде или фтористоводородной

кислоте. Она является очень сильной, нетоксичной и ее применение наиболее экономично по сравнению с другими кислотами.

Контролируемыми параметрами при ЭХЗ являются радиус проникновения раствора, прочность закрепленного грунта, коэффициент фильтрации и ряд других физических параметров. На радиус проникновения большое влияние оказывает вязкость раствора: чем вязкость ниже, тем более полным будет проникновение в грунт. Конечная прочность массива зависит как от концентрации поступающего раствора, так и от продолжительности обработки электричеством. Таким образом, необходимо использовать раствор со временем гелеобразования, равным или близким продолжительности времени электрообработки грунта.

Данные, приведенные в табл. 1, являются недостаточно точными и имеют широкие диапазоны времени гелеобразования. Для практического использования этих данных необхо-

Таблица 2

**Параметры статистической зависимости (1)**

Плотность кислоты $\rho_k, \text{г/см}^3$	Плотность "жидкого стекла" $\rho_c, \text{г/см}^3$	Параметры уравнения				
		$T_0, \text{ч}$	$K_1$	$R$	$t$	$\delta, \text{ч}$
1,03	1,04	32,39	31,49	0,99	10,88	1,37
	1,06	93,92	50,46	0,95	4,26	11,40
	1,08	102,52	33,36	0,98	6,74	6,72
1,037	1,04	35,37	93,21	0,99	8,15	3,45
	1,06	63,45	111,10	0,98	6,85	7,94
	1,08	80,77	74,16	1,00	1000	2,29
1,045	1,04	4,76	112,78	0,98	6,49	0,49
	1,06	14,10	108,45	0,93	3,51	4,13
	1,08	81,37	84,08	0,88	2,59	15,14
1,054	1,04	0,25	64,52	0,99	12,57	0,013
	1,06	1,48	64,31	1,00	1000	0,02
	1,08	5,46	98,77	0,99	12,10	0,34

дима проверка и подбор оптимального соотношения компонентов раствора. Ниже приведены результаты лабораторных исследований процессов гелеобразования силикатных растворов.

Для проведения опытов по определению раствора с оптимальной концентрацией компонентов использовались кремнефтористоводородная кислота с плотностью  $\rho_k = 1,439 \text{ г/см}^3$  и "жидкое стекло" с плотностью  $\rho_c = 1,465 \text{ г/см}^3$ . Плотность жидкостей определялась ареометрами общего назначения типа А1 с градуировкой по нижнему краю мениска. Для получения необходимой плотности применялась дистиллированная вода при комнатной температуре. Контроль плотностей осуществлялся после размешивания компонентов с водой и перед смешиванием раствора "жидкого стекла" с раствором кислоты.

В экспериментах использовались следующие плотности растворов:  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 - \rho_c = 1,04; 1,06; 1,08 \text{ г/см}^3$ ;  $\text{H}_2\text{SiF}_6 - \rho_k = 1,02; 1,03; 1,037; 1,045; 1,054 \text{ г/см}^3$ . Использовались три объемных отношения объемов кислоты и "жидкого стекла"  $V_k/V_c - 0,09; 0,10; 0,12$ .

Полученные экспериментальные зависимости в графической форме приведены на рис. 1.

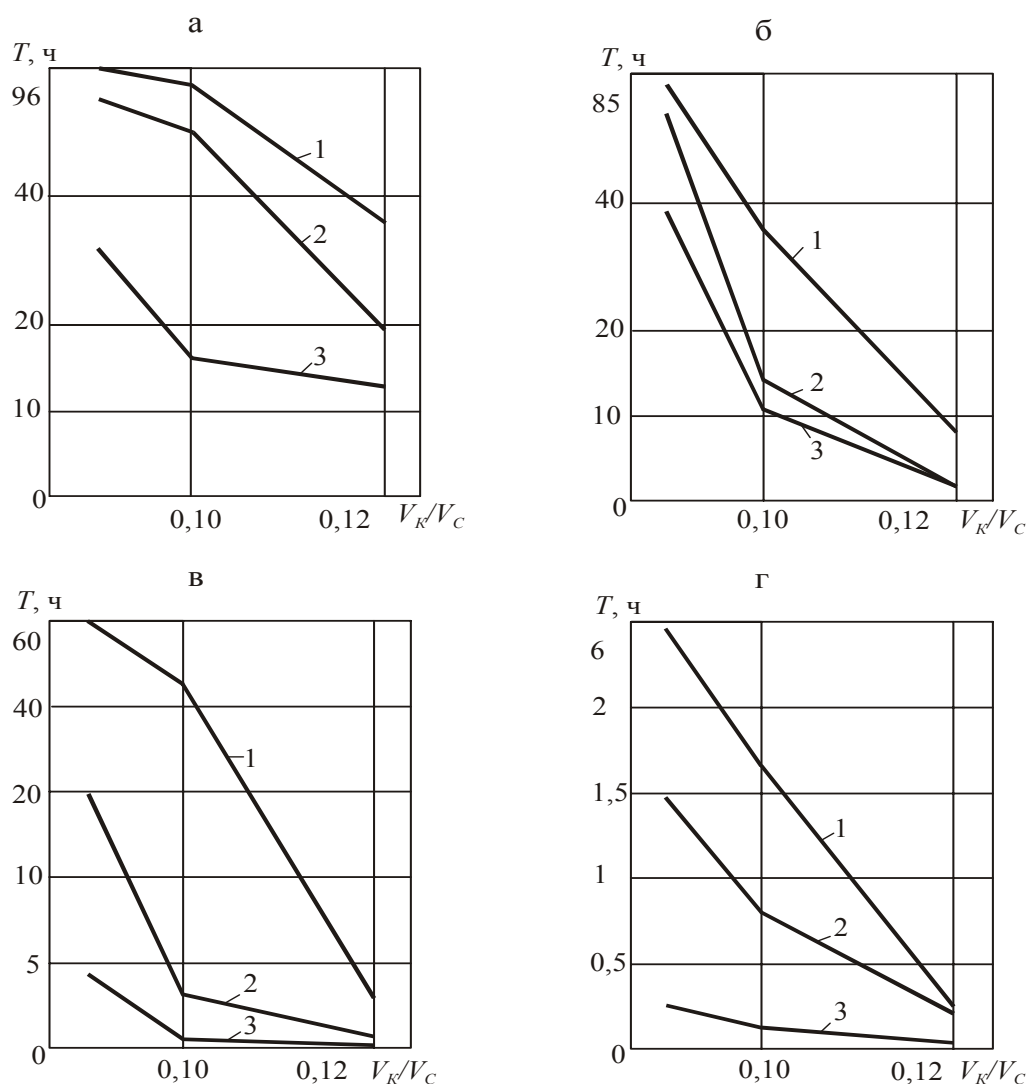
Из графиков следует, что время гелеобразования  $T$  зависит от объемного соотношения кислоты и "жидкого стекла"  $V_k/V_c$  и их концентрации. При  $\rho_k < 1,02 \text{ г/см}^3$  взаимодействия с  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  при плотностях  $\rho_c = 1,04; 1,06; 1,08 \text{ г/см}^3$  для приведенных соотношений  $V_k/V_c$  не зафиксировано. С увеличением относительного объемного отношения кислоты  $V_k/V_c$  время гелеобразования  $T$  снижается.

Для полученных графиков (рис. 1) в диапазоне  $V_k/V_c = 0,09 \text{ ч } 0,12$ , при помощи компьютерной программы статистической обработки получено корреляционное уравнение

$$T = T_0 \exp \left\{ -K_1 \left[ \frac{V_k}{V_c} - \left( \frac{V_k}{V_c} \right)_0 \right] \right\} \quad (1)$$

где  $T_0, K_1$  – постоянные;  $\left( \frac{V_k}{V_c} \right)_0$  –

начальное объемное отношение.

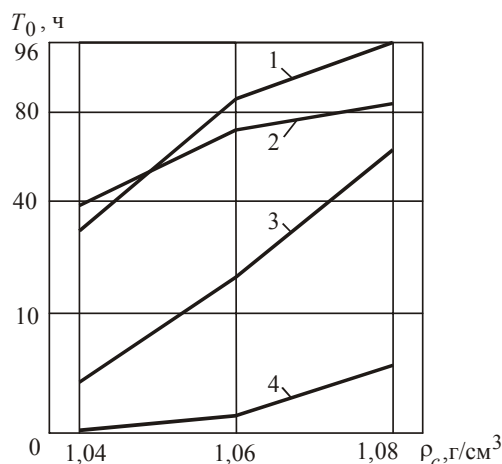


**Рис. 1.** Зависимость времени гелеобразования  $T$  от объемного соотношения компонентов раствора  $V_k/V_c$ , при плотности кислоты  $\rho_k = 1,030 \text{ г/см}^3$  (а);  $1,037 \text{ г/см}^3$  (б);  $1,045 \text{ г/см}^3$  (в);  $1,054 \text{ г/см}^3$  (г): 1 – плотность силиката натрия  $\rho_c = 1,08 \text{ г/см}^3$ ; 2 –  $1,06 \text{ г/см}^3$ ; 3 –  $1,04 \text{ г/см}^3$

Результаты статистической обработки экспериментальных данных приведены в табл. 2. ( $R$  – корреляционное отношение;  $t$  – критерий надежности оценки;  $\delta$  – остаточное среднеквадратичное отклонение).

Величина  $T_0$  монотонно изменяется при изменении плотностей компонентов  $\rho_k$  и  $\rho_c$  (рис. 2).

Из данных табл. 1 следует, что силикатно-кремнефтористоводородная рецептура обеспечивает достаточно высокую прочность укрепляемого грунта, при ЭХЗ за счет воздействия физических полей (электрического, теплового) конечная прочность дополнительно возрастет.



**Рис. 2. Зависимость начального времени гелеобразования  $T_0$  от плотностей  $\rho_k$  и  $\rho_c$  компонентов укрепляющего раствора:** 1 –  $\rho_k = 1,030$  г/см³; 2 –  $1,037$  г/см³; 3 –  $1,045$  г/см³; 4 –  $1,054$  г/см³

В реальных условиях при обработке массива возможно существенное влияние на интенсивность процессов гелеобразования дополнительных факторов. В частности, при протекании токов большой плотности при ЭХЗ происходит нагревание породы в приэлектродных областях. Кроме того, рассматриваемые физико-химические процессы зависят от качества применяемых компонентов, интенсивности их

взаимной диффузии, усиливающейся при вибрационном воздействии на массив, и других факторов.

Изучено влияние температуры на изменение времени гелеобразования силикатных растворов. Для этого пробы растворов выдерживались в специальных сосудах с горячей водой при температуре  $t^o = 25-50$  °С. Полученная экспериментальная зависимость описывается уравнением

$$\frac{T}{T_0} = \exp\left[-K_2(t^o - t_0^o)\right], \quad (2)$$

где  $K_2$  – постоянная;  $t_0^o$  – начальная температура, град.

Числовые значения параметров статистической зависимости (2) для указанного диапазона температур приведены ниже

$t_0^o$	$K_2$	$R$	$t$	$\delta$
25 °С	0,034 град <sup>-1</sup>	0,98	9,84	0,05 ч

Установленные закономерности и полученные эмпирические зависимости необходимы для обоснования оптимальных режимов технологии однорастворного ЭХЗ неустойчивых грунтов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Покатилов А.В.* Изучение влияния концентрации укрепляющего раствора на интенсивность процессов электрохимического закрепления грунтов / А. В. Покатилов, С. М. Простов // Строительство и эксплуатация угольных шахт и городских подземных сооружений: Материалы IV Россий-

ско-Китайского симпозиума. – Кемерово, 2006. – С. 238–244.

2. *Хямяляйнен В.А.* Физико-химическое укрепление пород при сооружении выработок / В. А. Хямяляйнен, В. И. Митраков, П.С. Сыркин – М.: Недра, 1996. – 352 с.

ГЛАВ

#### Коротко об авторах

*Рудковский Д.И.* – ассистент,  
*Простов С.М.* – доктор технических наук, профессор,  
*Покатилов А.В.* – кандидат технических наук, доцент,  
 кафедра "Технология строительного производства" ГУ КузГТУ, kuzstu@kuzstu.ru