

А. Н. АДАМОВИЧ

**ЗАКРЕПЛЕНИЕ ПЕСЧАНЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ
ЦЕМЕНТНЫМИ СУСПЕНЗИЯМИ С ДОБАВКАМИ
ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ**

(Представлено академиком П. А. Ребиндером 6 IX 1952)

Уплотнение и закрепление песчаных грунтов методом цементации имеет своей целью повышение водонепроницаемости и придание прочности грунтам, залегающим в основании гидротехнических сооружений. Метод цементации, состоящий в нагнетании под давлением цементной суспензии через специальные скважины, нашел широкое применение в работах по уплотнению и закреплению трещиноватых скальных пород. Однако до настоящего времени он почти не применялся для закрепления песчаных грунтов вследствие значительных трудностей, связанных с проникновением цементных суспензий в такие грунты.

Применение поверхностно-активных добавок в цементных суспензиях, основанное на представлениях о пептизации и структурообразовании, разработанных П. А. Ребиндером с сотрудниками⁽¹⁾, позволяет, как показали наши опыты, существенно изменять основные свойства этих суспензий (дисперсность, стабильность и др.), важные для облегчения процесса цементации и повышения качества получаемого цементного камня⁽²⁾.

Исследования, проведенные автором в 1950—1951 гг., показали, что при помощи цементных суспензий, содержащих поверхностно-активные добавки гидрофильного или гидрофобного типов и комбинации этих добавок, возможно обеспечить цементацию песчаных водонасыщенных грунтов. Имевшиеся в литературе указания⁽³⁾ о наличии ряда ограничений, возникающих при цементации песчаных грунтов, удалось в значительной мере устранить в разработанном методе инъекции. К числу таких ограничений относятся: допустимость цементации лишь песков с коэффициентами фильтрации более 120 м/сутки (0,138 см/сек), необходимость соблюдения определенного соотношения между средними геометрическими размерами пор и частиц цемента и т. п.

Цементации подвергались фракционированные пески и естественные пески — крупнозернистый и среднезернистый со средними коэффициентами фильтрации, соответственно, 0,086 см/сек (74 м/сутки) и 0,048 см/сек (40 м/сутки). Цементация производилась при напорах, колебавшихся в среднем от 0,5 до 2,0 ат и достигавших в конце цементации максимальных значений до 2,5—3,0 ат и в отдельных случаях до 5,0 ат. Для цементации применялись суспензии с широким диапазоном водоцементных отношений от $V/C = 1,0$ до 10,0. Суспензии приготавливались на портланд-цементе марки 400 с условной удельной поверхностью

3200 см²/г, имевшем следующий минералогический состав клинкера: С₃С 48,4%, С₂С 24,9%, С₃А 11,6%, С₄АF 14,0%. В суспензии вводились гидрофильные (сульфитно-спиртовая барда) и гидрофобные добавки (Na-мыло из древесного пека, мылонафт).

Цементация изучалась в разборных цилиндрических колоннах при толщине слоя грунта от 30 до 120 см.

Эффективность цементации песчаных водонасыщенных грунтов оценивалась следующими основными критериями: 1) по прочности, обеспечиваемой в наиболее удаленном слое цементируемого грунта при сроке твердения в 30 и 60 дней; 2) по коэффициентам фильтрации, достигаемым в различных слоях зацементированного грунта; 3) по проникающей способности цементной суспензии, характеризуемой количеством цемента в фильтрате, получаемом в результате цементации слоя грунта при определенном градиенте.

Путем цементации, произведенной с В/Ц от 5,0 до 8,0 и с добавкой к цементу сульфитно-спиртовой барды в концентрации от 0,1 до 0,3%, обеспечивалось закрепление естественного крупнозернистого песка, обладавшего пористостью 39% и средним размером пор 0,08—0,1 мм (песок № 1 в табл. 1), на расстояние до 120 см от источника инъекции и естественного среднезернистого песка, обладавшего пористостью 41% и средним размером пор 0,06—0,08 мм (песок № 2 в табл. 1), на расстояние до 60 см от источника инъекции.

Таблица 1

Содержание фракции в % (нарастающая сумма)

	Диаметр частиц в мм					
	<0,25	<0,5	<1,0	<3,0	<5,0	<7,0
Песок № 1	4,25	7,15	15,10	79,55	96,25	99,9
Песок № 2	3,25	6,65	16,50	98,45	100	—

Изменение радиуса цементации от 40 до 120 см вызывает уменьшение прочности в крайнем слое зацементированного песка от 20 до 9 кг/см². В близко расположенных слоях величины прочности наблюдаются от 20 до 35 кг/см².

Уменьшение концентрации исходной суспензии, характеризуемое изменением водоцементного отношения более чем в три раза, от 3,0 до 10, сказывается на изменении прочности зацементированного грунта (в крайнем слое) сравнительно мало, вызывая ее понижение приблизительно на 30%.

Введение в суспензию, при одной и той же величине водоцементного отношения, добавки сульфитно-спиртовой барды в количестве 0,1% по весу цемента приводит к незначительному снижению прочности цементируемого песка (в среднем около 10%) при сроке твердения 60 дней и влажном режиме выдерживания.

В результате цементации крупнозернистого песка достигается значительное его уплотнение и понижение фильтрационных свойств.

Проведенными опытами установлено изменение коэффициентов фильтрации зацементированного песка при различных радиусах цементации и условиях нагнетания цементной суспензии. При радиусах цементации 20—60 см удовлетворительное уплотнение крупнозернистого песка обеспечивается путем нагнетания цементных суспензий с В/Ц 5,0—8,0 при давлениях 0,5—3,0 ат. При этом через 8—14 дней твердения цемента достигается следующее уменьшение исходных коэффициентов фильтра-

ции песка (до цементации): в слоях песка, близко расположенных (0—10 см) от источника инъекции,— в 60—320 раз, в слоях песка, наиболее удаленных (50—60 см),— в 15—40 раз.

Опыты по изучению проникающей способности суспензий в песчаных грунтах показали, что оптимальной концентрацией сульфитно-спиртовой барды, вводимой в цементную суспензию, является 0,3% к весу цемента. В тех случаях, когда придание прочности закрепляемому грунту должно быть обеспечено в ранние сроки (в пределах менее 20—30 дней), концентрация вводимой добавки сульфитно-спиртовой барды должна быть уменьшена до 0,15%.

При цементации крупнозернистых и среднезернистых песков увеличение проникающей способности суспензии наблюдается при введении не только гидрофильных, но также и гидрофобных добавок, хотя и в несколько меньшей степени. В наших опытах исследовалось совместное применение гидрофильной добавки (сульфитно-спиртовой барды) и гидрофобной (пека).

Суспензии, пептизированные и частично стабилизированные сульфитно-спиртовой бардой, обладают большей сопротивляемостью коагулирующему воздействию мылообразного (гидрофобизирующего) реагента, вводимого в суспензию. Кроме того, при напорной фильтрации силы коагуляционной связи нарушаются и флоккулы легко деформируются или полностью разрушаются. Понижение вязкости суспензии в результате некоторой гидрофобизации поверхностей частиц при хемоадсорбции на них мыла увеличивает проникающую способность суспензии.

Цементная суспензия, пептизированная и стабилизированная предварительным введением сульфитно-спиртовой барды и затем обработанная мылообразным реагентом, приобретает наибольшую проникающую способность.

Механизм этого явления обусловлен в первую очередь резко избирательной пептизацией, присущей алюминатным минералам цементного клинкера под влиянием адсорбции сульфитно-спиртовой барды, как это выяснено исследованиями П. А. Ребиндера (4), С. В. Шестоперова (5) и др.

Наибольшее увеличение проникающей способности суспензии (в 1,5—2 раза) достигается при введении 0,3% сульфитно-спиртовой барды и 0,02% пека.

Опыты показали, что стабилизирующая активность сульфитно-спиртовой барды в щелочной среде возрастает. Введение в суспензию раствора едкого натра вызывает увеличение ее проникающей способности. Предварительная обработка грунта 3—5% NaOH также улучшает условия проникания суспензии.

Распределение давления в грунте при инъекции суспензий, содержащих пептизирующие добавки, оказывается существенно отличным от эпюры давления, обычно наблюдаемой при цементации песков. В колонне диаметром 150 мм и высотой 1500 мм фиксировалось изменение давления по 8 манометрам, установленным в различных точках по высоте колонны.

При инъекции суспензии с добавкой 0,3% сульфитно-спиртовой барды уже на 8-й минуте наблюдалось значительно более далекое распространение давления, чем при нагнетании суспензий того же состава без добавок. Так например, давление в 1,5 ат, зарегистрированное на расстоянии 45 см при нагнетании простой суспензии, достигалось через тот же промежуток времени на расстоянии 75 см, если в суспензию вводился пептизатор в указанной концентрации.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ П. А. Ребиндер, Изв. АН СССР, ОМОН, № 5 (1936); Изв. АН СССР, ОТН, № 5 (1937); Физико-химические исследования технических суспензий, Сборн. статей, 1933. ² А. Н. Адамович, ДАН, 74, № 3 (1950). ³ A. Machis, Proc. Am. Soc. Civ. Eng., 72, 9, 1203 (1945); M. Spindel, Wasserwirtschaft, No. 17/19 (1933). ⁴ П. А. Ребиндер, Г. И. Логинов, Вестн. АН СССР, № 10, 47 (1951). ⁵ С. В. Шестоперов, Т. Ю. Любимова, Ф. М. Иванов, ДАН, 70, № 6 (1950).