



ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО СНИЖЕНИЮ ДАВЛЕНИЯ НАБУХАНИЯ СЛАНЦЕВ ГОРОДА ТАБУК (САУДОВСКАЯ АРАВИЯ)

ЭМБАБИ А.А.

Кафедра геологии факультета естественных наук Университета Дамиетты, г. Дамиетта (Думьят), Египет
embaby@du.edu.eg)

АБУ ХАЛАВА А.

Управление по ядерным материалам, г. Каир, Египет
halawa1970@yahoo.com

РАМАДАН М.

Кафедра геологии факультета естественных наук Университета Дамиетты, г. Дамиетта (Думьят), Египет
medhatr75@yahoo.com

АННОТАЦИЯ

Представляем вниманию читателей немного сокращенный адаптированный перевод статьи египетских инженеров-геологов «Эксперименты по снижению давления набухания сланцев города Табук (Саудовская Аравия)» (Embaby et al., 2017), которая была в свое время опубликована издательством WASET в журнале International Journal of Geological and Environmental Engineering («Международном журнале по инженерной геологии и инженерным методам охраны окружающей среды»). Эта работа находится в открытом доступе по лицензии CC BY-SA 3.0, которая позволяет распространять, изменять, дорабатывать, переводить, адаптировать и дополнять ее при условии указания лицензии, типов изменений и ссылки на первоисточник. В нашем случае полная ссылка на источник для представленного перевода (Embaby et al., 2017) приведена в конце.

В Королевстве Саудовская Аравия в населенных районах есть несколько территорий, сложенных склонными к набуханию сланцами в виде слоев переменной толщины. Развитие набухания и давления набухания этого вида сланцев может вызвать серьезные проблемы для инфраструктуры. Для слабонагруженных сооружений и неглубоко заложенных фундаментов очень популярно удаление таких грунтов и замена их на более подходящие. В данной статье представлены результаты экспериментального исследования, проведенного для оценки влияния типа и толщины замещающих грунтовых подушек на снижение характеристик набухания рассматриваемых сланцев.

В районе Аль-Кадисия города Табук на севере Саудовской Аравии было отобрано 7 ненарушенных образцов склонных к набуханию сланцев. Определенная доля каждого образца по высоте заменялась сверху двумя типами подушек из достаточно крупнозернистых материалов (песка или гравия) разной толщины, равной 22, 33 и 44% от исходной высоты сланца в образце (в полевых условиях это был бы процент от мощности активной зоны набухающего сланца). Результаты испытаний показали, что замена сланца на подушку снижает потенциал и давление набухания. Было установлено, что уменьшение набухания зависит от типа и толщины такой подушки. Удаление исходного сланца и замена его на песчаную подушку толщиной 44% снизило набухание и давление набухания примерно на 53,29 и 62,78% соответственно.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

подушка из песка/гравия; набухающие грунты; Саудовская Аравия; давление набухания; сланцы города Табук.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Эмбаби А.А., Абу Халава А., Рамадан М. Эксперименты по снижению давления набухания сланцев города Табук (Саудовская Аравия) (пер. с англ.) // Геоинфо. 2024. Т. 6. № 1/2. С. 36–46 DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-1/2-36-46

AN EXPERIMENTAL STUDY TO MITIGATE SWELLING PRESSURE OF EXPANSIVE TABUK SHALE, SAUDI ARABIA

EMBABY A.A.

Geology Department, Faculty of Science, Damietta University, Damietta, Egypt
embaby@du.edu.eg)

ABU HALAWA A.

Nuclear Material Authority, Cairo, Egypt
halawa1970@yahoo.com

RAMADAN M.

Geology Department, Faculty of Science, Damietta University, Damietta, Egypt
medhatr75@yahoo.com

ABSTRACT

We present to the attention of the readers a slightly abridged and adapted translation of the paper "An experimental study to mitigate swelling pressure of expansive Tabuk shale, Saudi Arabia" by Egyptian engineering geologists (Embaby et al., 2017). This paper was published by the WASET publishing house in the International Journal of Geological and Environmental Engineering. It is an open access article under the CC BY SA 3.0 license that allows it to be distributed, modified, refined, translated, adapted, and supplemented, provided that the types of changes are noted, the original source and license are referred to. In our case, the full reference to the original paper (Embaby et al., 2017) for the presented translation is given in the end.

In the Kingdom of Saudi Arabia, there are several areas where expansive soil exists in the form of variable-thicknesses layers in the developed regions. Severe distress to infrastructures can be caused by the development of heave and swelling pressure in this kind of expansive shale. Among the various techniques for expansive soil mitigation, the removal and replacement technique is very popular for lightly loaded structures and shallow foundations. This paper presents the result of an experimental study conducted for evaluating the effect of the type and thickness of the cushion soils on the mitigation of swelling characteristics of the expanded shale.

Seven undisturbed shale samples collected from the Al Qadsiyah district, which is located in the Tabuk town in the north of the Kingdom of Saudi Arabia, were treated with two types of cushions of coarse-grained sediments (CCS) (sand and gravel). The both types had thicknesses of 22, 33 and 44% in relation to the initial height of the sample (which would be in relation to the depth of the active zone of the shale from its top in the field conditions). The test results indicated that the replacement of the expansive shale by CCS reduced the swelling potential and swelling pressure. It was found that the reduction in the swelling depended on the type and thickness of CCS. The treatment by removing the original expansive shale and replacing it by a sand cushion, which was 44% thick, reduced the swelling potential and pressure. The values of the reduction were about 53.29 and 62.78 %, respectively.

KEYWORDS:

cushion of sand/gravel; expansive soil; Saudi Arabia; swelling pressure; Tabuk Shale.

FOR CITATION:

Embaby A.A., Abu Halawa A., Ramadan M. Eksperymenty po snizheniyu davleniya nabuhaniya slantsev goroda Tabuk (Saudoovskaya Araviya) [An experimental study to mitigate swelling pressure of expansive Tabuk shale, Saudi Arabia] (translated from English into Russian) // Geoinfo. 2024. Vol. 6. № 1/2. S. 36–46 DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-1/2-36-46 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ ►

В засушливых и полусушливых регионах, где годовое испарение превышает годовое количество осадков, встречаются грунты, набухающие от влаги. Опасности, вызванные такими

грунтами, имеются во многих странах мира, включая Америку, Австралию, Канаду, Индию, Иран, Мексику и Южную Африку [1]. Склонность грунтов к набуханию называют скрытым бедствием, поскольку стоимость ущерба в слу-

чае ее реализации превышает совокупную стоимость ущерба от таких стихийных бедствий, как наводнения, землетрясения и ураганы [2]. Размер ущерба от набухания грунтов составляет, например, 7 млрд долларов в год в

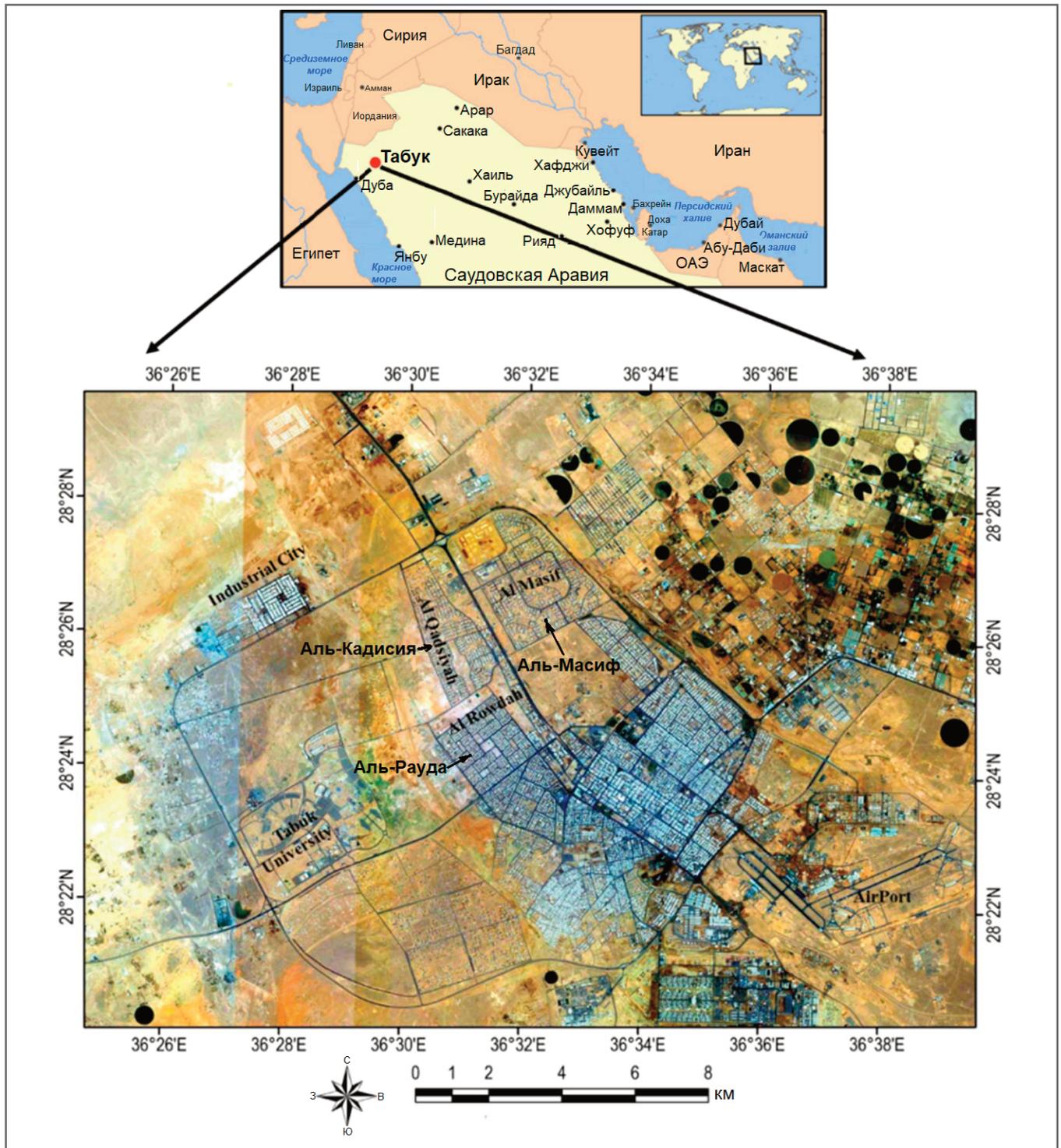


Рис. 1. Расположение города Табук и его районов Аль-Кадисия, Аль-Масиф и Аль-Рауда на картах (внизу – на основе снимка со спутника Landsat 8, 2015 г.)

США [3] и 300 млн долларов за 1977–1987 годы в Саудовской Аравии [4].

Набухающие сланцы Саудовской Аравии привлекли широкое внимание ряда исследователей [5–10]. Они встречается на многих территориях этой страны, охватывая основные зоны ее центральной, северной и северо-западной частей. Глинистые и илестые сланцы были обнаружены на территориях городов Табук, Аль-Гат, Тайма, Медина, Аль-Хуфуф, Шарура и Аль-Джауф

[11–14]. Сланцы являются основными набухающими грунтами в таких районах города Табук, как Аль-Кадисия, Аль-Масиф, Аль-Рауда (рис. 1) [15–19].

Существуют различные методы уменьшения набухания грунтов верхней части разреза, вызывающего выпучивание поверхности земли, для предотвращения повреждения зданий и сооружений. Меры по уменьшению таких воздействий были обобщены и описаны разными авторами [1, 20–25]. Среди

методов уменьшения последствий набухания грунтов наиболее известным стал метод удаления подобных грунтов и замены их на ненабухающие для строительства легконагруженных сооружений и неглубоко заложенных фундаментов благодаря своей эффективности и доступности [26]. В работах [27–29] предполагается, что давление набухания изменяется обратно пропорционально толщине слоя песка (песчаной подушки), на который заменили верхнюю

часть набухающего грунта, и прямо пропорционально плотности этого песка.

Авторы работы [30] провели исследование по оценке эффективности различных мер по устранению или уменьшению последствий набухания и минимизации повреждения дорожных покрытий. Они обнаружили, что для снижения вертикальных смещений покрытия эффективна замена земляного полотна ненабухающим материалом.

Позже метод удаления и замены склонных к набуханию грунтов был использован в разных штатах США, таких как Калифорния, Техас и Колорадо [31]. Этот метод оказался успешным при ремонте некоторых гидротехнических сооружений с целью снижения гидростатического (взвешивающего) противодавления. Был проведен ремонт на канале Фриан-Керн [32] и каналах Могавик и Велтон путем выемки верхней части набухающего грунтового основания и замены его на песок и слегка уплотненный гравий [33]. Этот метод также использовался для уменьшения набухания глины за счет удаления ее толстого слоя и замены его на ненабухающий материал для повышения нагрузки на нижележащую набухающую глину. Хольц [33] также отметил, что неравномерные смещения поверхности уменьшаются при наличии гравийного слоя, заменяющего набухающий грунт.

В настоящем исследовании предпринята попытка изучить эффективность влияния подушки из достаточно крупнозернистых грунтов для уменьшения или устранения последствий возможного набухания сланцев города Табук (Саудовская Аравия) путем проведения серии лабораторных испытаний семи ненарушенных образцов грунта.

РАСПОЛОЖЕНИЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ ►

Город Табук расположен в северо-западной части Саудовской Аравии в пределах $27,5-28,5^\circ$ с. ш. и $36,0-7,0^\circ$ в. д. (см. рис. 1). Район Аль-Кадисия – очень важный район Табука, где находится множество государственных и частных зданий (жилых домов, школ, университетов, больниц и т. д.). Это один из наиболее пострадавших районов от опасного набухания грунта. Там имеются трещины в стенах и других конструкциях многих зданий, в ограждениях, автомобильных дорогах, тротуарах и пешеходных дорожках (рис. 2).

По данным бурения скважин, верхняя часть грунтового разреза на терри-

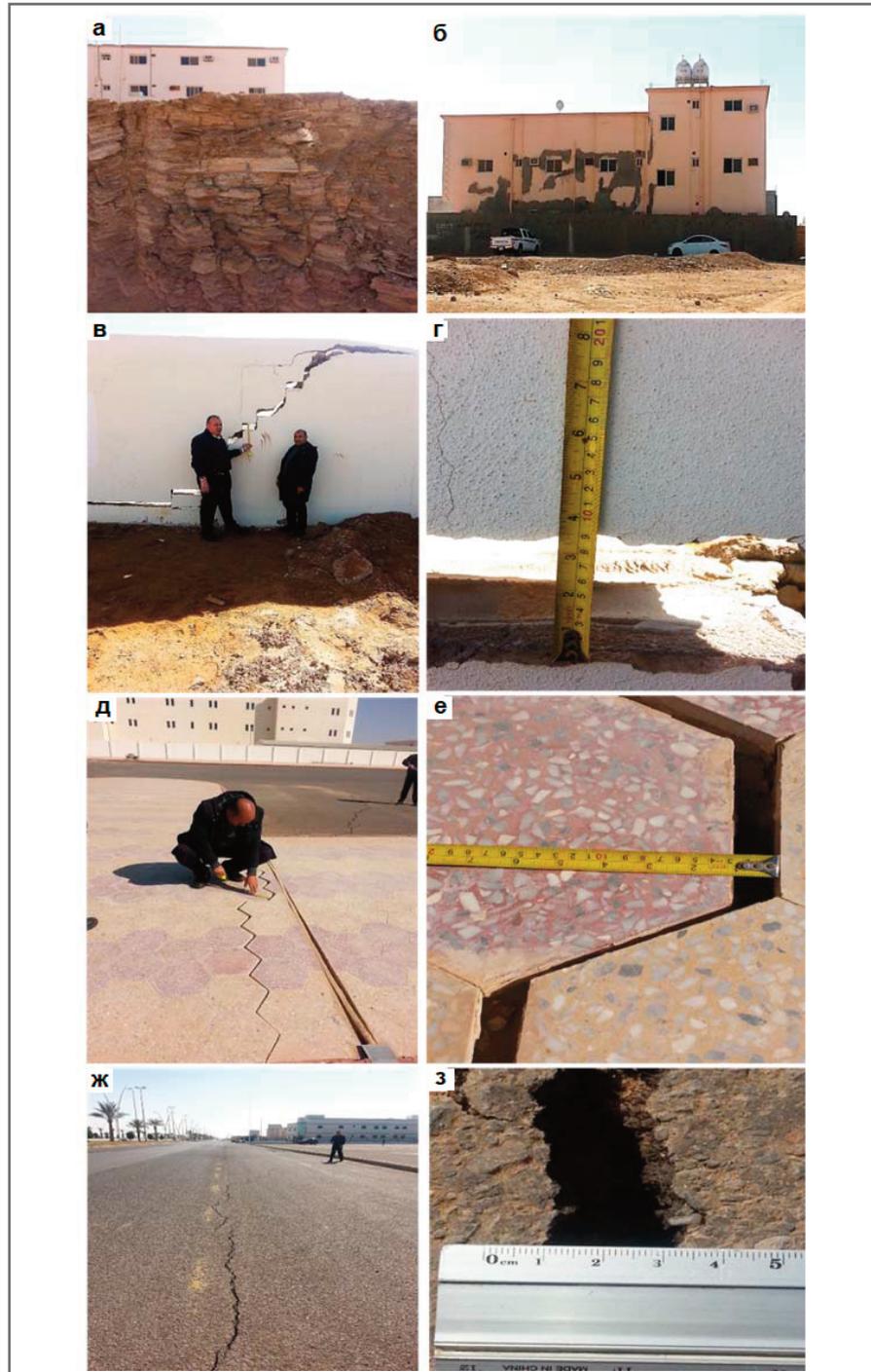


Рис. 2. Некоторые последствия набухания сланцев на территории города Табук (Саудовская Аравия): а, б – трещины и разрушения в стенах домов; в, г – трещины в ограждениях; д, е – трещины на пешеходных дорожках (расхождение плиток); ж, з – трещины на автомобильных дорогах

тории города Табук разделена (рис. 3) на четыре слоя (сверху вниз);

1) поверхностно перенесенные рыхлые пылеватые и глинистые пески от серого до коричневого цвета общей мощностью 0,5–2 м;

2) сильно или полностью выветрелые сланцы от коричневых до зеленоватых общей мощностью 0,5–3 м;

3) тонкослоистые илистые и глинистые сланцы от коричневатых до зеленоватых с тонкими прослоями или лин-

зами песчаников и тонкими линзами гипса общей мощностью 3–20 м;

4) коренные породы – песчаники от мелко- до среднезернистых с прослоями сланцев.

Некоторые из указанных слоев представлены на одних территориях и отсутствуют на других. Например, в таких районах города Табук, как Аль-Кадисия или Аль-Масиф, отсутствуют верхние два слоя и здания построены непосредственно на сланцах, которые являются

набухающими грунтами, характерными для этого региона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Подготовка образцов

Ненарушенные образцы сланцев были взяты из разведочного шурфа с поперечным сечением 2 м × 4 м, выкопанного на глубину 1 м от поверхности сланцев с помощью экскаватора производства компании Rosclain в районе Аль-Кадисия города Табук (Саудовская Аравия). Поверхность сланцев, от которой копали, предварительно была очищена от рыхлых материалов. Внутри сланцев под действием гидравлического давления плавно и осторожно были введены 7 цилиндрических пробоотборников (далее – форм). Вокруг последних был вынут грунт, после чего поднимались наверх сами пробоотборники с монолитами внутри. Монолиты в этих формах выравнивали с обеих сторон, помещали на перфорированную основу, покрывали воском и хранили при температуре 25 °С во влажной камере в геотехнической лаборатории.

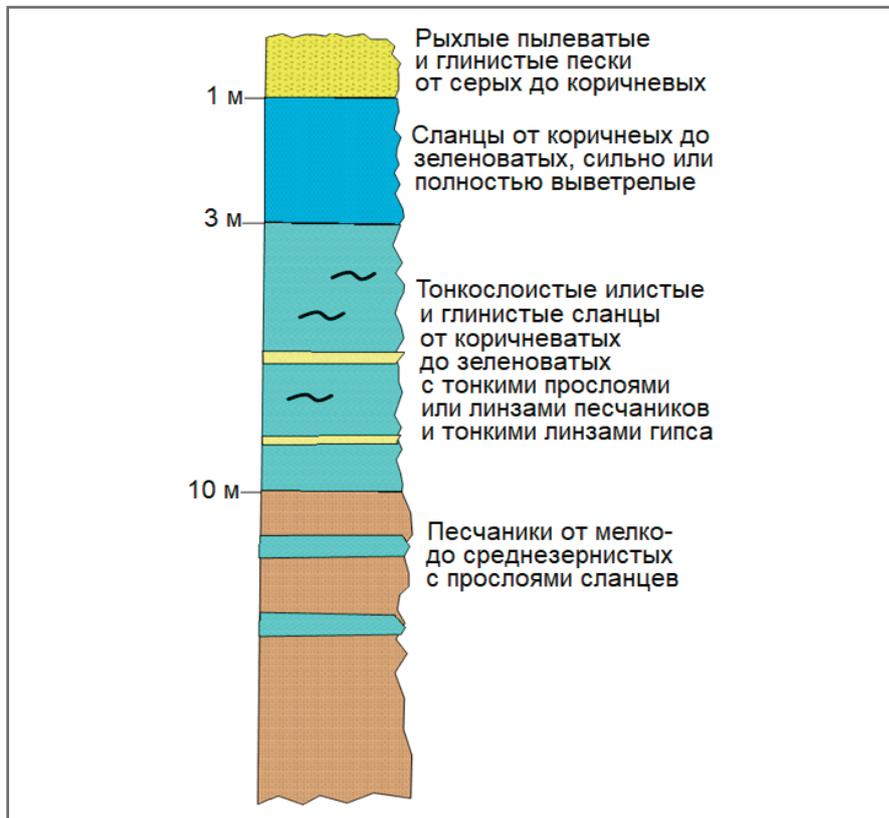


Рис. 3. Примерная верхняя часть разреза города Табук (Саудовская Аравия)

Таблица 1. Свойства сланцев района Аль-Кадисия города Табук (Саудовская Аравия)				
Показатель	Величина	Показатель	Величина	
Предел текучести <i>LL</i> , %	44	Гранулометрический состав	глинистая фракция, %	27,9
Предел пластичности <i>PL</i> , %	35		пылеватая фракция, %	68,6
Индекс пластичности <i>PI</i> , %	13		песчаная фракция, %	3,5
Предел усадки <i>SL</i> , %	16	Классификация по USCS		ML (тугопластичный илстый грунт)
Содержание воды (влажность), %	3,2	Результаты рентгеноструктурного анализа	содержание каолинита, %	73
Активность <i>A</i> (соотношение пластичности и количества глинистых частиц, которое отражает склонность грунта к набуханию и усадке)	0,6		содержание иллита, %	7
Свободное набухание, %	19	Давление набухания по результатам лабораторных испытаний, кгс/см ²		2,23
Плотность сухого грунта, кг/см ³	2,19	-	-	-
Плотность, кг/см ³	2,73	-	-	-
Коэффициент сжимаемости	0,0112	-	-	-
Давление набухания по результатам одометрического испытания, кгс/см ²	8,0	-	-	-
Мощность активной зоны, м	2–3,5	-	-	-



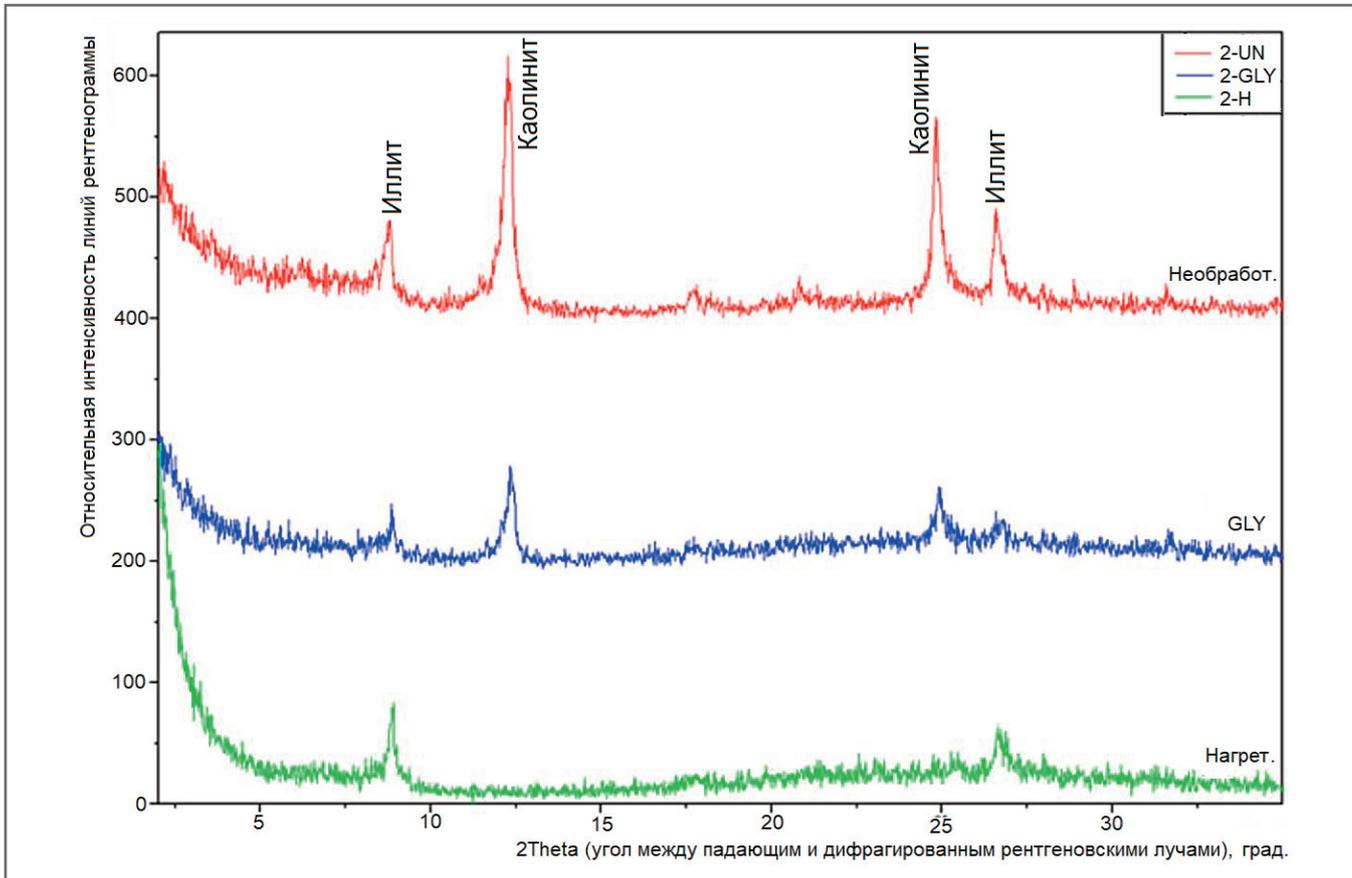


Рис. 4. Результаты количественной оценки минералогического состава набухающих сланцев на территории района Аль-Кадисия города Табук (Саудовская Аравия) рентгеноструктурным методом

Таблица 2. Свойства материалов подушек, заменяющих набухающие сланцы

Характеристика	Тип замещающего материала					
	песок			гравий		
Средний (медианный) размер частиц, мм	0,15			7,22		
Описание грунта	хорошо сортированный (плохо градуированный)			хорошо сортированный (плохо градуированный)		
Классификация по USCS	SP			GP		
Классификация по AASHTO	A-3			A-1-a		
Номер образца сланца в пробоотборнике	1	2	3	4	5	6
Толщина замещающей подушки, % от высоты исходного образца сланца	44	33	22	44	33	22

Свойства сланцев ►

Были измерены и проанализированы физические, геотехнические и минералогические свойства образцов сланцев (таблица 1, рис. 4). Они состояли преимущественно из пылеватых (примерно 68,6%), глинистых (около 27,9%) и песчаных (примерно 3,5%) по размеру зерен. Согласно Унифицированной системе классификации грунтов (Unified Soil Classification System – USCS) этот грунт классифицируется как тугопластичный илистый (ML) сланец. Среднее природное содержание влаги в образцах со-

ставляло около 3,2%. Средние пределы текучести LL , предел пластичности PL , индекс пластичности PI и предел усадки SL составляли 44, 35, 13 и 16% соответственно. Активность сланца и свободное набухание были 0,6 и 19% соответственно.

Результаты испытаний на пределы Аттерберга и свободное набухание (таблица 1) показали, что исследуемые сланцы обладают потенциалом набухания от низкого до среднего [34–38]. Активная зона расположена в пределах общей толщины сланцев, на которые

влияют изменения в содержании влаги [39]. На исследуемой территории мощность этой зоны колеблется от 2 до 3,5 м.

Оценка минералогического состава изученных сланцев была проведена с использованием рентгеноструктурного (рентгенодифракционного) анализа (см. рис. 4). Рентгенограммы показали, что преобладающими минеральными составляющими исследованных сланцев являются каолинит и небольшое количество иллита (см. таблицу 1, рис. 4). Но не прослеживается такой глинистый

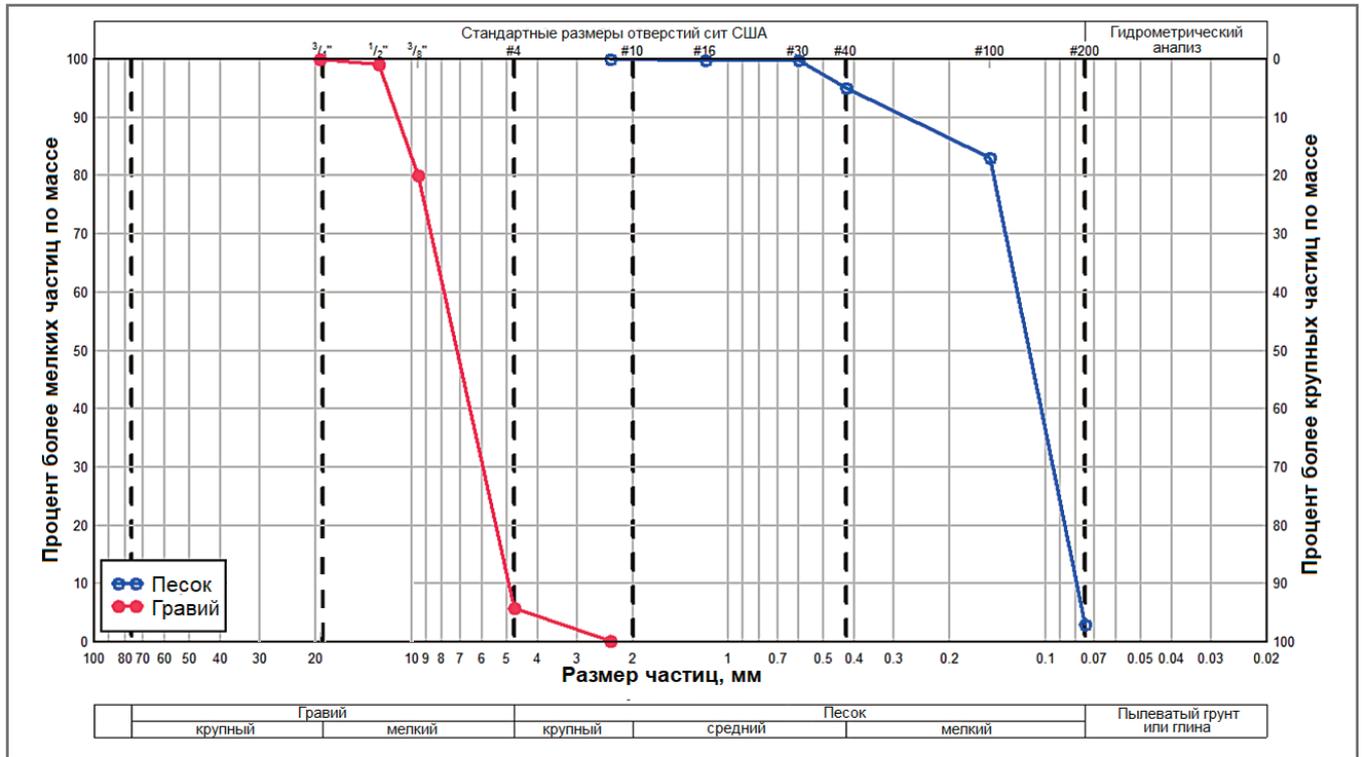


Рис. 5. Гранулометрический состав материалов (песка и гравия) подушек, замещающих набухающие сланцы

минерал с расширяющейся решеткой, как монтмориллонит.

Свойства материалов, предназначенных для замещения набухающих грунтов

Для частичной замены образцов набухающих сланцев использовались два разных типа подушек из достаточно крупнозернистых материалов (из песка и из гравия) разной толщины. Свойства и гранулометрический состав этих материалов приведены в таблице 2 и на рисунке 5. Средние (медианные) размеры частиц песка и гравия составляли 0,15 и 7,22 мм соответственно. И песок, и гравий были хорошо сортированными (то есть плохо градуированными, поскольку большинство их частиц были примерно одинакового размера). В соответствии со стандартами Американской ассоциации должностных лиц государственных дорожных и транспортных служб (AASHTO) материалы подушек были классифицированы как гранулированные, относящиеся к группам А-3 и А-1-а для песка и гравия соответственно.

Оборудование для испытаний и их методика

При испытании, по существу, вертикальную измерялся вертикальный подъем верхней поверхности образца сланца, помещенного под дополнительную на-

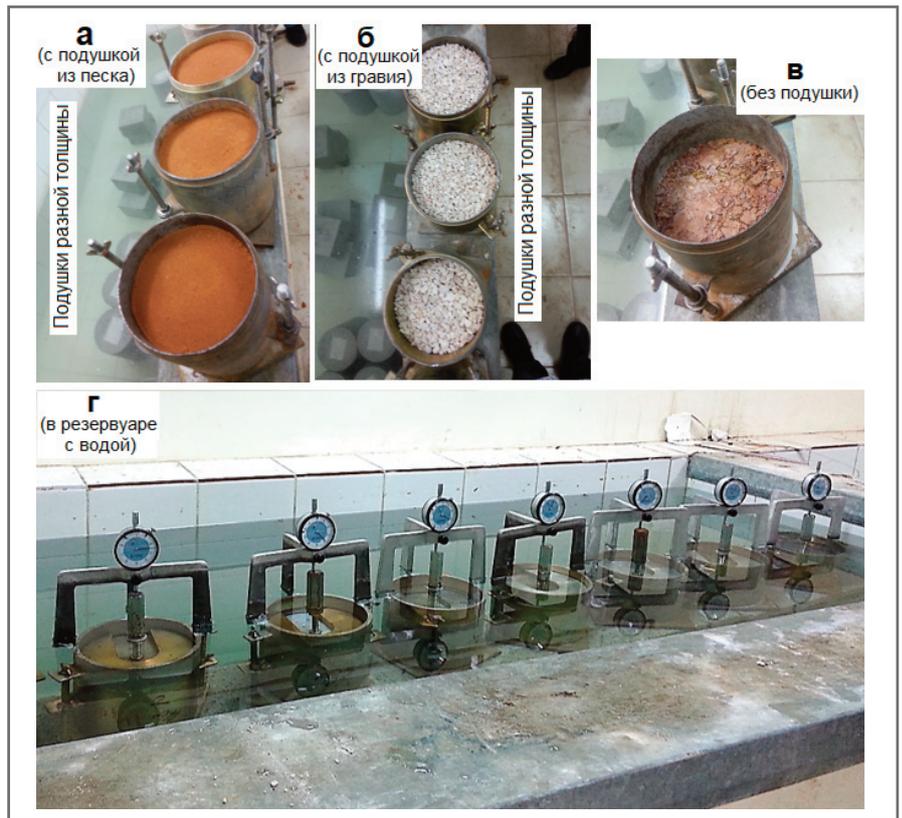


Рис. 6. Испытания на набухание семи ненарушенных образцов сланцев в цилиндрических формах: а – до испытаний в трех формах сверху была заменена определенная доля сланцев на песчаные подушки разной толщины (22, 33 и 44% от исходной высоты сланца в образце); б – в трех других формах были выполнены аналогичные замены на гравийные подушки; в – один образец остался без замены (для контроля и сравнения); г – после предварительной подготовки все семь форм с образцами погрузили в резервуар с водой и закрепили на них циферблатные индикаторы набухания с ценой деления 0,01 мм

грузку и контактирующего с водой внутри формы. При лабораторных испытаниях использовались семь форм с образцами (диаметром 15 см и высотой 30 см)

с перфорированным основанием. Испытания на набухание и на компрессионное сжатие проводились для семи форм с ненарушенными образцами сланцев в следующей последовательности:

1) удаляли воск и выравнивали верхнюю и нижнюю поверхность каждого образца;

2) для оценки плотности каждого сухого образца измеряли его длину (высоту) внутри формы и массу формы; оценивали плотность;

3) к каждому образцу прикладывалась вертикальная нагрузка величиной 7 кПа, что было близко к эффективному напряжению, действующему на этот грунт *in situ*;

4) в каждой форме верхняя часть сланца заменялась на слой (подушку) песка или гравия той или иной толщины (см. таблицу 2, рис. 6); но в последней форме № 7 был оставлен только природный сланец для последующего сравнения с поведением образцов с замещающими подушками (см. рис. 6);

5) к каждому образцу сверху была приложена дополнительная нагрузка величиной 7 кПа в соответствии с глубиной отбора образца и весом вышележащего грунта; затем формы с образцами погрузили в резервуар с водой и закрепили на них циферблатные индикаторы вертикального подъема верхней поверхности образца с ценой деления 0,01 мм (см. рис. 6), причем температура воды в резервуаре и температура воздуха в помещении поддерживались на постоянном уровне (25 °С) (см. рис. 6);

6) в первые сутки показания индикаторов снимались через каждый час, а со следующего дня показатели набухания регистрировались через каждые 24 часа в течение 24 дней;

7) после достижения постоянного набухания (или с очень незначительными

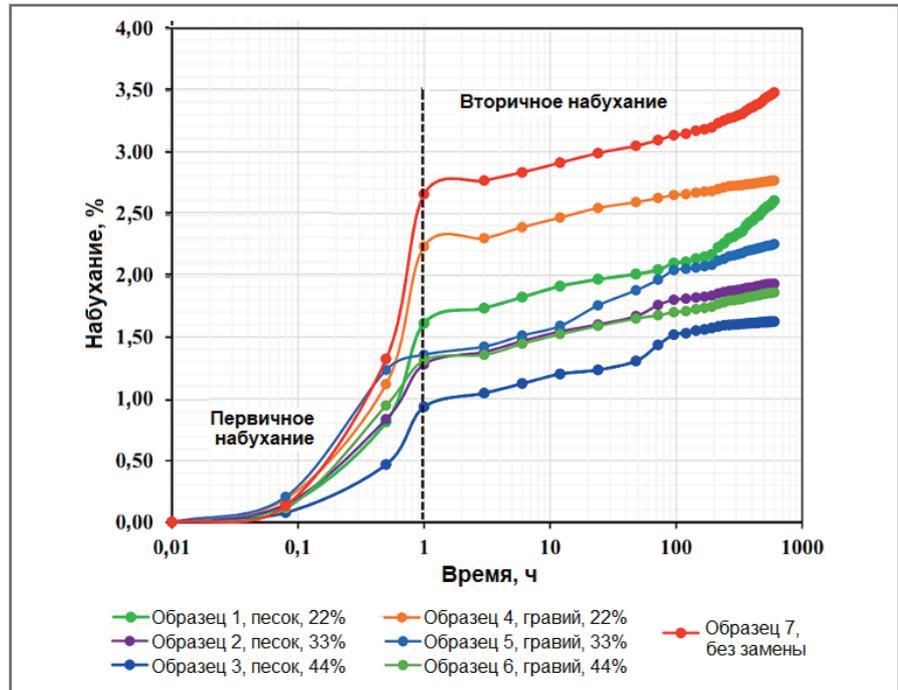


Рис. 7. Развитие набухания испытанных образцов во времени, представленном в логарифмическом масштабе, при замене определенной доли сланцев сверху на подушки разного типа и разной толщины (в % от исходной высоты образца сланца)

изменениями) испытание прекращали и для каждого образца регистрировали окончательную величину набухания;

8) формы с образцами извлекали из резервуара с водой; затем прикладывали к образцам последовательные нагрузки, чтобы привести их высоту к первоначальной (до набухания), и для каждого из них регистрировали нагрузку как давление набухания;

9) для каждого образца определяли содержание влаги через каждые 2–3 см по глубине;

10) отражали связь между временем (ч) и величиной набухания (%) для всех образцов в целях определения оптимального сочетания толщины и типа замещающей подушки.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ►

Процент изменения (уменьшения или увеличения) величины любой характеристики набухания (например, высоты образца) оценивали путем сравнения ее значений до и после испытания, как описано в работе Эль-Холи [24]:

$$\text{Набухание (\%)} = \frac{(\text{Величина до испытания}) - (\text{Величина после испытания})}{(\text{Величина до испытания})} \times 100\%$$

Давление набухания рассчитывали по нагрузке, приложенной для приведения образца к его первоначальной высоте. Развитие набухания образцов с замещающими подушками из разных типов грунта и разной толщины во времени графически показаны на рисунке 7 и в таблицах 3 и 4.

Таблица 3. Набухание, давление набухания и влажность образцов сланцев после испытаний

№ образца	Замещающий грунт (подушка)		Набухание, %	Давление набухания, кгс/см ²	Конечная влажность, %
	тип	толщина, % от исх. высоты образца			
1	песок	44	1,63	0,83	10,80
2		33	1,93	0,96	11,80
3		22	2,6	1,11	12,20
4	гравий	44	1,86	1,35	11,65
5		33	2,25	1,55	12,50
6		22	2,77	1,70	13,89
7	без замены (контроль)	-	3,48	2,23	13,93

Таблица 4. Уменьшение набухания и давления набухания образцов сланцев с замещающими подушками разных типов и разной толщины по сравнению с образцом без замены

№ образца	Замещающий грунт (подушка)		Уменьшение, %	
	тип	толщина, % от исх. Высоты образца	набухания, %	Давления набухания, кгс/см ²
1	песок	44	53,29	62,78
2		33	44,49	56,95
3		22	25,14	50,22
4	гравий	44	46,50	39,46
5		33	35,28	30,49
6		22	20,49	23,77

На основании рисунка 7 можно заключить, что кривая потенциального набухания состоит из двух стадий. На первой набухание протекает очень быстро. Эта фаза начинается, когда образец заливается водой. Она соответствует макроскопическому набуханию, определяемому в первую очередь проницаемостью слоев и градиентом всасывания.

На второй стадии происходит медленно прогрессирующее микроскопическое набухание вплоть до времени, необходимого для стабилизации. В течение данной фазы идет постепенный процесс адсорбции катионов глинистыми минералами. Эта гидратация обусловлена наличием воды в порах.

Набухание образцов наблюдалось в течение примерно 600 ч, после чего изменения в его величинах стали очень незначительными или вообще отсутствовали.

Результаты испытаний показали, что замена сланца на подушку из песка в целом более эффективно уменьшает набухание (рис. 8). При этом толщина подушки влияет на характер этого процесса. Из испытанных вариантов песчаная подушка толщиной 44% от первоначальной высоты образца сланца уменьшила набухание больше, чем подушки другой толщины и из гравия (см. таблицы 3, 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Испытания ненарушенных образцов сланцев из района Аль-Кадисия города Табук (Саудовская Аравия) с использованием одометра показали, что давление набухания этих сланцев в среднем составляет 8 кгс/см². Этот результат был получен в лаборатории для небольшой выборки. Реальное же давление набухания в полевых условиях должно быть гораздо меньше и может быть принято за треть указанного вы-

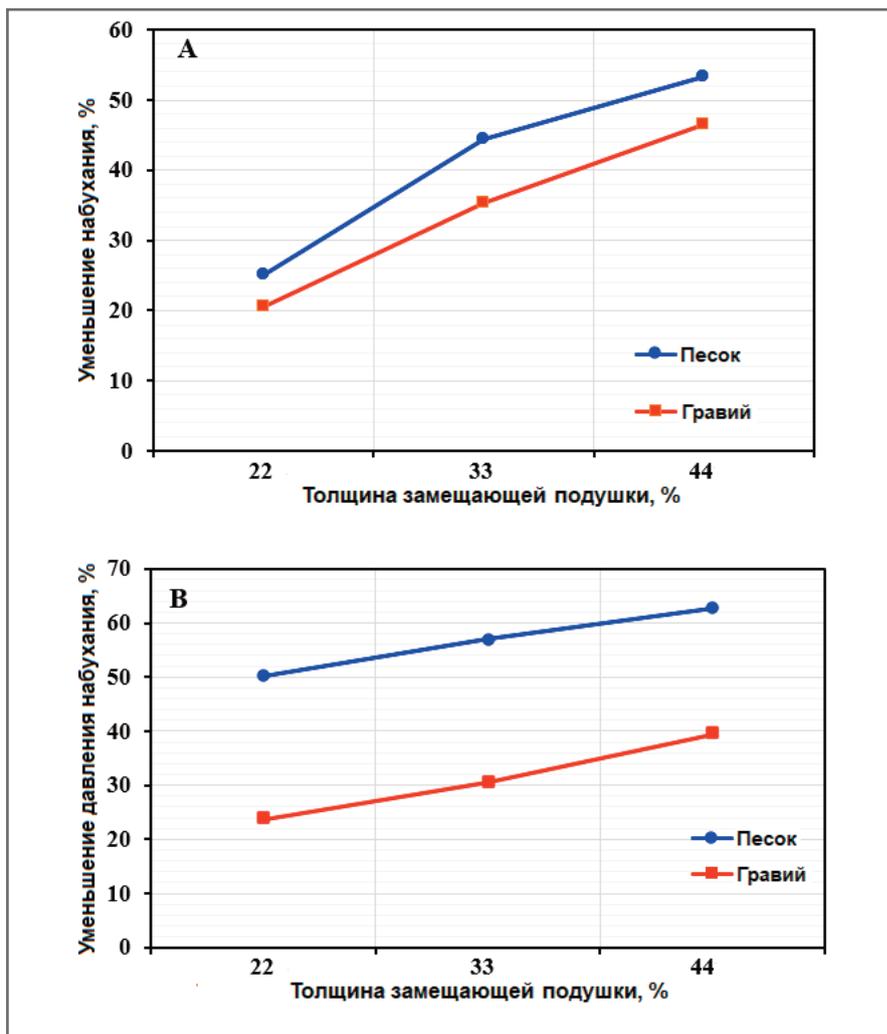


Рис. 8. Влияние толщины и типа замещающей подушки на уменьшение набухания и давления набухания сланца из района Аль-Кадисия города Табук (Саудовская Аравия)

ше значения [40, 41]. Тогда давление набухания исследуемых сланцев в условиях их естественного залегания (неограниченного поля) составит 2,66 кгс/см².

Среднее значение давления набухания, полученное в результате лабораторных испытаний, описанных в настоящей статье, составило 2,23 кгс/см². И его предлагается использовать при

проектных расчетах для строительства на конкретной рассматриваемой территории.

Потенциал набухания уменьшается при увеличении толщины замещающих подушек двух рассмотренных типов (рис. 8). В случае использования песчаной подушки толщиной 44% от исходной высоты образца конечное относительное набухание сланца снижа-

ется примерно на 53,29% (см. рис. 8, таблицу 4).

Замена сланца на песчаную подушку снижает потенциал набухания больше по сравнению со слоем гравия. Относительное уменьшение набухания при песчаной подушке толщиной 33% от исходной высоты образца сланца и при гравийной подушке толщиной 44% практически одинаково и составляет 44,5 и 46,5% соответственно.

Давление набухания исходного ненарушенного образца сланца, составляющее 2,23 кгс/см², может быть уменьшено до 0,83 кгс/см² (см. таблицу 4) при песчаной подушке толщиной 44%. Следовательно, наилучшим выбором для снижения набухания и давления набухания из рассмотренных вариантов является использование замещающей подушки из песка толщиной 44% от исходной высоты образца сланца.

Набухание и давление набухания (кгс/см²) уменьшаются сильнее за счет увеличения толщины заменяющего материала, а также при использовании для замены песка по сравнению с гравием.

В полевых условиях давление набухания исходного сланца, равное 2,23 кгс/см², может быть уменьшено до 0,83 кгс/см² с помощью замены его верхней части на песчаную подушку толщиной 1,5 м при максимальной мощности активной зоны 3,5 м (указанной в таблице 1).

РЕКОМЕНДАЦИИ ►

1. Величина давления набухания сланца из района Аль-Кадисия города Табук (Саудовская Аравия), полученная в результате лабораторных испытаний, составила 2,23 кгс/см². Это значение предлагается использовать при проектных расчетах для строительства на конкретной территории, рассматриваемой в настоящей статье. В случае легких строений нагрузки от их собственного веса составляют менее 2,23 кгс/см². И тогда рекомендуется заменять склонные к набуханию сланцы подушками из мелкого или среднего песка толщиной 1,5 м для снижения давления набухания до 0,83 кгс/см². Это значение также предлагается применять для проектных расчетов при строительстве на рассматриваемой территории.

2. При использовании подушек из песка/гравия для замены склонных к набуханию сланцев следует соблюдать осторожность, поскольку песок и гравий являются водопроницаемыми грунтами и не препятствуют проникновению воды в подстилающие их сланцы, а это может привести к набуханию последних. Поэтому рекомендуется устанавливать горизонтальный пластиковый барьер поверх песчаной/гравийной подушки, чтобы исключить просачивание воды через нее в залегающие ниже грунты.

3. Кроме того, рекомендуется использовать замену склонных к набуханию сланцев подушкой из мелкого или среднего песка, который в изобилии имеется в Саудовская Аравии. Стоимость применения песчаных подушек может быть более экономичной по сравнению с другими типами замен или стабилизации сланцев, поскольку для этого не требуется специальная строительная техника (например, дисковые бороны, смесители, распределители, распылители или др.). **И**

Исследование, представленное в данной статье, было проведено для подготовки магистерской диссертации на факультете естественных наук Университета Дамьетты (г. Дамьетта, или Думьят, Египет). Авторы выражают большую признательность профессору и доктору наук Ахмеду Базалу (Ahmed Basal) за многолетнее сотрудничество и плодотворные научные дискуссии. Авторы также очень благодарны доктору наук Абеду Эль Кариму (Abed El Kareem) и инженеру Хикмату Эль Росттуму (Hikmat El Rosttum), владельцу компаний Soil & Foundation Co. (Safco) и Geotechnical & Environmental Co. (Geco) за предоставление лабораторного оборудования для геотехнических испытаний.

ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►

(SOURCE FOR THE TRANSLATION) ►

Embaby A.A., Abu Halawa A., Ramadan M. An experimental study to mitigate swelling pressure of expansive Tabuk shale, Saudi Arabia // International Journal of Geological and Environmental Engineering. World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET), 2017. Vol. 11, № 1. URL: <https://publications.waset.org/10006392/an-experimental-study-to-mitigate-swelling-pressure-of-expansive-tabuk-shale-saudi-arabia>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ АВТОРАМИ ПЕРЕВЕДЕННОЙ СТАТЬИ ►

(REFERENCES USED BY THE AUTHORS OF THE TRANSLATED PAPER) ►

1. Chen F.H. Foundations on expansive soils (2nd ed). Amsterdam: Elsevier, 1988. 463 p.
2. Jones D.E., Holtz W.G. Expansive soils – the hidden disaster // Civil Engineering. ASCE, 1973. Vol. 43. № 8. P. 49–51.
3. Snethen D.R. Expansive soils: where are we? // Ground failure. Washington, DC: National Research Council Communication on Ground Failure Hazards, National Research Council, 1986. № 3. P. 12–16.
4. Al-Muhaidib A. Characteristics of expansive soil in the Kingdom of Saudi Arabia // Journal of King Saud University (Engineering Sciences). 2003. Vol. 16. № 1. P. 1–34.
5. Slater D.E. Potential expansive soils in Arabian Peninsula // Geothermal Engineering. American Society for Civil Engineering, 1983. Vol. 109. № 5. P. 744–746.
6. Dhowian A., Ruwiah I., Erol A. The distribution and evaluation of the expansive soils in Saudi Arabia // Proc/of the 2nd Saudi Eng. Conf. King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, 1985. Vol. 4. P. 1969–1990.
7. Al-Refeai T., Al-Ghamdy D. Geological and geotechnical aspects of Saudi Arabia // Geotechnical & Geological Engineering. 1994. Vol. 12. № 4. P. 253–276.

8. Al-Muhaidib A. Swelling behaviour of expansive shales from the Middle Region of Saudi Arabia // *Geotechnical & Geological Engineering*. 1998. Vol. 16. № 4. P. 291–307.
9. Elkady T., Abbas M. Shear strength behavior of highly expansive soil // *GeoCongress*. 2012. P. 2532-2541.
10. Ruwaih I.A., Experiences with expansive soils in Saudi Arabia // *Proceedings of 6th International Conference on Expansive Soils*, New Delhi, India, 1987. P. 317–322.
11. Abduljawad S.N., Ahmed R. Expansive soil in Al-Qatif area // *Arabian Journal for Science and Engineering (AJSE)*. 1990. Vol. 15. № 2A. P. 133–144,
12. Abduljawad S.N. Swelling behavior of calcareous clays from the eastern province of Saudi Arabia // *Journal of Engineering Geology*. 1994. Vol. 27. P. 333–351.
13. Azam S. Engineering behaviour of clay-bearing calcium sulphate in Dammam Dome, Eastern Saudi Arabia // *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2008. Vol. 67. P. 521–528.
14. Dafalla M.A., Al-Shamrani M.A. Performance-based solutions for foundations on expansive soils, Al-Ghatt region, Saudi Arabia // *GEOCHIANGMAI 2008*, Chiangmai, Thailand.
15. Dhowian A.W. Characteristics of expansive clay-shale in the northern region of Saudi Arabia // *Proceedings of the 5th International Conference on Expansive Soils*, Adelaide, South Australia, 1984. P. 316–320.
16. Erol A.O., Dhowian A. Swell behavior of arid climate shale from Saudi Arabia // *Journal of Engineering Geology*. 1990. Vol. 23. P. 243–254.
17. Sabtan A.A. Geotechnical properties of expansive clay shale in Tabuk, Saudi Arabia // *Journal of Asian Earth Science*. 2005. Vol. 25. № 5. P. 747–757.
18. Dafalla M.A., Al-Shamrani M.A. Expansive soil properties in a semiarid region // *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*. 2012. Vol. 4. P. 930–938,
19. Dafalla M.A., Mutaz E., Al Humimidi M., Oumar L.A., Al-Shamrani M. Shale failure and cracking in a semi-arid area // *International Journal of GEOMATE*. 2013. Vol. 5. № 2. P. 696–699.
20. Clemence S., Finbarr A. Design considerations for collapsible soils // *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE, 1981. Vol. 107. P. 305–318,
21. Fredlund D.G., Rahardjo H. *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York: John Wiley & Sons, 1993.
22. Nelson J.D., Miller D.J. *Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering*. New York: John Wiley & Sons, 1992.
23. Day R.W. *Expansive soils: recent advances in characterization and treatment (1st ed.)*. Taylor & Francis, 2006.
24. El-Kholy S.M. Improving the characteristics of expansive soil using coarse-grained soil // *Journal of Engineering and Computer Sciences*. Qassim University, 2008. Vol. 1. № 2. P. 71–81,
25. Abu Seif E.S. Efficiency of quicklime in reducing the swelling potential of pulverized expansive shale, Northern Jeddah, Saudi Arabia // *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2015. Vol 74. P. 637–650.
26. International Building Code (IBC) and International Residential Code (IRC). 2006.
27. Satyanarayana B. Swelling pressure and related mechanical properties of black cotton soils: PhD thesis. Bangalore, 1966.
28. Katti R.K. Search for solutions to problems in black cotton soils: 1st Indian Geotechnical Society Annual Lecture // *Indian Geotechnical Journal*. 1978. Vol. 9. № 1. P. 1–88.
29. Aly A. Assessment of drying-wetting cycles for mitigation the potential of expansive soil in Upper Egypt // *Journal of Applied Sciences Research*. 2009. Vol. 12. P. 2277–2284.
30. Lytton R., Aubeny C., Bulut R. Design procedures for pavements on expansive soils: Project № 0-4518. Report 0-4518-1. 2004. Vol. 1.
31. California Building Standards and Codes for Residential Structures. 2010.
32. Holtz W.G., Gibbs G.J. Engineering properties of expansive clays // *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 1956. Vol. 121. P. 641–677.
33. Holtz W.G. Expansive clays properties and problems. Quart: Colorado School of Mines, 1959. Vol. 54. P. 89–117.
34. Seed H.B., Woodward R.J., Lundgren R. Prediction of swelling potential for compacted clays // *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*. ASCE, 1962. Vol. 88. P. 53–87. 1962.
35. Van Der Merwe D.H. The prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fraction of soils // *Civil Engineers in South Africa*. 1964. Vol. 6. P. 337–342.
36. Carter M., Bentley S.P. *Correlation of soil properties*. Pentech Press, London, 1991.
37. Sridharan A., Prakash K. Classification procedures for expansive soils // *Geotechnical Engineering: proc. ICE (UK)*. 2000. Vol. 143. P. 235–240.
38. Mitchell J.K., Soga K. *Fundamentals of soil behavior (3rd ed.)*. New York: John Wiley and Sons Inc., 2005.
39. Nelson J.D., Overton D.D., Durkee D.B. Depth of wetting and the active zone // *Proceedings of the Geo-Institute Shallow Foundation and Soil Properties Committee Sessions at the ASCE: Civil Engineering Conference*, Houston, Texas, October 2001. P. 10–13.
40. Al-Shamrani M.A., Al-Muhaidib A.I. Prediction of potential vertical swell of expansive soils using a triaxial stress path cell // *Journal of Engineering Geology*. 1999. Vol. 32. P. 45–54.
41. Al-Shamrani M.A., Dowian A.W. Experimental study of lateral restraint effects on the potential heave // *Journal of Engineering Geology*. 2003. Vol. 69. P. 63–81,