УДК 624.131

М.П. Саинов

ФГБОУ ВПО «МГСУ»

ОЦЕНКА ДЕФОРМИРУЕМОСТИ И ПРОЧНОСТИ ГРУНТОВ, ЗАКРЕПЛЕННЫХ ЦЕМЕНТАЦИЕЙ

На основе экспериментальных данных, полученных другими авторами, проанализировано влияние содержания цемента на деформируемость и прочность пескоцемента. На основе данных об уже выполненных цементационных завесах, определено, что в зацементированном гравийно-галечниковом грунте содержится 7...9 % цемента. При таком количестве цемента прочность и деформируемость грунта при цементации изменяется мало; деформируемость уменьшается лишь в 2—3 раза; прочность зацементированного грунта меньше, чем даже у самого слабого бетона.

Ключевые слова: цементация, зацементированный грунт, деформируемость, прочность грунта, стабилметрические испытания, пескоцемент, модуль деформации, сцепление, угол внутреннего трения, инъекционная завеса.

При строительстве грунтовых плотин в качестве противофильтрационных элементов часто используются цементационные завесы, которые создаются путем инъекции цементных и цементно-глинистых растворов в поры и трещины грунтов. Инъекция выполняется не только в скальных, но и в нескальных грунтах. Иногда цементационные завесы служат противофильтрационным элементом и в основании, и в теле плотины. В качестве примеров можно привести Атбашинскую, Майнскую, Орто-Токойскую и Асуанскую плотины. В них выполнены широкие цементационные завесы в гравийно-галечниковых грунтах. Опыт эксплуатации этих плотин свидетельствует о надежности цементационных завес, поэтому в настоящее время они рассматриваются в качестве одного из перспективных типов противофильтрационных элементов для строительства новых высоких и сверхвысоких плотин.

Однако, чтобы активно внедрять в практику гидротехнического строительства плотины с противофильтрационным элементом в виде цементационной завесы необходимо при проектировании уметь обосновывать их достаточную надежность. Для этого требуется выполнение расчетов напряженно-деформированного состояния плотин. Но на этом пути возникает серьезная сложность — деформируемость грунтов, закрепленных путем цементации, в настоящее время изучена слабо.

M.P. Sainov

MGSU

ASSESSMENT OF DEFORMATION AND STRENGTH OF SOILS STRENGTHENED BY CEMENTING

Currently there are few studies of deformation and strength properties of loose soils strengthened by cementing. Based on the data of already arranged grout curtains it was determined that in cemented gravel-pebble soil there are 7...9 % of cement, which is less than in concrete. To assess deformation and strength of such soils it is possible to use the data of tests conducted by other authors, where the effect of cement contents on sand-cement mix properties was studied. Analysis of experimental data showed that cemented soil may be identified with concrete only with high content of cement (more than 10 %). At cement content 7...9 % in soil the strength deformation of cemented soil varies to a small extent. Its deformation becomes 2—3 times less. It greatly depends on compression stresses. The formulae are proposed which permit assessing the effect of compression and cement content on deformation of cemented soil. It is shown that strength of cemented soil is less than that even of the weakest concrete. It has a sufficiently high cohesion, but the friction angle is approximately the same as that of the initial soil.

Key words: cementing, cemented soil, deformation, soil strength, triaxial test, sand-cement mix, deformation modulus, cohesion, internal friction angle.

In the construction of soil dams impervious grout curtains are prepared by injecting cement and cement-clay mix into soil pores and cracks. At-bashinsk, Maynsk, Orto-Tokoysk and Asuan dams with broad grout curtains in gravel and pebble soils can serve as an example. Operating experience of the dams shows the reliability of grout curtains. That's why they are considered the most important types of impervious elements in constructing high and super high dams.

However, to implement the dams with grout curtains in hydro technical construction, we should prove their reliability in design. And that demands calculation of stress-strain state of dams, which is a serious problem because of insufficient studying cemented soil deformation.

Soils cemented by injection can't be identified with concretes. Their properties are considerably different, which has a few reasons. The first reason lies in different contains of con-

Грунты, закрепленные путем инъекции цементных растворов, нельзя отождествлять с бетонами. Их свойства значительно отличаются, что объясняется несколькими причинами:

1) различие в составе бетона и грунта, закрепленного путем цементации. В бетоне содержатся крупный и мелкий заполнители, соотношение между которыми выбирается оптимальным. Состав же зацементированного грунта определяется зерновым составом исходного грунта. Очень важно различие в содержании цемента. Для приготовления бетона марки М 200 используется 200...250 кг цемента марки М 400, а для бетона марки М 100 — 200 кг цемента марки М 300¹. Соответственно, в бетоне марки М 200 масса цемента составляет примерно 9,5 % от расхода твердых материалов, а в бетоне марки М 100 — 8,5 %. При цементации содержание цемента в 1 м³ закрепленного грунта получается меньшим.

Важным фактором, определяющим свойства зацементированного грунта, является и то, что при приготовлении инъекционных растворов, помимо цемента, используется бентонит. Наличие бентонита снижает прочность и повышает деформируемость цементного камня. Закрепленный цементацией грунт по свойствам будет приближаться не к бетону, а к глиноцементобетону;

2) различие свойств бетона и зацементированных грунтов — различие в технологиях приготовления бетона и закрепления грунта инъекцией. Технология нагнетания цементных растворов не позволяет добиться хорошего перемешивания раствора с закрепляемым грунтом и не предусматривает последующего уплотнения.

Учесть влияние всех этих факторов на изменение свойств грунта при его цементации пока не представляется возможным. Мы решили попытаться учесть влияние главного фактора — содержание цемента. Для того, чтобы оценить количество цемента в закрепленном цементацией грунте, мы воспользовались имеющимися данными о цементационных завесах Атбашинской и Майнской плотин [1—3]. В табл. 1 приведена информация о составе и расходе инъекционных растворов, использованных при создании цементационных завес этих плотин.

Если принять, что до закрепления плотность гравийно-галечникового грунта составляла 2,0 т/м³, то получим, что плотность грунта после закрепления составляет 2,18 т/м³ для Атбашинской плотины и 2,2...2,4 т/м³ для Майнской. Соответственно, масса введенного в грунт раствора составляет 8...11 % от веса закреплен-

crete and cemented soil. Concrete has optimal coarse and fine aggregate ratio. Cemented soil contents depend on grain contents of the original soil. The difference of the cement proportion is also important. to prepare concrete М 200 we need 200...250 kg of cement М 400, for concrete М 100 — 200 kg of cement 300¹. Respectively, cement weight in concrete М 200 is 9.5 % of hard materials expenses, and in cement М 100 it is 8.5 %. And so, cement weight in 1 m³ of cemented soil becomes less.

One more important factor, defining cemented soil properties is using of concrete stone in grout besides cement. Concrete stone reduces strength and increases cement stone deformation. Cemented soil properties are closer to clay cement concrete.

The second reason of concrete and cemented soils different properties is the difference in their preparation technologies. Cement grout injectability doesn't provide a good mixing of grout and cemented soil with further sealing.

It's absolutely impossible to consider the influence of these factors on cemented soil property change. We tried to consider cement content as the most important factor. To measure cement weight in cemented soil we used the available data of grout curtains in Atbashinsk and Maynsk dams [1—3]. In tab. 1 there is an information of contents and expenses of injected grouts, used in dam grout curtains.

If we accept that, gravel and pebble soil density before cementing was 2.0 t/m³, than after cementing soil density is 2,18 t/m³ for Atbashinsk dams and 2.2...2.4 t/m³. And so, cement weight is 8...11 % of the whole. Then, if we know cement percentage

¹ СНиП 5.01.23—83. Типовые нормы расхода цемента для приготовления бетонов сборных и монолитных бетонных, железобетонных изделий и конструкций. ГК СССР по делам строительства. М., 1985.

¹ SNiP 5.01.23—83. *Tipovye normy raskhoda tsementa dlya prigotovleniya betonov sbornykh i monolitnykh betonnykh, zhelezobetonnykh izdeliy i konstruksiy* [Construction Norms and Requirements SNiP 5.01.23—83. Standard Specifications of Cement Consumption for Producing Concrete for Castings and Monolithic Concrete and Reinforced Concrete Products and Constructions]. Civil Code of USSR on Construction, Moscow, 1985.

ного грунта. Тогда, зная процентное содержание цемента в растворе, можно подсчитать процентное содержание цемента в закреплённом грунте (табл. 2).

in grout we can calculate cement percentage in cemented soil (tab. 2).

Табл. 1. Составы и расходы инъекционных растворов, использованных при создании цементационных завес в каменных плотинах

Плотины	Состав инъекционного раствора, кг			Плотность раствора, т/м ³	Расход на 1 м ³ закрепляемого грунта	
	Цемент	Бентонит	Вода		раствора, м ³	твёрдого материала, кг
Атбашинская	350...475	82...59	826...852	1,29...1,36	0,26	181
Майнская	100	140...110	920...930	1,16...1,14	0,42...0,60	200...240
	400	120...100	826...830	1,33		
	600...500	160...120	750...800	1,5...1,42		

Tab. 1. Contents and expenses of injected grouts, used in stone dam grout curtains

Dams	Injected grout contents, kg			Grout density, t/m ³	Cemented soil expense for 1 m ³	
	Cement	Concrete stone	Water		grout, m ³	hard material, kg
Atbashinsk	350...475	82...59	826...852	1.29...1.36	0.26	181
Maynsk	100	140...110	920...930	1.16...1.14	0.42...0.60	200...240
	400	120...100	826...830	1.33		
	600...500	160...120	750...800	1.5...1.42		

Табл. 2. Данные для подсчета содержания цемента в закреплённом грунте

Плотины	Относительное содержание цемента в расходе твёрдых материалов, %	Расход твёрдых материалов на 1 м ³ закрепляемого грунта, кг	Содержание цемента в закреплённом грунте, %
Атбашинская	81...89	181	6,7...7,4
Майнская	42...48	200...240	3,8...5,1
	77...80	200...240	7,0...8,6
	76...83	200...240	6,9...8,9

Tab. 2. Data for concrete content calculation in fastened soil

Dams	Relative cement content in hard materials expenses, %	Hard materials expenses for 1 m ³ of cemented soil, kg	Cement percentage in cemented soil, %
Atbashinsk	81...89	181	6.7...7.4
Maynsk	42...48	200...240	3.8...5.1
	77...80	200...240	7.0...8.6
	76...83	200...240	6.9...8.9

Из табл. 2 видно, что в среднем содержание цемента в грунте, закреплённом цементацией, составляет 7...8 %.

It's clear from tab. 2, that average cement content in cemented soil is 7...8 %.

Теперь необходимо оценить, как добавка такого количества цемента изменяет свойства грунта. Для этого мы воспользовались данными экспериментальных исследований, выполненных другими авторами.

Now we should assess how cement content influence soil property change. To do that, we used experimental data of other authors.

К настоящему времени выполнено большое количество исследований изменения свойств грунтов при добавлении в него цемента [4—12], однако в основном эти исследования касаются песчаных, а не крупнообломочных грунтов, так как это позволя-

Up to now, there has been a lot of researches in cemented soil property change [4—12], but most of these researches used sand soils instead of macrofragmental ones, as it allows to do the researches in laboratory conditions, with standard devices.

ет проводить исследования в лабораторных условиях, на стандартных приборах.

Наиболее подробные исследования были выполнены Аманулла Марри в Ноттингемском университете (Малайзия) [13]. Он проводил испытания свойств песка с добавлением цемента и без него в приборы трехосного сжатия. Исследовался песок средней крупности, размеры частиц которого находилась в интервале от 0,08 до 2 мм. В качестве цемента использовался портландцемент², предел прочности которого при сжатии (в возрасте 28 сут) составляет не менее 42,5 МПа. Смешивание цемента с песком производилось в сухом состоянии, после чего в готовую смесь добавлялась вода. Образцы имели цилиндрическую форму диаметром 50 мм и высотой 100 мм.

Испытания полученного пескоцемента проводились в широком диапазоне напряжений. Напряжение обжатия образца изменялось от 0,05 до 20 МПа, а вертикальное напряжение достигало 63,7 МПа, соответственно среднее напряжение в образце могло достигать 34,5 МПа.

Исследовались образцы с содержанием цемента Ц (по отношению к массе песка) 5, 10 и 15 %. Эксперименты показали, что увеличение содержания цемента приводит к увеличению модуля деформации песка, появлению и росту удельного сцепления. Было показано, что на сжимаемость материала (его модуль деформации) большое влияние оказывает не только количество цемента, но и плотность самого песчаного грунта.

Поскольку испытания проводились при очень высоких давлениях, у исследователя была возможность оценить взаимосвязь прочности компонентов пескоцемента и его деформируемости. В экспериментах на всестороннее сжатие образцов были зафиксированы явления массового разрушения цементных связей между частицами и разрушения самих частиц, что было подтверждено исследованиями под микроскопом. Разрушение цементных связей наблюдалось при напряжениях обжатия около 5 МПа, а разрушение частиц — при напряжениях около 10 МПа.

Достоинством работы Аманулла Марри является наличие большого экспериментального материала, который можно обрабатывать самостоятельно, исключая ошибки, допущенные при обработке результатов, и представляя результаты в ином виде.

Amanullah Marri from the University of Nottingham (Malaysia) [13] performed the most detailed researches. He researched sand properties with and without cement in triaxial compression devices. Under the research there was medium sand in the interval from 0.08 to 2 mm. He used Portland cement² with compression resistance limit (for 28 days) is not less than 42,5 MPa. Water was added to dry mixture of sand-and-cement. The samples were of cylindrical form 50 mm in diameter and 100 mm high.

The researches of the received sand cement were performed in broad stress range. Compression stress of the sample changed from 0.05 to 20 MPa, vertical stress came up to 63.7 MPa, and medium stress of the sample was up to 34.5 MPa.

As samples there were ones with cement content C (to the relation of sand weight) of 5, 10, and 15 %. The experiments showed that increasing of cement content increased sand deformation module and specific cohesion. It was clear that not only cement content but sand soil density influences deformation module.

As the researches were done under very high pressures, the author could assess the deformation of sand cement and the interrelation of sand cement components strength. Triaxial compression tests stated mass destruction of cement ties between particles and the destruction of particles themselves, that was proved by microscope researches. Cement ties destructed at compression stress 5 MPa, and particles destructed at 10 MPa.

The advantage of Amanullah Mari's work is a lot of experimental material, that can be processed on one's own, excluding mistakes, and presenting different results.

Fig. 1—8 shows the results of Amanullah Mari's stabilometric researches of sand, sealed to specific weight of kN/m^3 .

² Использовался портландцемент СЕМ I 42,5N, изготовленный в соответствии с Еврокодом EN 197-1 «Часть 1. Состав, технические требования и критерии соответствия общих цементов».

² Portland Cement CEM I 42,5N was used, which was produced according to Eurocode EN 197-1 "Part 1. Composition, specifications and conformity criteria for common cements".

На рис. 1—8 показаны результаты стабилометрических испытаний Аманулла Марри, проведенных для песка, уплотненного до удельного веса 17 кН/м^3 .

На рис. 1 показаны результаты испытаний при всестороннем сжатии σ до 12 МПа. Видно, что исходный песок сжимается по нелинейному закону. Добавление цемента в количестве 5 % от общей массы пескоцемента несколько снижает его объемные деформации e_v при высоких напряжениях. Нелинейность характера деформирования увеличивается. При содержании цемента 10 % объемные деформации пескоцемента резко снижаются — более чем в 2 раза по сравнению с песком, но деформации протекают нелинейно. При добавлении цемента в количестве 15 % (по массе сухого материала) объемные деформации становятся очень малы³.

Рис. 1. Деформации песка и пескоцемента при всестороннем сжатии

Fig. 1. Deformations of sand and sand cement in triaxial compression

Нелинейность деформирования грунта при объемном сжатии может быть описана степенной зависимостью [14]:

$$e_v = \frac{\sigma^n}{E_0}, \quad (1)$$

где e_v — объемная деформация; σ — среднее напряжение в 1 тс/м^3 ; n — показатель степени; E_0 — модуль объемного сжатия при напряжении 1 тс/м^3 .

Полученные нами путем обработки результатов экспериментов величины E_0 и n приведены в табл. 3. Там же приведены значения модуля объемной деформации E_0^δ , выражающего связь между приращением средних напряжений $\Delta\sigma$ и приращением объемной деформации Δe_v . Для его вычисления используется формула, полученная из формулы (1):

Nonlinearity of soil deformation in triaxial compression can be demonstrated in power law [14]:

where e_v is volume deformation; σ — average stress in 1 тс/м^3 ; n — power index; E_0 — triaxial compression module in stress 1 тс/м^3 .

E_0 and n results of the experiments are given in tab. 3. The results of volume deformation module E_0^δ , showing the relation between average stress increment volume deformation increment $\Delta\sigma$ and Δe_v are also given there. To calculate the module we use the formula obtained from formula (1):

³ Экспериментальных данных об объемных деформациях пескоцемента при содержании 15 % цемента — нет, так как они оказались очень малы. Приведенные данные получены экстраполяцией.

³ There is no experimental data on volume strains of sand cement in case of 15 % cement content, because they appear to be very small. The represented data is obtained by extrapolation.

$$E_0^\delta = E_0 \sigma^{1-n}. \quad (2)$$

Сравнивая значения E_0^δ , можно увидеть, что добавление в количестве 5 % цемента от общей массы привело к снижению деформируемости лишь на 12 %, а 10 % цемента — почти в 6,5 раз.

Comparing the results E_0^δ it's clear that adding 5 % of cement from total mass reduces deformation 12 %, and adding 10 % of cement — 6.5 times.

Табл. 3. Изменение модуля объемной деформации E_0^δ в зависимости от содержания цемента

Tab. 3. Volume deformation module E_0^δ changing depending on cement content

Показатель	Содержание цемента Ц, % Cement weight C, %				Index
	0	5	10	15	
E_0^δ , тс/м ² , при $\sigma = 1$ тс/м ²	2400	920	4000	(200 000)	E_0^δ , тс/м ³ , at 1 тс/м ³
Показатель степени n	0,67	0,50	0,60	(0,95)	Power index n
Модуль приращений объемной деформации, МПа, при $\sigma = 1$ МПа	163,7	184,0	1057	(2518)	Volume deformation increment module, МПа, at $\sigma = 1$ МПа

Примечание. В скобках приведены предполагаемые автором значения.

Note. In brackets there are guess values.

На рис. 2—4 приведены экспериментальные данные о деформациях песка и пескоцемента на участке девиаторного нагружения.

In fig. 2—4 there are there are experimental data of sand and sand cement deformation in deviator loading section.

На рис. 2, а; 3, а; 4, а; 5, b показана зависимость осевой деформации e_n цилиндрических образцов от разницы осевого напряжения σ_1 и напряжения бокового обжатия σ_3 . На них видно, что содержание цемента ведет к упрочнению грунта и уменьшению его деформируемости. Почти для всех опытов характерна зависимость прочности и деформируемости материала (не только песка, но и пескоцемента) от напряжения обжатия. С ростом обжатия увеличивается прочность и уменьшается деформируемость. Однако при увеличении содержания цемента роль обжатия уменьшается. Связь между частицами, созданная цементным камнем, обеспечивает высокие модули сдвига даже при низком обжатии.

Fig. 2, а; 3, а; 4, а; 5, b demonstrate the dependence of cylindrical example axial deformation e_n on the difference of axial stress σ_1 and lateral compression stress σ_3 . It is clear from the figures that cement content leads to soil strengthening and deformation decrease. Sand and sand cement deformation and strength depend on compression stress in nearly all the tests. However, the more is cement content the less is the compression influence. The relation between particles made by cement stone, gives high shift modules even in low compression.

На рис. 2, b; 3, b; 5, b показано изменение объемной деформации e_v в зависимости от осевой деформации e_n при девиаторном нагружении. При испытаниях песка (рис. 2, b) рост осевых деформаций вел к увеличению объемных деформаций, т.е. наблюдалась только контракция, дилатансия не происходила. Отсутствие дилатансии в песке объясняется, по-видимому, тем, что испытания проводились при очень высоких напряжениях обжатия (от 1 до 12 МПа). Интересно отметить, что доуплотнение песка при деформациях формоизменения происходит даже при столь высоких напряжениях первоначального обжатия.

Fig. 2, b; 3, b; 5, b show the change of volume deformation e_v depending on axial deformation e_n in deviator loading. In sand tests (fig. 2, b) axial deformation increase lead to volume deformation increase, that means there was no dilatancy, there was only contraction. Lack of sand dilatancy can possibly been explained by high compression stresses during tests (from 1 to 12 МПа). It's interesting to note that sand post compaction in distortion takes place even in high stresses of initial compression.

Sand-and-cement deformation behaviour differs from sand deformation

Характер деформирования пескоцемента отличался от характера деформирования песка. При испытаниях пескоцемента происходила не только контракция, но и дилатансия (рис. 3, б; 4, б; 5, а). Дилатантное расширение материала наблюдалось при напряжениях обжатия 1 и 4 МПа. При напряжениях 12 МПа всегда происходила только контракция. Наличие дилатансии приводило к разрушению цементных связей между частицами и к последующему разрушению образцов.

behaviour. In sand-and-cement tests there was not only contraction but also dilatancy (fig. 3, б; 4, б; 5, а). In compression stresses of 1 and 4 MPa there was dilatancy expansion of the material. In stresses of 12 MPa only contraction took place. Dilatancy lead to destruction of cement bonds between particles and to further samples destruction.

Рис. 2. Деформирование песка на участке девиаторного нагружения по результатам экспериментов

Fig. 2. Sand deformation in deviator loading section according to test results

Рис. 3. Деформирование пескоцемента (Ц = 5 %) на участке девиаторного нагружения по результатам экспериментов

Fig. 3. Sand-and-cement (C = 5 %) deformation in deviator loading section according to test results

Рис. 4. Деформирование пескоцемента (Ц=10 %) на участке девиаторного нагружения по результатам экспериментов

Fig. 4. Sand-and-cement (C=10 %) deformation in deviator loading section according to test results

Рис. 5. Деформирование пескоцемента ($C = 15\%$) на участке девиаторного нагружения по результатам экспериментов

Fig. 5. Sand-and-cement ($C = 15\%$) deformation in deviator loading section according to test results

Представленные графики (см. рис. 3, 4) позволяют определить изменение моделей сдвига песка и пескоцемента в процессе нагружения. Наибольший интерес представляет величина начального модуля сдвига, т.е. модуля сдвига в самом начале девиаторного нагружения. Опыты показали, что она зависит от первоначального обжатия (рис. 6, табл. 4).

The presented figures (fig. 3, 4) help to calculate the change of sand and sand-and-cement shift module in loading process. The size of the initial shift module, that is the shift module at the very beginning of deviator loading is of great interest. The results showed that this size depends on the initial compression (fig. 6, tab. 4).

Рис. 6. Изменение величины начального модуля сдвига в зависимости от напряжений обжатия и содержания цемента

Fig. 6. Change of initial displacement modulus value depending on prestress and content of the concrete

Табл. 4. Величины начального модуля сдвига, МПа, для песка и пескоцемента

Tab. 4. Initial shift module for sand and sand-and-cement, МПа

Напряжение обжатия σ , МПа	Содержание цемента, % / Cement content, %				Compression stress σ , МПа
	0	5	10	15	
1	31,6	72,4	227,8	519,2	1
4	53,6	149,8	410,3	775,6	4
8	103,7	192,7	379,4	788,0	8
12	147,3	302,4	522,6	610,4	12

Для описания зависимости модуля сдвига G от напряжения обжатия σ (или σ_3) мы предложили использовать функцию вида

To show the dependence of shift module G on compression stress σ (or σ_3) we offer the following function

$$G = G_0 + \Delta G_1 \sigma^m, \quad (3)$$

где G_0 — модуль сдвига при напряжении $\sigma = 0$ тс/м³; ΔG_1 — приращение модуля сдвига при напряжении $\sigma = 1$ тс/м³; m — эмпирический показатель степени.

Величины G_0 , ΔG_1 , m , полученные нами путем подбора, приведены в табл. 5.

where G_0 is a shift module at stress $\sigma = 0$ тс/м³; G_1 — shift module increment at stress $\sigma = 1$ тс/м³; m — empirical power index.

In tab. 5 there are the results of G_0 , G_1 , m , obtained by try and error method.

Табл. 5. Параметры зависимости, описывающие величину начального модуля сдвига

Tab. 5. Dependence parameters, showing initial shift module

Показатель	Содержание цемента Ц, % / Cement content C, %				Index
	0	5	10	15	
Начальный модуль сдвига, тс/м ² , при $\sigma = 0$ тс/м ²	1980	5500	16000	45500	Initial shift module тс/м ² , at $\sigma = 0$ тс/м ²
Приращение начального модуля сдвига, тс/м ² , при $\sigma = 1$ тс/м ²	10,7	21	250	9500	Initial shift module increment, тс/м ² , at $\sigma = 1$ тс/м ²
Показатель степени m	1,00	1,00	0,70	0,20	Power index m

Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает, что формула (3) неплохо описывает данные опыта, за исключением случая при Ц = 15 % (см. рис. 6). Однако в этом случае сами экспериментальные данные носят противоречивый характер.

Анализ данных табл. 5 показывает, что добавление небольшого количества цемента (5 %) увеличивает модуль сдвига в 2,8 раза. При этом напряжения обжатия больше сказываются на величине модуля сдвига, чем содержание цемента. При большом содержании цемента (10...15 %) роль обжатия падает, а влияние количества цемента возрастает. Интересно отметить, что каждое последующее добавление 5 % цемента увеличивает величину G_0 в 2,8...2,9 раза. На основе данных табл. 5. можно построить эмпирические зависимости изменения величин G_0 и ΔG_1 в зависимости от содержания цемента. Оказалось, что очень хорошо подходят зависимости экспоненциального вида, они практически точно аппроксимируют экспериментальные данные:

$$G_0 = 1986 \exp(20,9Ц);$$

$$\Delta G_1 = 10,5 + 0,29 \exp(68,5Ц).$$

В этих формулах Ц — относительное содержание цемента, доля от единицы.

Экспоненциальный вид функций (4) и (5) хорошо иллюстрирует ускоряющийся характер увеличения модулей сдвига при увеличении содержания цемента.

Построение зависимостей (1)—(5) дало нам возможность построить графики изменения величин E_0^δ и $G_{нач}$ в зависимости от содержания цемента (рис. 7, 8).

Comparing experimental data with estimated data shows, that formula (3) adequately describes test data, except for the case when cement content is 15 % (fig. 6). However, the experimental data in this case are contradictory.

The analysis in tab. 5 shows that adding 5 % of cement increases shift module 2.8 times. Compression stress at that influences shift module more than cement content. When cement content is 10...15 %, compression influence decreases, and cement amount influences increases. It's interesting to note that each adding of 5 % of cement increases G_0 2.8...2.9 times. At the base of data from tab. 5 it's possible to construct empirical dependences of G_0 and G_1 from cement content. It turned out that exponential dependences are most suitable as they sharply approximate experimental data:

$$G_0 = 1986 \exp(20,9C); \quad (4)$$

$$\Delta G_1 = 10,5 + 0,29 \exp(68,5C). \quad (5)$$

In these formulas, C is a relative cement content, part of unit.

Exponential functions (4) and (5) illustrate well the speeding character of shift module increase at cement content increasing.

Construction of dependences (1)—(5) made possible to construct value curves E_0^δ and $G_{нач}$ depending on cement content (fig. 7, 8).

Рис. 7. Изменение модуля приращений объемных деформаций пескоцемента в зависимости от содержания цемента

Fig. 7. Changing of sand-and-cement volume deformation module depending on cement content

Рис. 8. Изменение модуля сдвига пескоцемента в зависимости от содержания цемента

Fig. 8. Changing of sand-and-cement shift module depending on cement content

Зная эти величины, можно вычислить и величину модуля линейных деформаций, который более удобен для анализа. График его изменения в зависимости от содержания цемента приведен на рис. 9. Видим, что при содержании цемента 15 % модуль линейной деформации достигает 3000...3500 МПа, что соответствует слабому полускальному грунту или слабому грунтоцементобетону. Но это меньше, чем модуль деформации бетона. Например, у самого слабого песчаного бетона с прочностью на сжатие 10 МПа модуль деформации составляет 7000 МПа⁴.

With these variables, we can also calculate linear deformation module, which is more suitable for the analysis. Fig. 9 present the graph of its variance depending on cement content. We can see that linear deformation module is up to 3000...3500 MPa at 15 % of cement content corresponds to soft half-rock or soil cement concrete. But this is less than concrete deformation module. For example, the softest sand concrete with compression strength 10 MPa, deformation module is 7000 МПа⁴.

Рис. 9. Изменение модуля линейных деформаций пескоцемента в зависимости от содержания цемента

Fig. 9. Changing of sand-and-cement linear deformation module depending on cement content

Построение зависимостей и графиков дало возможность определить параметры деформируемости пескоцемента в интересующем интер-

Construction of graphs and dependences helped to estimate sand-and-cement deformation parameters in the specific interval of

⁴ ВСН 171—70. Технические указания по применению мелкозернистых (песчаных) цементных бетонов в дорожном строительстве. М. : Минтрансстрой, 1971.

⁴ VSN 171—70. Tekhnicheskie ukazaniya po primeneniyu melkozernistykh (peschanykh) tsementnykh betonov v dorozhnom stroitel'stve [Branch Construction Norms 171—70. Engineering Instructions on Application of Fine Grain (Sand) Cement Concretes in Road Construction]. Moscow, Mintransstroy Publ., 1971.

вале содержания цемента (7...9 %), они даны в табл. 6. Там же для напряжения обжатия 1 МПа вычислены значения более привычных показателей деформируемости: модуля линейной деформации E и коэффициента относительной поперечной деформации (коэффициента Пуассона) ν .

Табл. 6. Параметры деформируемости пескоцемента в заданном диапазоне содержания цемента, а также параметры деформируемости песка

cement content (7...9 %). They are presented in tab. 6. For compression stress 1 MPa there are values of more usual deformation indexes: linear deformation module E and relative cross section deformation coefficient ν (Poisson's ratio).

Tab. 6. Sand-and-cement deformation parameters in the given range of cement content, and sand deformation parameters

Показатель	Содержание цемента Ц, % Cement content C, %				Index
	0	7	8	9	
Модуль объемной деформации, $\text{тс}/\text{м}^2$, при $\sigma = 1 \text{ тс}/\text{м}^2$	2400	1123	1387	2295	Volume deformation module, $\text{тс}/\text{м}^2$, $\sigma = 1 \text{ тс}/\text{м}^2$
Показатель степени n	0,67	0,50	0,51	0,56	Power index n
Начальный модуль сдвига, $\text{тс}/\text{м}^2$, при $\sigma = 0 \text{ тс}/\text{м}^2$	1980	8564	10552	13003	Initial shift module, $\text{тс}/\text{м}^2$, $\sigma = 0 \text{ тс}/\text{м}^2$
Приращение начального модуля сдвига, $\text{тс}/\text{м}^2$, при $\sigma = 1 \text{ тс}/\text{м}^2$	10,7	48	79	137	Initial shift module increment, $\text{тс}/\text{м}^2$, $\sigma = 1 \text{ тс}/\text{м}^2$
Показатель степени m	0,70	0,91	0,85	0,78	Power index m
Модуль приращений объемной деформации, МПа, при $\sigma = 1 \text{ МПа}$	164	225	260	321	Volume deformation increment module, МПа, $\sigma = 1 \text{ МПа}$
Начальный модуль сдвига, МПа, при $\sigma = 1 \text{ МПа}$	31	117	145	180	Initial shift module, $\sigma = 1 \text{ МПа}$
Коэффициент Пуассона при $\sigma = 1 \text{ МПа}$	0,412	0,277	0,264	0,264	Poisson's ratio $\sigma = 1 \text{ МПа}$
Модуль линейной деформации, МПа, при $\sigma = 1 \text{ МПа}$	184	303	357	441	Linear deformation module, МПа, $\sigma = 1 \text{ МПа}$

Видим, что добавление в песок цемента в количестве 7...9 % увеличило его модуль линейной деформации лишь в 1,6...2,6 раза. Увеличение произошло в основном за счет того, что цементные связи между частицами позволили грунту сопротивляться сдвиговым деформациям, что подтверждается увеличением модуля (приращений) объемных деформаций лишь в 1,4...2 раза, а модуля сдвига — в 4...6 раз!

Теперь проанализируем, как повлияло добавление цемента в песок на его прочность. На рис. 10—13 приведены построенные нами круги Мора для случая предельного сопротивления сдвигу испытанных образцов.

We can see that adding 7...9 % of cement to sand increased its linear deformation module only 1.6...2.6 times. It happened mainly because cement bonds between particles provided soil resistance to shift deformation that is confirmed by increasing of volume deformation module only 1.4...2 times, and shift module — 4...6 times!

Now let us analyze how cement adding influences sand strength. Fig. 10—13 show stress circles for ultimate shearing resistance of test samples.

Рис. 10. Изменение сопротивления сдвига песка в зависимости от нормальных напряжений

Fig. 10. Sand shift resistance changing depending on normal stresses

Рис. 11. Изменение сопротивления сдвига пескоцемента ($C = 5\%$) в зависимости от нормальных напряжений

Fig. 11. Changing of sand-and-cement shift resistance ($C = 5\%$) depending on normal stresses

Рис. 12. Изменение сопротивления сдвига пескоцемента ($C = 10\%$) в зависимости от нормальных напряжений

Fig. 12. Changing of sand-and-cement shift resistance ($C = 10\%$) depending on normal stresses

Рис. 13. Изменение сопротивления сдвига пескоцемента ($C = 15\%$) в зависимости от нормальных напряжений

Fig. 13. Changing of sand-and-cement shift resistance ($C = 15\%$) depending on normal stresses

Построение кругов Мора позволило графически определить прочностные параметры песка и пескоцемента: угол внутреннего трения φ и удельное сцепление c . Однако оказалось, что в большинстве случаев огибающая кругов Мора имеет криволинейную форму, особенно в случае $C = 15\%$. Построение графика линейной зависимости Кулона $\tau_{пред} = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c$ возможно только с погрешностями. Поэтому мы строили и криволинейные огибающие кругов Мора.

Параметры, характеризующие линейные и криволинейные огибающие кругов Мора, приведены в табл. 7.

Construction of stress circles allowed estimating graphically sand and sand-and-cement strength parameters: internal friction angle φ and specific cohesion c . However, in most cases enveloping stress circle is in deflected position, especially when cement content is 15% . Construction of Coulomb linear dependence graph is possible only to tolerances. Therefore, we constructed curvilinear enveloping stress circles.

Parameters, characterizing linear and curve linear enveloping stress circles are given in tab. 7.

Табл. 7. Изменение показателей прочности в зависимости от содержания цемента

Tab. 7. Changing of strength index depending on cement content

Показатель	Содержание цемента Ц, % Cement content C, %				Index
	0	5	10	15	
Угол внутреннего трения, град. (для линейной огибающей)	30,0	31,5	28,0	28,0	Internal friction angle, grad (for linear enveloping)
Удельное сцепление, МПа (для линейной огибающей)	0,2	0,5	2,0	3,5	Specific cohesion, MPa (for linear enveloping)
Начальный угол внутреннего трения, град., (для криволинейной огибающей)	39	31,5	38,0	41,0	Initial internal friction angle, grad (for curve linear enveloping)
Начальный угол внутреннего трения, град., (для криволинейной огибающей)	29	31,5	26,5	23,0	Initial internal friction angle, grad (for curve linear enveloping)
Удельное сцепление, МПа, (для криволинейной огибающей)	0	0,5	1,5	1,8	Specific cohesion, MPa (for curve linear enveloping)

Видим, что у исходного песка по Кулону угол внутреннего трения равен 30° , что обычно для песчаного грунта, однако при этом имеется очень высокое сцепление — 0,2 МПа. При криволинейной огибающей песок сцеплением не обладает, однако начальный (при $\sigma \approx 0$) угол внутреннего трения составляет 39° . При высоких напряжениях (более 5 МПа) он падает до 29° . Можно говорить о том, что данный песок хорошо уплотнен и обладает довольно высокой прочностью.

Добавление небольшого количества цемента 5 % приводит к появлению сцепления 0,5 МПа, а угол внутреннего трения немного повышается (на $2,5^\circ$). Таким образом, малое содержание цемента не только мало изменяет деформируемость грунта, но и мало влияет на его прочность.

При содержании цемента 10 % сцепление грунта резко возросла, до 1,5...2,0 МПа. При этом угол внутреннего трения несколько снижается. При высоком содержании цемента (15 %) прочность еще более повышается, но это повышение в основном обеспечивается повышением сцепления. При высоких напряжениях сопротивление сдвигу у всех материалов примерно одинаково. Это хорошо видно на рис. 14, на котором совмещены все криволинейные огибающие кругов Мора.

We see that internal friction angle of original sand according to Coulomb is 30° , that is usual for sand soils, however, the cohesion is very high at that — 0.2 MPa. There is no sand cohesion at curve linear enveloping, though initial internal friction angle is 39° . When stresses are more than 5 MPa it lowers to 29° . So we can say that this sand is well compacted and has a high strength.

Adding just 5 % of cement leads to value of cohesion — 0.5 MPa, and internal friction angle increases to 2.5 times. Therefore, small amount of cement not only changes soil deformation slightly, but also slightly influences its strength.

When cement content is 10 % soil cohesion increases sharply to 1.5...2.0 MPa. Internal friction angle decreases slightly at that. At cement content of 15 % the strength will have further increased. But the increase is mainly due to higher cohesion. In high stresses shift resistance of all the materials is nearly the same. It's clear from fig. 14, where all the curve linear stress circles are superimposed.

Рис. 14. Изменение сопротивления сдвига песка и пескоцемента в зависимости от нормальных напряжений

Fig. 14. Changing of sand and sand-and-cement shift resistance depending on normal stresses

Зная удельное сцепление и угол внутреннего трения, можно подсчитать прочность пескоцемента на сжатие по формуле

$$R_{сж} = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (6)$$

Можно подсчитать, что при $C = 5\%$ $R_{сж}$ составляет 1,8 МПа, при $C = 10\%$ — 6,1...6,7 МПа, а при $C = 15\%$ — 7,9...11,6 МПа. Поэтому только при большом количестве цемента ($>10\%$) пескоцемент соотносится по прочности со слабым бетоном (класса В5 или В7,5 МПа). При интересующем нас количестве цемента (7...9 %) прочность пескоцемента на сжатие находится в пределах 3,5...5 МПа.

Выводы. 1. Как и следовало ожидать, стабилометрические испытания, выполненные другими авторами, показали, что добавление в грунт цемента снижает его деформируемость и увеличивает прочность. Однако это изменение сильно зависит от количества введенного цемента: добавление цемента в количестве 5 % от массы мало изменяет свойства грунта, при добавлении в грунт цемента в количестве 15 % он превращается в слабый бетон. Его деформации протекают с малой нелинейностью.

Так как при цементации количество цемента в грунте составляет 7...9 %, то зацементированный грунт нельзя отождествлять с бетоном. При цементации в отличие от бетонирования нельзя добиться максимальной степени уплотнения смеси раствора и грунта. Повышению прочности и снижению деформируемости препятствует тот факт, что в инъекционных растворах содержится бентонит.

2. В обычном диапазоне содержания цемента в зацементированном грунте (7...9 %) его объемное деформирование протекает нелинейно. При введении цемента модуль объемной деформации увеличивается лишь примерно в 2 раза. В таком материале возможно проявление и дилатантных свойств. Введение цемента, прежде всего, увеличивает сопротивление сдвигу. При увеличении содержания цемента модуль сдвига растет быстрее, чем модуль объемной деформации.

3. Величина модуля сдвига грунта, укрепленного цементом, зависит не только от содержания цемента, но и от напряжения обжатия. При малом содержании цемента (до 5 %) обжатие более сильно сказывается на величине модуля сдвига, чем содержание цемента. При большом содержании цемента (10...15 %) роль

If we know specific cohesion and internal friction angle, we can calculate sand-and-cement compression strength by formula

We can calculate that when C is 5 % compression strength is 1.8 MPa, at $C = 10\%$ — 6.1...6.7 MPa, and at $C = 15\%$ — 7.9...11.6 MPa. So only when cement content is more than 10 %, sand-and-cement can be compared in strength to weak concrete (B5 class or B7.5 MPa). At cement content (7...9 %) sand-and-cement compression strength is in the limits of 3...3.5 MPa.

Conclusions. 1. According to expectations, stabilometric tests, made by other authors showed that adding of cement to soil decreases its deformation and increases its strength. However, this changing depends highly on cement amount: adding 5 % of cement from total mass does not change much soil properties, adding 15 % of cement it turns to weak concrete. Its deformation has nonlinear character.

As cement content in cemented soil is 7...9 %, than cemented soil, than cemented soil can't be identified to concrete. Cementing in contrast of concreting don't lead to maximum degree of mix and soil thickening. Content of bentonite in injection mixes resist Strength increase and deformation increase are.

2. In usual range of cement content in cemented soil (7...9 %), its volume deformation takes pace in nonlinear form. After adding cement volume deformation module increases only 2 times. In such material dilatancy properties may appear. Cement adding increases shift resistance. When cement content increases, shift module grows quicker than volume deformation module.

Cemented soil shift module depends not only on cement content, but also on compression stress. At cement content 5 % compression influences shift module more than cement content. When cement content is 10...15 %, influence of compression decreases, and of cement content decreases.

We offer functions of sand-and-cement initial shift module changing depending on cement content and compression stress. Dependence of initial shift module on compres-

обжатия падает, а количества цемента — возрастает.

Нами предложены функции изменения начального модуля сдвига пескоцемента в зависимости от содержания цемента и от напряжения обжатия. Зависимость начального модуля сдвига от напряжения обжатия может быть выражена степенной функцией, а зависимость от содержания цемента — экспоненциальной (или показательной) функцией.

4. Прочность грунта, закрепленного цементацией, в основном обеспечивается появлением сил сцепления, изменением углов внутреннего трения при расчетах можно пренебречь.

5. Судя по данным экспериментальных исследований для пескоцемента, введение в грунт цемента в количестве 7...9 % ведет к снижению его деформируемости лишь в 2...3 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бобров Р.И. Инъекционные завесы в нескольких породах // Гидротехническое строительство. 1963. № 7. С. 47—56.
2. Логинов К.А., Кузнецов В.В. Возведение инъекционного ядра плотины Атбашинской ГЭС (Киргизская ССР) // Гидротехническое строительство. 1972. № 12. С. 25—27.
3. Журкина Н.Н. Инъекционная завеса в основании грунтовой плотины Майнской ГЭС // Гидротехническое строительство. 1987. № 11. С. 39—42.
4. Abdulla A.A., Kioussis P.D. Behaviour of cemented sands. 1. Testing // International Journal for Numerical and Analytical methods in Geomechanics. 1997. No. 21 (8). Pp. 533—547.
5. Airey D.W. Triaxial testing of naturally cemented carbonate soil // Journal of Geotechnical Engineering-ASCE. 1993. No. 119 (9). Pp. 1379—1398.
6. Asghari E., Toll D.G. and Haeri S.M. Triaxial behaviour of a cemented gravely sand. Tehran alluvium // Geotechnical and Geological Engineering. 2003. No. 21 (1). Pp. 1—28.
7. Bergado D.T., Taechakumthorn C., Lorenzo G.A., Abuel-Naga H.M. Stress-deformation behaviour under anisotropic drained triaxial consolidation of cement-treated soft Bangkok clay // Soils and Foundations. 2006. No. 46 (5). Pp. 629—637.
8. Haeri S.M., Hamidi A., Hosseini S.M., Asghari E. and Toll D.G. Effect of cement type on the mechanical behaviour of a gravely sand // Geotechnical and Geological Engineering. 2006. No. 24 (2). Pp. 335—360.
9. Ismael N.F. Influence of artificial cement content on the properties of Kuwaiti sands // Kuwait Journal of Science & Engineering. 2000. No. 27 (1). Pp. 59—76.
10. Lade P.V. and Overton D.D. Cementation effects in frictional materials // Journal of Geotechnical Engineering-ASCE. 1989. No. 115. Pp. 1373—1387.
11. Lee K.L., Farhoomand I. Compressibility and crushing of granular soils in anisotropic triaxial compression // Canadian Geotechnical Journal. 1967. No. 4 (1). Pp. 68—86.
12. Schnaid F., Prietto P.D.M. and Consoli N.C. Characterization of Cemented Sand in Triaxial Compression. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2001, no. 127 (10), pp. 857—868.
1. Bobrov R.I. In"eksionnye zavesy v neskal'nykh porodakh [Grout Curtains in Petroglyphic Rock]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic Engineering]. 1963, no. 7, pp. 47—56.
2. Loginov K.A., Kuznetsov V.V. Vozvedenie in"eksionnogo yadra plotiny Atbashinskoy GES (Kirgizskaya SSR) [Erection of Atbashinsk Grout Dam Core in Kyrgyzstan]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic Engineering]. 1972, no. 12, pp. 25—27.
3. Zhurkina N.N. In"eksionnaya zavesa v osnovanii gruntovoy plotiny Maynskoy GES [Grout Curtains in Soil Dam Base of Mainskaya HPP]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic Engineering]. 1987, no. 11, pp. 39—42.
4. Abdulla A.A., Kioussis P.D. Behaviour of Cemented Sands. 1. Testing. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 1997, no. 21 (8), pp. 533—547.
5. Airey D.W. Triaxial Testing of Naturally Cemented Carbonate Soil. Journal of Geotechnical Engineering-ASCE. 1993, no. 119 (9), pp. 1379—1398.
6. Asghari E., Toll D.G. and Haeri S.M. Triaxial Behaviour of a Cemented Gravely Sand. Tehran Alluvium, Geotechnical and Geological Engineering. 2003, no. 21 (1), pp. 1—28.
7. Bergado D.T., Taechakumthorn C., Lorenzo G.A. and Abuel-Naga H.M. Stress-Deformation Behaviour under Anisotropic Drained Triaxial Consolidation of Cement-Treated Soft Bangkok Clay, Soils and Foundations. 2006, no. 46 (5), pp. 629—637.
8. Haeri S.M., Hamidi A., Hosseini S.M., Asghari E. and Toll D.G. Effect of Cement Type on the Mechanical Behaviour of a Gravely Sand. Geotechnical and Geological Engineering. 2006, no. 24 (2), pp. 335—360.
9. Ismael N.F. Influence of Artificial Cement Content on the Properties of Kuwaiti Sands. Kuwait Journal of Science & Engineering. 2000, no. 27 (1), pp. 59—76.
10. Lade P.V. and Overton D.D. Cementation Effects in Frictional Materials. Journal of Geotechnical Engineering-ASCE. 1989, no. 115, pp. 1373—1387.
11. Lee K.L. and Farhoomand I. Compressibility and Crushing of Granular Soils in Anisotropic Triaxial Compression. Canadian Geotechnical Journal. 1967, no. 4 (1), pp. 68—86.
12. Schnaid F., Prietto P.D.M. and Consoli N.C. Characterization of Cemented Sand in Triaxial Compression. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2001, no. 127 (10), pp. 857—868.

12. Schnaid F., Prietto P.D.M., Consoli N.C. Characterization of cemented sand in triaxial compression // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2001. No. 127 (10). Pp. 857—868.

13. Marri Amanullah. The mechanical behavior of cemented granular materials at high pressures // Thesis submitted to The University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy. 2010.

14. Рассказов Л.Н., Джха Дж. Деформируемость и прочность грунта при расчете высоких грунтовых плотин // Гидротехническое строительство. 1987. № 7. С. 31—36.

13. Marri Amanullah. The Mechanical Behavior of Cemented Granular Materials at High Pressures. Thesis Submitted to The University of Nottingham for the Degree of Doctor of Philosophy. 2010.

14. Rasskazov L.N., Dzhha Dzh. Deformiruemost' i prochnost' grunta pri raschete vysokih gruntovyh plotin [Soil Deformation and Strength in High Soil Dam Calculations]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic Engineering]. 1987, no. 7, pp. 31—36.

Received in February 2014.

Поступила в редакцию в феврале 2014 г.

Об авторе: **Сайнов Михаил Петрович** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры гидротехнического строительства, **Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 8 (495) 287-49-14, mp_sainov@mail.ru.

About the author: **Sainov Mihail Petrovich** — Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of hydraulic construction, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, +7 (495) 287-49-14, mp_sainov@mail.ru

Для цитирования:

Сайнов М.П. Оценка деформируемости и прочности грунтов, закрепленных путем цементации [Электронный ресурс] // Строительство: наука и образование. 2014. № 3. Ст. 1. Режим доступа: <http://www.nso-journal.ru>.

For citation:

Sainov M.P. Otsenka deformiruemosti i prochnosti gruntov, zakreplennykh putem tsementatsii [Assessment of Deformation and Strength of Soils strengthened by Cementing]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2014. no. 3, paper 1. Available at: <http://www.nso-journal.ru>.