

N2, 2000

## **Исследование свойств инъекционных растворов на основе цемента для качественного закрепления грунтов.**

**С.Г.Богов, И.А.Запечалов**

### 1. ВВЕДЕНИЕ

При новом строительстве и реконструкции зданий в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга, когда под толщей поверхностных отложений (техногенных и разнотернистых песков) залегает толща слабых пылевато-глинистых грунтов, необходимо учитывать, что большинство зданий, расположенных в центральной части города, была возведена на бутовых фундаментах на естественном основании. Проведенные обследования деформированных зданий на фундаментах мелкого заложения показывают, что одной из причин возникших деформаций является ухудшение свойств грунтов под подошвой фундаментов, вызванное, как правило, различными техногенными факторами. Для восстановления несущей способности фундаментов зачастую достаточно проведения инженерных мероприятий по улучшению физико-механических свойств грунтов основания.

Для закрепления грунтов в геотехническом строительстве в настоящее время широко используются технологии низконапорной (давления до 2,5-3 МПа) и высоконапорной инъекции. Традиционно низконапорная инъекция осуществляется заходками "снизу-вверх" или "сверху-вниз". Более совершенным способом инъекции растворов является манжетная технология фирмы "Солетанш-Баши", по которой через установленную в грунт перфорированную манжетную трубу можно выполнить управляемое инжецирование на любом интервале. К высоконапорной инъекции относится струйная технология закрепления грунтов, когда инъекционный раствор подается в грунт через сопла бурового монитора под высоким давлением (10-100 МПа). Успешное закрепление грунтов инъекционными методами предполагают соответствие параметров процесса инъекции и характеристик растворов решаемой задаче.

К основным видам инъекционных растворов относятся: жидкие, пластичные, стабильные и нестабильные. Для практического применения для закрепления грунтов разработано большое количество рецептур инъекционных растворов: это силикатные, глиноцементные, цементные, растворы на основе синтетических смол, полимеров и др.

### 2. Низконапорная инъекция цементных растворов

Важным показателем для планирования инъекционных работ является гранулометрический состав грунтов. Идеальным случаем инъекции является соблюдение оптимального соотношения между размерами частиц раствора и инжецируемой среды [3]. Это соотношение соответствует полному пропитыванию среды.

Методом инжецирования цементными растворами, однако, успешно могут быть закреплены только крупно- и среднетернистые пески, в меньшей степени мелкие пески. Однако на основании проведенных экспериментальных работ А. Камбефор отмечает тот факт, что в действительности проницаемость грунта на месте выше величин, получаемых в лабораторных условиях, что объясняется деформацией образцов грунта.

Показателем возможности проведения инъекции цементного раствора в грунт по Ржаницыну Б.А. является отношение:

$$M = D_{15} / d_{85}, (1)$$

где  $D_{15}$  размер частиц грунта (песка), мельче которых в его составе содержится 15%,  $d_{85}$  - размер частиц цемента, мельче которых в его составе 85%. Считается, что при значении  $M \geq 8$  инъекция возможна.

Но J.K. Mitchell [6] используя то же соотношение считает, что инъекция возможна при  $M > 24$ , а при  $M < 11$  - невозможна. W. H. Baker [7] в отношении инъекции химическими растворами сформулировал следующий критерий инжецируемости: грунты с коэффициентом фильтрации  $10^{-1} - 10^{-2}$  см/с хорошо инжецируются, грунты с коэффициентом фильтрации  $10^{-3} - 10^{-4}$  см/с имеют среднюю проницаемость для инъекции, грунты с коэффициентом  $10^{-4} - 10^{-5}$  см/с плохо инжецируются.

Инъекционное закрепление цементными растворами глинистых грунтов методом пропитки осложнено и проникновение раствора в них возможно лишь посредством гидроразрывов.

Для определения параметров инъекции методом пропитки используется закон Дарси, который является общим законом движения для ньютоновских жидкостей через пористый материал,  $V = k_f \cdot I$ , где  $I$  - градиент напора,  $k_f$  - коэффициент фильтрации среды, определяемый в общем случае по формуле,

$$k_f = B \frac{n^3}{S^2 (1-n)^2}, (2)$$

где  $B$  - постоянная,  $n$  - пористость грунта.  $S$  - удельная поверхность частиц грунта

Для оценки коэффициента фильтрации грунтов используется формула Козени

$$k_f = \frac{1,5 \cdot 10^4}{f^2 \cdot S^2} \cdot \frac{n^2}{(1-n)^2}, (3)$$

где  $f$  - коэффициент зависящий от формы частиц грунта.

По данным А. Камбефора [3], коэффициент фильтрации изменяется в обратной зависимости от величины вязкости. Если известен коэффициент фильтрации грунта для воды, то можно определить коэффициент фильтрации для раствора с известной вязкостью.

При инъекции цементных растворов в грунты под давлением необходимо учитывать реологические параметры пластичных растворов. В качестве основного параметра при приготовлении цементных растворов в строительстве принята подвижность, измеряемая при помощи конуса АзНИИ или вискозиметра Суттарда. Однако растекаемость не может характеризовать реальную подвижность растворов, зависящую от условий движения и реологических параметров жидкости.

Необходимая текучесть строительных растворов достигается, как правило, содержанием в них воды, но ее количество ограничивают требования малого водоотделения и необходимой прочности получаемого материала. Поскольку цементные растворы представляют собой структурированную дисперсную систему, они обладают предельным напряжением сдвига -  $\tau_0$ , которое определяется молекулярными силами сцепления между составляющими ее элементами и взаимодействием их с дисперсионной средой. После затворения цемента для

завершения химических реакций требуется относительно малое количество воды  $В/Ц=0,35$  [2]. По данным А. Камбефора [3] цементный раствор с  $В/Ц=0,43-0,5$  находится на границе инъектируемости. Избыточная же вода образует поры в цементном камне, являющиеся дефектами структуры, и понижает его прочность [2]. Цементные растворы с очень высокими  $В/Ц$  могут и не набрать требуемой прочности, а кроме того они седиментируют в устье трещин, образованных при гидроразрывах. Для подбора раствора, удовлетворяющего этим противоречивым требованиям, необходимо учитывать многие факторы. Выбор той или иной плотности при разработке рецептуры раствора для закрепления грунтов определяется необходимой прочностью закрепляемого грунтового массива, необходимостью получения хорошей прокачиваемости, в то же время достаточной стабильности раствора. Величина гидравлических потерь при инъекции ограничивается характеристиками насосов. По данным А.Н. Адамовича прочность цементного камня сильно зависит от удельной поверхности применяемого цемента. На вязкость, водоотделение и седиментацию цементного раствора большое влияние оказывают тонкость помола цемента, его химический и минералогические составы, дозы и состав вводимых добавок.

Цементные растворы являются неньютоновскими вязкопластическими жидкостями движение которых в общем случае характеризуется параметрами Рейнольдса  $Re = v \cdot d \cdot \rho / \eta$  и Бингама  $Bi = \rho \cdot v^2 / \tau_0$ , (здесь  $v$  - скорость течения;  $d$  - гидравлический диаметр;  $\rho$  - плотность раствора;  $\eta$  - коэффициент вязкости;  $\tau_0$  - напряжение сдвига).

Реологическое поведение цементных растворов наиболее полно описывается степенной моделью Освальда-Де Вале  $\tau = k \cdot \dot{\gamma}^N$ , в которой параметр  $N$  характеризует степень их неньютоновского поведения.

### 3. Высоконапорная инъекция (струйная технология)

Закрепление грунта по струйной технологии связано с взаимодействием струй раствора с грунтом. Вследствие сужения потока в мониторе жидкость приобретает большую скорость и дробится по числу сопел установленных в мониторе на отдельные струи. Установленные в мониторе сопла выполняются, как правило, коноидальными с диаметром на выходе 1-5мм. Струя раствора, достигая поверхности грунта в скважине, интенсивно промывает его, увлекая за собой все разрушаемые частицы. Давление жидкости на выходе из сопел монитора практически равно ее скоростному напору. При высоконапорной инъекции струя раствора на протяжении полета претерпевает ряд существенных изменений: на выходе из сопла струя имеет плотную структуру и цилиндрическую форму; по мере удаления от сопла струя, испытывая сопротивление окружающей среды, начинает расплываться, увеличиваясь в поперечном сечении, в результате чего давление по оси струи снижется.

Интенсивность разрушения грунта струей зависит также и от свойств размываемого грунта. Разрушение грунта струей жидкости представляет собой достаточно сложный физико-механический процесс. Фактически процесс по струйному закреплению может быть разделен на несколько этапов: струйное разрушение грунта; струйное перемешивание частиц грунта с раствором; вынос частиц грунта в затрубном пространстве на поверхность. Э.Р. Гольдиным [4] все факторы, влияющие на интенсивность разрушения грунта струей воды, сведены в три группы: факторы, характеризующие струю: ее плотность, начальный диаметр, скорость истечения; факторы, учитывающие физико-механические свойства грунта: угол естественного откоса, критическая размывающая скорость, которая в свою очередь зависит от диаметра частиц грунта, его плотности и сцепления; факторы, учитывающие условия взаимодействия струи с грунтом: гидростатическое давление подземной воды, расстояние от сопла до забоя, скорости вращения монитора.

Важным фактором, определяющим эффективность разрушения грунта, является динамическое давление струи на разрушаемый грунт. Распределение динамического давления по продольной оси струи определяется соотношением:

$$P_m = m \cdot P_0 \cdot (d/l)^{0,85}, \quad (4)$$

где,  $P_0$  - давление на выходе из сопла,  $m$  - безразмерный коэффициент, определяемый опытным путем;  $d/l$  - относительно расстояние по продольной оси струи.

Р.А. Нурок [4] дополнительно отводит большую роль в разрушении струей песчаных грунтов гидродинамическим силам, возникающим при проникании отдельных струек в поры грунта. В результате воздействия жидкости, грунты подвергаются разрушению при силе удара струи меньшей, чем прочность грунтов на сжатие. А.К. Козодой и А.А. Босенко [5] показали, что разрушение пород струей глинистого раствора происходит при значительно меньших давлениях и объясняют это эрозионным разрушением породы твердыми абразивными частицами, содержащимися в растворе.

В зависимости от плотности струи  $\rho_{ст}$  и окружающей среды  $\rho_{ср}$  в соответствии с работами Г.Н. Абрамовича [1], различают следующие виды струи:

- свободные незатопленные  $\rho_{ст} > \rho_{ср}$
- свободные затопленные  $\rho_{ст} = \rho_{ср}$
- несвободные затопленные  $\rho_{ст} < \rho_{ср}$

Для повышения эффективности технологии стремятся приблизиться к условиям работы "свободной незатопленной" струи, что оказывается возможным в случае применения струи раствора под защитой коаксиальной струи воздуха. В совокупности с применением растворов с высокой плотностью (порядка  $1,6 \text{ г/см}^3$ ) это создает дополнительные возможности для повышения эффективности струйной технологии.

Эксперименты по гидромониторной очистке забоя буровых скважин, проведенные в Ленинградском горном институте в 1965г. под руководством Б.Б. Кудряшова, показали, что основным фактором эффективной очистки забоя является турбулентное движение промывочной жидкости, степень интенсивности которой определяется, главным образом, вязкостью этой жидкости.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для оценки реологических и тиксотропных свойств применяемых инъекционных цементных растворов, которые характеризуются значениями вязкости, напряжениями сдвига, были проведены специальные исследования.

Для приготовления цементных растворов использовался лабораторный смеситель марки SC-VS-35W, имеющий скорость вращения до 4500 об/мин. На пробных замесах было определено оптимальное время перемешивания суспензии (время, при котором стабилизировалась плотность раствора). В испытаниях использовался портландцемент М400 Пикалевского

объединения "Глинозем". Минералогический состав цемента:  $C_3S$  - 64%;  $C_2S$  - 17%;  $C_3A$  - 4%;  $C_4AF$  - 1,1%, удельная поверхность - 2400-2600 $см^2/г$ .

После приготовления растворов определялись их реологические параметры и закладывались образцы-кубики в инвентарные формы размером 7,07x7,07x7,07см. Измерения реологических характеристик цементных растворов проводилось при температуре 18<sup>0</sup>С на ротационном шестискоростном вискозиметре FANN 35SA (рис.1) с двумя коаксиальными цилиндрами.

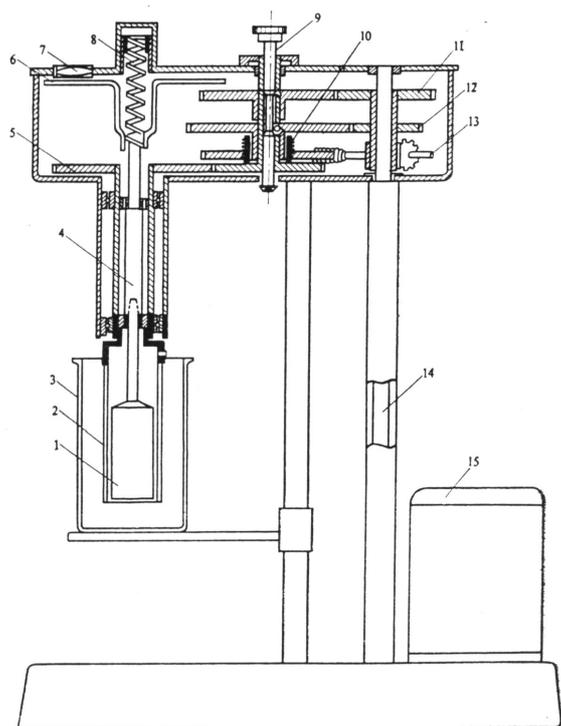
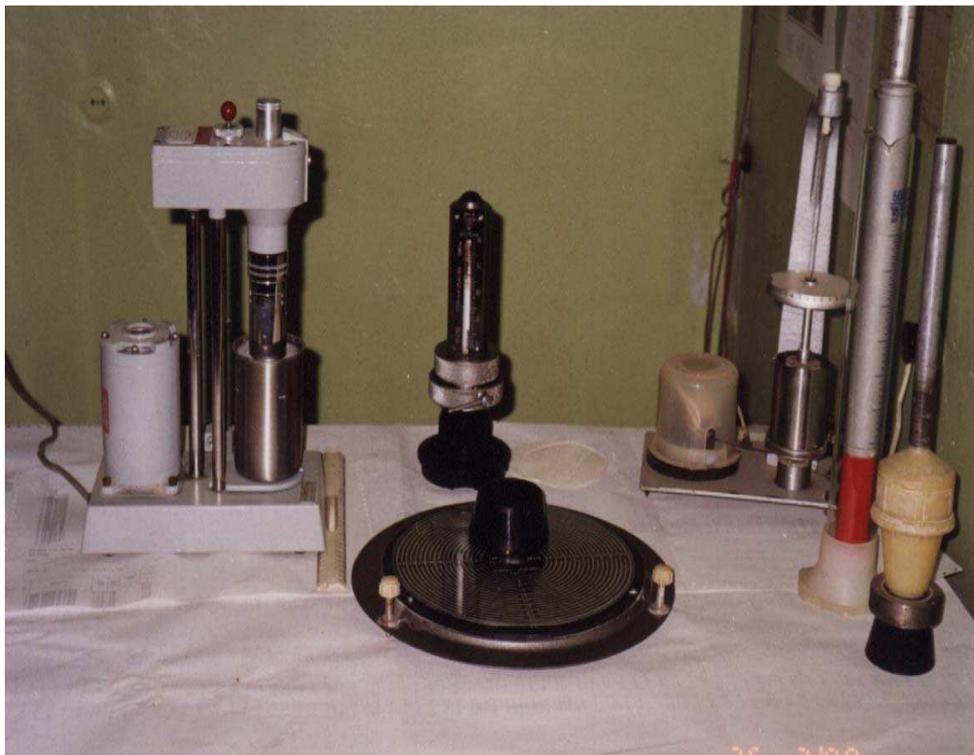


Рис. 1. Ротационный вискозиметр FANN 35SA

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 300-600 об/мин; 12-шестерня привода для частот вращения 100-200 об/мин; 13-червячное зацепление для частот вращения 3и 6 об/мин; 14-промежуточный вал; 15-двухскоростной синхронный двигатель.

Исследовались цементные растворы с плотностью от  $1,5\text{г/см}^3$  до  $1,8\text{г/см}^3$  с добавками жидкого стекла ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), хлористого кальция  $\text{CaCl}_2$  и без добавок. Для увеличения подвижности инъекционных растворов и снижения их водопотребности использовалась также добавка суперпластификатора С-3. Результаты экспериментов приведены на рис. 2(а и б), при обработке результатов использовалась степенная модель.

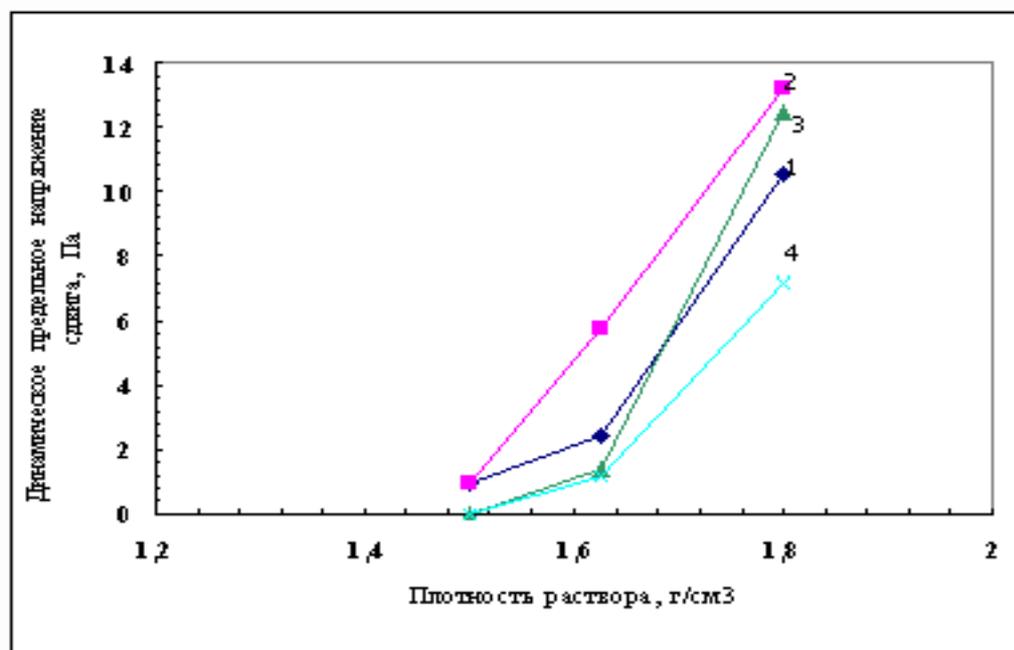


Рис.2а. Зависимость динамического предельного напряжения сдвига от плотности раствора.1-цементный раствор без добавок; 2-цементный раствор с добавкой  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ; 3-цементный раствор с комплексной добавкой  $\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{C3}$ ; 4-цементный раствор с добавкой  $\text{CaCl}_2$ .

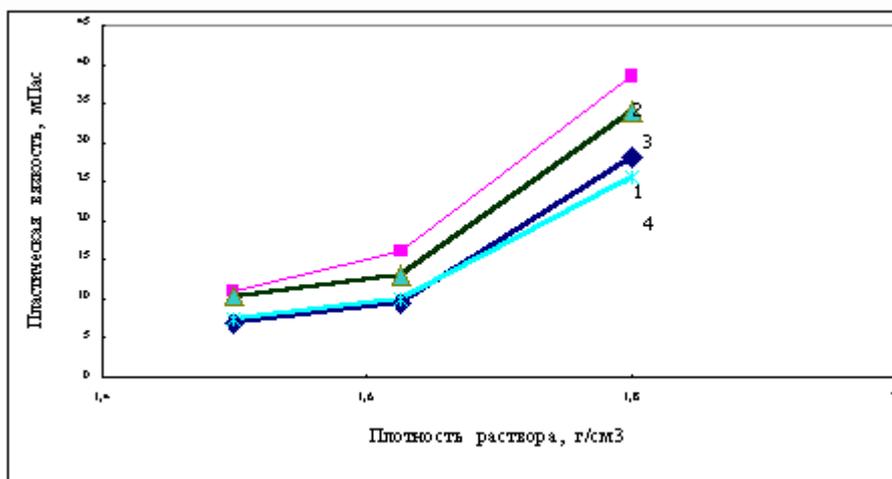


Рис.2б Зависимость эффективной вязкости от плотности раствора. 1-цементный раствор без добавок; 2-цементный раствор с добавкой  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ; 3-цементный раствор с комплексной добавкой  $\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{C3}$ ; 4-цементный раствор с добавкой  $\text{CaCl}_2$ .

Для всех растворов с добавкой  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  динамическое предельное напряжение сдвига и эффективная вязкость оказались максимальными, а с добавками  $\text{CaCl}_2$  - минимальными. Следовательно, хлоркальциевые цементные растворы по своим реологическим свойствам являются предпочтительными (по сравнению с силикатными цементными растворами) для низконапорного инъецирования грунтов в режиме пропитки, а так же для использования в струйной технологии.

При укреплении грунтов методом гидроразрывов может оказаться предпочтительнее использовать силикатные цементные растворы, обладающие большей седиментационной устойчивостью (рис.3).

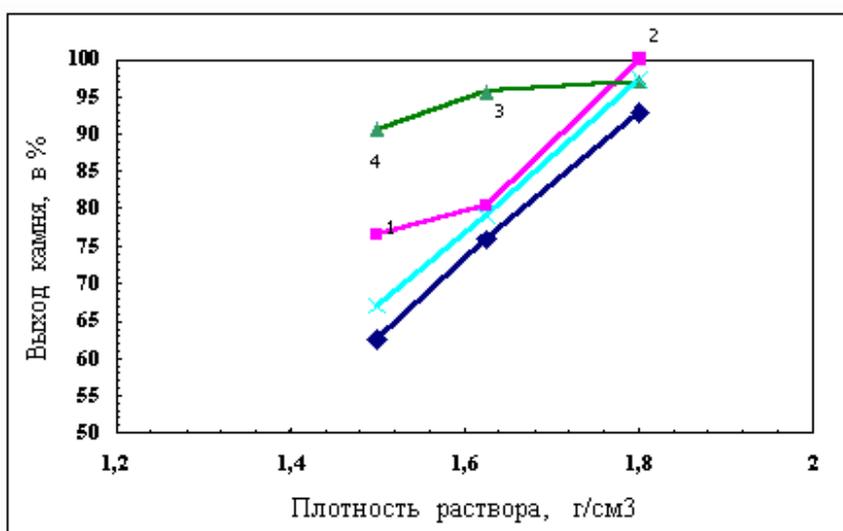


Рис.3 Зависимость выхода цементного камня от плотности раствора.

1-цементный раствор без добавок; 2-цементный раствор с

добавкой  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ; 3-цементный раствор с комплексной добавкой  $\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{C3}$ ; 4-цементный раствор с добавкой  $\text{CaCl}_2$ .

Выход цементного камня для растворов, приготовленных с добавкой  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  существенно выше, чем без добавок. Набор прочности цементного камня в возрасте 2 и 7 суток выше с добавкой  $\text{CaCl}_2$ , кроме того добавка  $\text{CaCl}_2$  снижает коэффициент фильтрации цементного камня.

Для оценки тиксотропных характеристик растворов определялось их статическое предельное напряжение сдвига.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Учет реологических параметров инъекционных цементных растворов необходим при проектировании работ по закреплению грунтов.
2. Применение химических добавок позволяет в достаточно большом интервале значений регулировать реологические свойства инъекционных цементных растворов в соответствии с условиями решаемой задачи.

литература:

1. Абрамович Г.П. Теория свободной струи и ее приложение. Труды ЦАГРИ, 1936.
2. Баженов Ю.М. Высокопрочный мелкозернистый бетон для армоцементных конструкций М. Стройиздат 1963.127с.
3. Камбефор А. Инъекция грунтов. Пер. с французского. М.: Энергия, 1971.
4. Струйная технология устройства противофильтрационных завес и несущих конструкций в грунте. Смородинов М.И., Крольков В.Н.. Обзор. М., ВНИИОСП, 1984.
5. Козодой А.К., Босенко А.А Гидравлика промысловых и цементных растворов. М.1969. 331с
6. Mitchell J.K. Soil improvement. State of the Art Report, Stockholm, Sweden, 1981, 509-565.
7. Baker, W. H., Huck, P.J. and Walter, M.J, Design and control of chemical grouting, Vol. 1. Construction control, 1982 Washington, DC.