

УДК 624.159.4

**К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ
И ПРИМЕНЕНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ РАСТВОРОВ
ДЛЯ СТРУЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ЗАКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ**

Богов С.Г.

ООО «ИСП Геореконструкция», г. Санкт-Петербург, Россия

В статье приведены результаты исследований реологических свойств цементных растворов с различным водоцементным соотношением и различными химическими добавками. Ясное понимание физических процессов происходящих в грунте при струйной цементации позволяет произвести бездефектное формирование закрепленного массива с известными прочностными свойствами, без гидравлических разрывов грунта и подъемов поверхности, включения в закрепляемую область фрагментов незакрепленного грунта и т.д.

The results of studies of the rheological properties of cement mortars with different water-cement ratio, and various chemical additives. Understanding the physical processes occurring in the soil with jet grouting can produce defect-free formation of fixed array with known strength properties without hydraulic fracturing of the soil and surface lifts, inclusion in the frozen region fragments of unfixed soil, etc.

Достоинством струйной цементации является, что с ее помощью можно осуществить закрепление практически все разности грунтов – от песков до глин, выполнить как ограждение котлована, так и усиление отдельного ленточного или свайного фундамента.

В комплекс работ по закреплению грунтов согласно технологии «jet grouting» – струйной цементации входят следующие основные операции: бурение, размыв грунта цементным раствором, перемешивание и создание массива проектного размера, обладающего необходимыми свойствами и, если необходимо, армирование. При этом еще до проблемы создания конструкции в грунте той или иной прочности при проектировании необходимо решить несколько вопросов по формированию компактной струи цементного раствора, позволяющей разрушать грунт, задать расход для гидравлического транспортирования в затрубном пространстве нужного размера частиц закрепляемого грунта. Таким образом, для успешного применения струйной технологии в проекте необходимовентивное решение комплекса задач строительных материалов, гидравлики бурения, механики грунтов и оснований и др.

Формирование струй цементного раствора. Струя цементного раствора, выходящая из гидромонитора формируется при истечении из специальных сопел. Конструкция струйного гидромонитора для закрепления грунтов должна обеспечивать сохранность формы и компактности струи на возможно большем расстоянии от сопла. Качество струи из сопел монитора и полнота преобразования потенциальной энергии жидкости в кинетическую во многом зависит от свойств сопел. Проходя через монитор цементный раствор приобретает большую скорость и дробится по числу сопел на отдельные струи. Сопла в мониторе выполняются, как правило, коноидальными с диаметром на выходе до 5мм. На компактность струи, характер распределения потока существенное влияние оказывает выбор профиля сопел. Коноидальные насадки лучше сохраняют кинетическую энергию струи на выходе и имеют по всей длине самые высокие динамические давления. Сопла с углом конусности равным 130° и цилиндрической направляющей частью на конце равной четырем диаметрам, которая служит для уменьшения сжатия и разбрызгивания струи на вылете. При размыве давление струи на контакте с грунтом превышая прочность грунта на растяжение, обеспечивает разрушение забоя и отделение частиц грунта.

В зависимости от плотности раствора струи $\rho_{ст}$ и окружающей среды $\rho_{ср}$ струи подразделяются [2; 3] на свободные незатопленные, когда $\rho_{ст} > \rho_{ср}$; свободные затопленные, когда $\rho_{ст} = \rho_{ср}$ и несвободные

затопленные, когда $\rho_{ст} < \rho_{ср}$. Струя цементного раствора, достигая стенки скважины, интенсивно промывает грунт, увлекая за собой все разрушаемые частицы. Давление жидкости на выходе из сопел монитора практически равно ее скоростному напору. При этом струя раствора на протяжении полета в воздушной среде претерпевает ряд изменений. На выходе из сопла струя имеет плотную структуру и цилиндрическую форму, по мере удаления от сопла струя, испытывая сопротивление окружающей среды, начинает распыляться, увеличиваясь в поперечном сечении. В результате чего давление по оси струи снижется. На рис. 1 photographиях, приведенных в [1, 2], истечения струи жидкости диаметром 5 мм под давлением 0,19 МПа и 3 МПа. На рис. 1, *в* приведены фото истечения струи в воздушную среду без избыточного давления и в среду находящуюся под избыточным давлением от 0,0021 МПа до 1,45 МПа. На фото рис. 1, *б* хорошо видно образование «вихрей» и разрывов на поверхности струи, а на рис. 1, *в* хорошо видно постепенное увеличение расширения струи при увеличении плотности среды [1, 2].

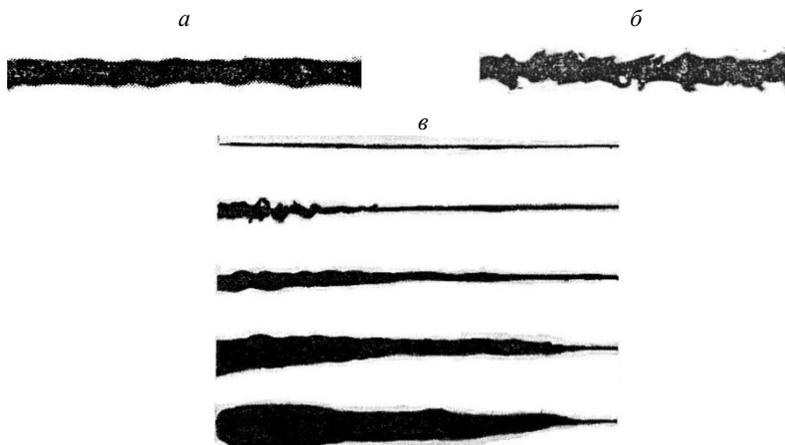


Рис. 1. Истечение в воздушной среде струй диаметром 5 мм под давлением: *а* – 0,19 МПа, *б* – 3 МПа; *в* – в среде с избыточным давлением от 0,0021 МПа до 1,45 МПа

Исследование реологических свойств цементных растворов.

Для определения реологических параметров и тиксотропных

свойств цементных растворов были проведены исследования на вискозиметре Fann 35SA рис. 2 [3].

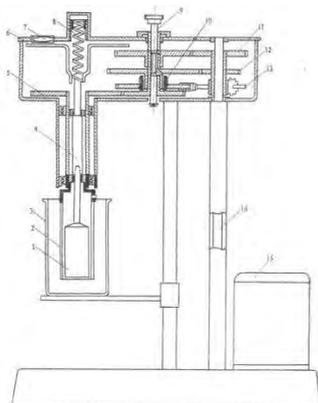


Рис. 2. Принципиальная схема вискозиметра Fann 35SA:

- 1 – измерительный цилиндр; 2 – наружный вращающийся цилиндр; 3 – стакан с испытуемой жидкостью; 4 – вал подвески измерительного цилиндра; 5 – привод наружного цилиндра; 6 – градуированный диск; 7 – реперный визир; 8 – динамометрическая пружина; 9 – переключатель скоростей; 10 – пружинное сцепление; 11 – шестерня привода для частот вращения 300 и 600об/мин; 12 – шестерня привода для частот вращения 100 и 200об/мин; 13 – червячное зацепление для частот вращения 3 и 6 об/мин; 14 – промежуточный вал; 15 – двухскоростной (750 и 1500 об/мин) синхронный двигатель

В гидравлических расчетах для Бингамовских жидкостей, к которым относятся цементные и глинистые растворы, используются пластическая вязкость и величина динамического предельного напряжения сдвига. Величина пластической вязкости η_p определялась по формуле:

$$\eta_p = \varphi_{600} - \varphi_{300}, \text{ мПа}\cdot\text{с} \quad (1)$$

где φ_{300} и φ_{600} – углы закручивания в градусах при частотах вращения соответственно 3000 и 600 об/мин.

Величина динамического предельного напряжения сдвига τ_0 определялась по формуле:

$$\tau_0 = 0,4789 \cdot (\varphi_{600} - \varphi_{300}) \text{ Па} \quad (2)$$

Для описания течения жидкостей, когда предельное напряжение сдвига $\tau_0 = 0$ используется степенная модель Освальда-де Вале с двумя реологическим параметрами: $\tau = k(\dot{\gamma})^n$, где k – индекс консистенции, Па·сⁿ; n – показатель степени неньютоновского поведения жидкости; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с⁻¹.

Для определения реологической модели цементного раствора, а также для определения параметров k и n используются формулы:

$$n = 3,32 \cdot \lg \frac{\varphi_{600}}{\varphi_{300}}, \quad (3)$$

$$k = 511 \varphi_{300}^{\frac{1}{n}} \cdot 10^{-3} \cdot \varphi_{300}, \text{ Па} \cdot \text{с}^n, \quad (4)$$

Значение кажущейся вязкости для степенной жидкости определялись по формуле

$$\eta = k \cdot (\dot{\gamma})^{n-1}, \quad (5)$$

Оценка тиксотропии цементных растворов производится по скорости и степени гелеобразования в состоянии покоя. Эти свойства характеризуются значениями напряжения сдвига, необходимого для разрушения структуры цементного раствора. Исследовались цементные растворы на основе портландцемента М400 (ЦЕМ П/А-Ш32,5 Б) с В/Ц = 1; 0,75 и 0,5 с различным содержанием добавок суперпластификатора С-3, жидкого стекла, хлористого кальция и без добавок [3]. Показания снимались для шести значений вращения цилиндра 600, 300, 200, 100, 6 и 3 об/мин при температуре воздуха 20°С.

Таблица 1

Составы цементных растворов

№ состава п/п	В/Ц раствора, хим. добавка % от веса цемента		
	В/Ц=0,5	В/Ц=0,75	В/Ц=1
1	без добавок	-«»-	-«»-
2	Na ₂ SiO ₃ - 1%	-«»-	-«»-
3	С-3 - 0,17% + Na ₂ SiO ₃ - 1%	-«»-	-«»-
4	CaCl ₂ - 2%	-«»-	-«»-

Реологические характеристики цементных растворов

№ п/п со- ста- ва	В/Ц це- ментного раствора	n	k, Па·с	Статическое напряжение сдвига, Θ, Па через, с		Пластиче- ская вяз- кость η _p , мПа·с	Динамиче- ское пре- дельное сопротив- ление сдви- га τ ₀ , Па
				10	600		
1	В/Ц=0,5	0,64	0,468	5,267	7,66	28	10,534
	В/Ц=0,75	0,73	0,08	1,915	4,31	9,5	2,394
	В/Ц=1	0,83	0,026	0,718	2,87	7	0,958
2	-«»-	0,66	0,541	6,703	13,41	38,5	13,167
	-«»-	0,65	0,246	3,83	7,661	16	5,746
	-«»-	0,88	0,027	2,394	6,703	11	0,958
3	-«»-	0,65	0,541	6,703	13,41	34	12,445
	-«»-	0,86	0,039	1,676	5,746	13	1,436
	-«»-	1,1	0,005	0,958	6,703	10,3	0
4	-«»-	0,7	0,256	4,549	8,14	25,5	7,182
	-«»-	0,85	0,032	1,197	3,83	10	1,197
	-«»-	0,95	0,011	0,958	2,872	7,5	0

Исследованные цементные растворы можно отнести к жидкостям Освальда-де Ваале. На графиках (рис. 3) в логарифмических осях практически все экспериментальные точки располагаются на прямых линиях. Для анализа реологических свойств растворов при течении растворов в кольцевом пространстве рекомендуется использовать показания для частот вращения 3 и 6 об/мин.

Для технологии закрепления jet-1, как правило, используются штанги диаметром 76 мм, а долото 93 мм или 112 мм, при технологии jet-2 применяются штанги диаметром 89 мм и долото 112 или 132 мм. Таким образом, через кольцевое пространство которое имеет зазор, в данном случае от 8,5 мм до 18 мм необходимо транспортировать весь избыточный в скважине грунтоцемент. Средняя скорость жидкости в кольцевом пространстве определяется по формуле:

$$v_n = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot (D_2^2 - D_1^2)} \text{ м/с} \quad (5)$$

где Q – расход жидкости, м³, D₁ и D₂ – диаметры труб и скважины соответственно, м.

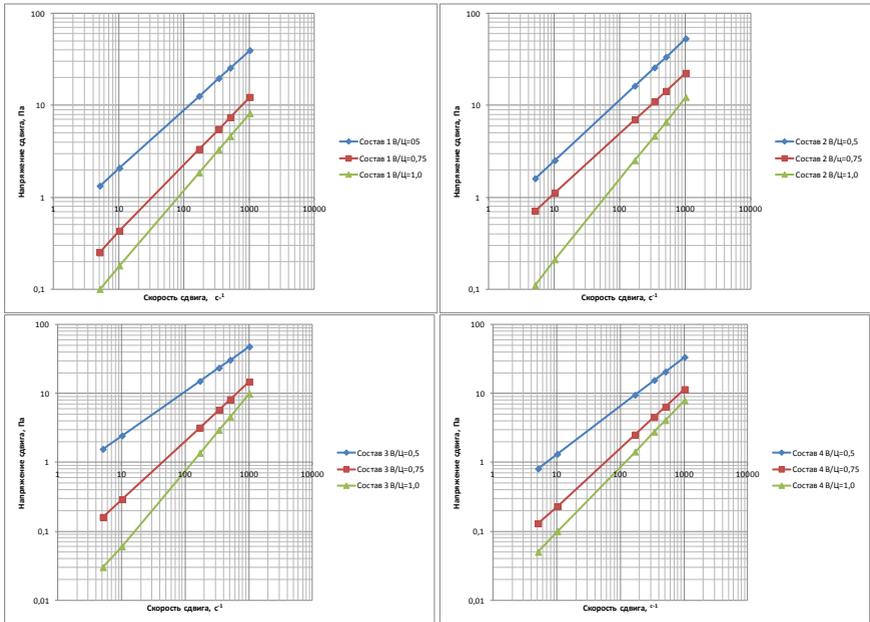


Рис. 3. Реограммы исследованных цементных растворов в логарифмических осях

Скорость осаждения v_{oc} частиц выбуренного шлама с диаметром D движущегося со скоростью v_{cp} в потоке с плотностью $\rho_{ш}$ по данным [5] можно рассчитать по формуле

$$v_{in} = \frac{69,12 \cdot \rho_{ш} - \rho_{ж} \cdot D v_{in}^2}{1,07 \tau_0 \cdot (R_2 - R_1) + 3,33 \eta \cdot v_{in}}, \text{ м/с} \quad (6)$$

Очевидно, что для прокачивания и транспортирования цементного раствора, обогащенного разрушенной породой в затрубном пространстве, нужны значительные расход и давление цементного раствора. Для слоя грунта, подвергаемого закреплению, известен гранулометрический состав и процентное содержание частиц диаметром большим D , который останется в скважине и будет являться «инертным» заполнителем цементогрунта, частицы диаметром меньшим D будут транспортироваться из скважины на поверхность в виде излива (рис. 4) [6]. Массив цементогрунта будет состоять из частиц закрепляемого объема грунта, частиц цементного раствора,

со своим водотвердым отношением В/Т. Оценку прочностных свойств получаемого цементогрунтового материала можно произвести по следующим данным: В/Ц отношению цементного раствора, влажности и гранулометрическому составу закрепляемого грунта, плотности и прочности изливов из скважин.

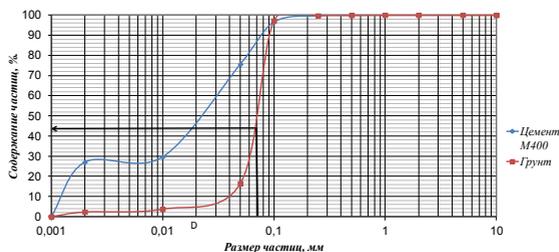


Рис. 4. Интегральные кривые гранулометрического состава закрепляемого грунта и цемента

В случае, если скорость восходящего потока раствора в затрубном пространстве будет ниже скорости осаждения частиц заданного размера D , плотность изливающегося раствора близка к плотности исходного цементного раствора, в скважине можно ожидать явления клакажа, роста давления на стенке скважины и гидроразрыва пласта.

Литература

1. Асатур, К.Г. Исследование кинематики свободной незатопленной струи / К.Г. Асатур // Записки Лен. горн. ин-та, т. ХLI. – 1959. – Вып. 1. – С. 52–61.
2. Цяпко, Н.Ф. Гидроотбойка угля на подземных работах / Н.Ф. Цяпко, А.М. Чапка. – М. : Госгортехиздат, 1960. – 308 с.
3. Богов, С.Г. Исследование свойств инъекционных растворов на основе цемента для качественного закрепления грунтов. Реконструкция и строительство на слабых грунтах / С.Г. Богов, И.А. Запечалов [Интернет-журнал]. – 2000. – № 2.
5. Булатов, А.И. Технология промывки скважин / А.И. Булатов, Ю.М. Проселков, В.И. Рябченко. – М. : Недра. 1981. – 301 с.
6. Ulitsky, V.M. Formation of piles with set strength characteristics / V.M. Ulitsky, S.G. Bogov. – Grouting and deep mixing. – Balkema /Rotterdam/ Broorfield, 1996. – P.773–776.