DOI: 10.65322/j.srd.06202026.24

ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ ИНЪЕКЦИОННО ЗАКРЕПЛЁННОГО ГРУНТА ПО ИНТЕРВАЛАМ ГЛУБИНЫ

Акбарова Д.Б., *научный исследователь,*
специальность «Механика грунтов и горных пород»,
Белорусско-Узбекский межотраслевой институт
прикладных технических квалификаций в г. Ташкенте

Аннотация. *Выполнен численный анализ поинтервального контроля песчаного основания после инъекционного закрепления. Для шести заданных интервалов сопоставлены коэффициент фильтрации и минимальная прочность трёх образцов при одноосном сжатии в возрасте 28 суток. Перебраны все 63 непустые выборки и 1 581 сочетание границ изменения показателей. Из двадцати выборок по три интервала шестнадцать содержали локальное отклонение, а оценка по средним выявила нарушение только в одной. При границах ±20 % по коэффициенту фильтрации и ±0,12 МПа по прочности три интервала устойчиво удовлетворяли условиям, два устойчиво их нарушали, для одного требовалось уточнить прочность.*

Annotatsiya. *Sement suspenziyasi bilan mustahkamlangan qumda sinov natijalarini o‘rtachalash mahalliy nuqsonlarni qachon yashirishi sonli tajribada tekshirildi. Oltita shartli chuqurlik intervalining har biri uchun filtratsiya koeffitsiyenti va uchta namunaning 28 sutkalik bir o‘qli siqilishdagi eng kichik mustahkamligi solishtirildi. Intervallardan tuziladigan barcha 63 ta bo‘sh bo‘lmagan tanlanma hamda ikki ko‘rsatkich uchun o‘zgarish chegaralarining 1581 ta birikmasi hisoblandi. Uchtadan interval olingan yigirmata tanlanmaning o‘n oltitasida mahalliy chetga chiqish bor, lekin o‘rtacha qiymatlar faqat bittasida talab buzilganini ko‘rsatdi. Filtratsiya koeffitsiyenti ±20 foiz va mustahkamlik ±0,12 MPa o‘zgartirilganda uchta interval talablarga javob berdi, ikkitasi javob bermadi va bittasida mustahkamlikni aniqlashtirish zarur bo‘ldi.*

Abstract. *This computational study examines how averaging conceals local departures in cement-grouted sand. Six prescribed depth intervals were each assigned a hydraulic conductivity and the minimum 28-day unconfined compressive strength of three specimens. All 63 nonempty subsets and 1,581 combinations of uncertainty bounds were evaluated. Of twenty subsets of three intervals, sixteen included a local departure, but only one failed the pooled check. Under bounds of ±20% for conductivity and ±0.12 MPa for strength, three intervals remained conforming, two remained nonconforming and one required a further strength test.*

Ключевые слова: *инъекционное закрепление, коэффициент фильтрации, прочность при одноосном сжатии, контрольная скважина, интервал глубины, критерии приёмки.*

Kalit so‘zlar: *gruntni inyeksiya bilan mustahkamlash, filtratsiya koeffitsiyenti, bir o‘qli siqilishdagi mustahkamlik, nazorat qudug‘i, chuqurlik intervali, qabul mezonlari.*

Keywords: *permeation grouting, hydraulic conductivity, unconfined compressive strength, verification borehole, depth interval, acceptance criteria.*

Введение. В основании гидротехнического или подземного сооружения инъекционное закрепление песка может одновременно решать две задачи: ограничивать фильтрационный расход и повышать сопротивление грунта нагрузке. Для каждой задачи требуется своё наблюдение. Через проницаемый прослой вода может обходить участок, из которого извлечён прочный керн. И наоборот, песок с большим содержанием мелких частиц способен слабо пропускать воду и при недостаточной прочности цементных связей. Если результаты испытаний объединить по всему контрольному сечению, сведения о таком расхождении могут исчезнуть из заключения о качестве работ.

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.24

Техническая спецификация на инъекционное заполнение пустот и закрепление грунтов методом пропитки предусматривает проверку результата в зависимости от цели обработки [1]. В опытах с тонкодисперсным портландцементом увеличение водоцементного отношения улучшало проникновение суспензии в исследованные пески, но снижало прочность закреплённых образцов при одноосном сжатии [2]. Устойчивость суспензии также влияла на получаемые гидравлические и механические свойства [3]. При сопоставлении механических показателей существенны схема нагружения и возраст образца. Результат трёхосного испытания с боковым обжатием нельзя непосредственно сравнивать с пределом прочности при одноосном сжатии. При прочих равных условиях с возрастом меняются как прочность, так и жёсткость закреплённого песка [4].

Цель исследования — установить, при каких условиях решение по двум средним показателям расходится с оценкой тех же результатов по интервалам глубины. Для этого отдельно варьировали состав выборки и границы изменения каждого измеряемого показателя. Такой подход позволяет различить три причины неопределённого или ошибочно благоприятного заключения: неблагополучный интервал пропущен при обследовании, измеренное отклонение скрыто усреднением либо имеющаяся точность не позволяет однозначно оценить результат вблизи границы.

Материалы и методы. ***Расчётное сечение и контролируемые показатели.*** Расчётная схема включает три условные контрольные скважины A, B и C в насыщенном песке, закреплённом цементной суспензией. Для каждой скважины заданы два интервала равной длины: верхний на глубине 4–6 м и нижний на глубине 6–8 м. В таблице 1 каждому интервалу поставлены в соответствие коэффициент фильтрации k и показатель прочности q. Под q понимается наименьшая прочность при одноосном сжатии из трёх пригодных для испытания образцов в возрасте 28 суток. В расчёте заданы шесть пар показателей. Отдельные значения для восемнадцати образцов не моделировались. Натурные измерения и лабораторные испытания в рамках настоящей работы не выполнялись.

Таблица 1

Расчётные показатели по интервалам глубины и результат проверки

Интервал	Глубина, м	k, 10^{-6} м/с	q, МПа	Отклонение
A1	4–6	0,35	1,25	Нет
A2	6–8	0,50	1,20	Нет
B1	4–6	0,55	1,30	Нет
B2	6–8	1,90	1,15	Повышенное k
C1	4–6	0,60	0,75	Пониженное q
C2	6–8	0,48	1,10	Нет

q — минимальная прочность трёх образцов при одноосном сжатии в возрасте 28 суток.

Для численного эксперимента приняты два условия: $k \le 1{,}00 \cdot 10^{-6}$ м/с и $q \ge 1{,}00$ МПа. Равенство граничному значению считается соответствием. Обе границы условны. На объекте их назначают исходя из допускаемого притока или напора, усилий в несущей зоне и согласованной программы контроля. Минимум по трём образцам позволяет сохранить в оценке слабейший испытанный образец, однако не является статистической оценкой обеспеченной прочности массива. По среднему из шести минимумов нельзя восстановить ни среднюю прочность всех образцов, ни её стандартное отклонение.

Гидравлическое и механическое испытания характеризуют разные объёмы грунта. При скважинном определении водопроницаемости в открытой системе на интерпретацию расхода и напора влияют геометрия интервала и условия его изоляции [5]. Негерметичность соединения может завысить водопоглощение, а закупорка стенок буровым шламом — занизить его. В лабораторном приборе с гибкой оболочкой определяют коэффициент

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.24

фильтрации конкретного образца при заданных напряжениях и условиях дренирования [6]. Поэтому сопоставление по глубине означает принадлежность к одному горизонту. Оно само по себе не доказывает, что испытания охватывают одну и ту же фильтрационную неоднородность.

Методика перебора и учёта неопределённости. При поинтервальной оценке для каждого выбранного интервала проверяли оба неравенства и фиксировали вид отклонения. Для сравнения рассчитывали среднее арифметическое значений k и, отдельно, среднее минимумов q по тем же интервалам. При оценке по средним отклонение фиксировали, если хотя бы один показатель нарушал своё условие. Маскировкой считали случай, когда выборка содержала локальное нарушение, но по обоим средним проходила проверку. Равные веса выбраны для сопоставления интервалов одинаковой протяжённости. Полученное среднее k служит здесь показателем, используемым для принятия решения, а не результатом расчёта фильтрации через завесу.

Из шести исходных пар сформировали все непустые сочетания без повторений. Их число равно $2^6 - 1 = 63$. В выборке заданного размера n может не оказаться ни одного из двух неблагополучных интервалов. Число таких случаев равно числу способов выбрать n интервалов из четырёх благополучных. При включении обоих неблагополучных интервалов из той же четвёрки остаётся выбрать $n - 2$ прочих. Эти соотношения дают независимую проверку результатов перебора для каждого значения n. Все комбинации учитывались один раз, без назначения вероятностей.

Во второй части исследования состав сечения оставался неизменным. Для каждого интервала вокруг исходного k задавали относительную полуширину r, а вокруг q — абсолютную полуширину d в МПа. Возможные значения k* и q* ограничивали соотношениями (1) и (2). Такое разделение исходных результатов, условий соответствия и правила принятия решения согласуется с общими принципами оценки соответствия при наличии неопределённости [7]. Границы применены для анализа чувствительности. Статистическая вероятность охвата для них не задавалась.

$$k(1 - r) \le k^* \le k(1 + r) \quad (1)$$

$$q - d \le q^* \le q + d \quad (2)$$

Соответствие считалось устойчивым, если при всех допустимых сочетаниях k* и q* выполнялись оба условия. Устойчивое несоответствие фиксировали, когда хотя бы один показатель оставался за пределом при любом изменении в заданных границах. В остальных случаях требовалось уточнение. Значение r изменяли от 0 до 50 % с шагом в один процентный пункт, d — от 0 до 0,30 МПа с шагом 0,01 МПа. Получено 51 × 31 = 1 581 сочетание и 9 486 поинтервальных оценок. Граничные сравнения выполняли до округления. Проверяли также, что расширение допустимого диапазона не меняет устойчивое соответствие непосредственно на устойчивое несоответствие.

Результаты и обсуждение. ***Отклонения, скрытые при усреднении.*** По всем шести интервалам средний коэффициент фильтрации составил $0{,}73 \cdot 10^{-6}$ м/с, среднее из минимумов прочности — 1,125 МПа. Формально оба средних удовлетворяют условиям. Однако в интервале B2 коэффициент фильтрации превышает предел на 90 %, тогда как прочность выше своего нижнего предела на 15 %. В интервале C1 отклонение имеет другую природу: минимальная прочность ниже требуемой на 25 %, а коэффициент фильтрации составляет лишь 60 % допускаемого. Контроль одного показателя в данном сечении выявил бы только одну из двух проблем.

В таблице 2 отдельно показано, сколько выборок действительно содержат неблагополучный интервал и в скольких случаях его присутствие отражается в решении по средним. Из двадцати троек в четырёх отсутствуют и B2, и C1. Ещё пятнадцать троек содержат хотя бы один из этих интервалов, но проходят проверку по обоим средним.

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.24

Исключение составила тройка B1, B2, C1. Её средний коэффициент фильтрации равен $1{,}0167 \cdot 10^{-6}$ м/с, а среднее минимумов прочности — около 1,067 МПа. В этой выборке представлены оба локальных отклонения, однако измеримый признак нарушения сохранился только по фильтрации.

Таблица 2

Локальные нарушения и их обнаружение по средним значениям

Интервалов в выборке	Всего выборок	Есть нарушение	Есть оба нарушения	Нарушено среднее[1]	Скрыто средними[2]
1	6	2	0	2	0
2	15	9	1	7	2
3	20	16	4	1	15
4	15	14	6	0	14
5	6	6	4	0	6
6	1	1	1	0	1

[1] Нарушено условие хотя бы для одного среднего. [2] В выборке есть локальное нарушение, но по средним значениям выполнены оба условия.

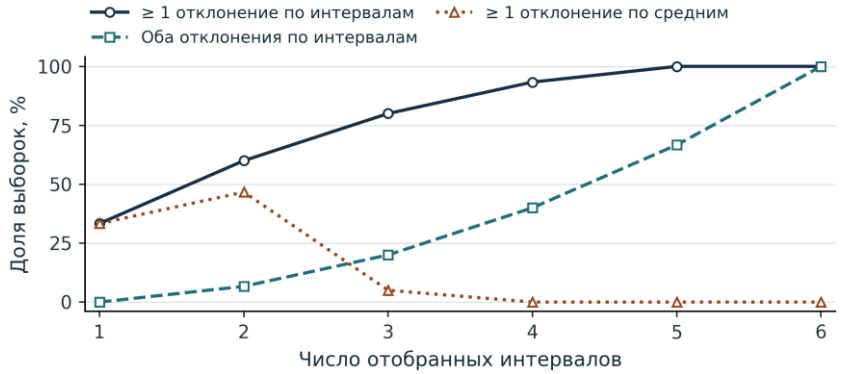

Рисунок 1. Доля выборок с одним или обоими проблемными интервалами и доля выборок, в которых нарушение выявлено по средним значениям

Особенно наглядна пара B2 и C1. При совместной оценке средние составляют $1{,}25 \cdot 10^{-6}$ м/с и 0,95 МПа, то есть нарушены оба условия. После включения благополучного интервала A1 средние меняются до $0{,}95 \cdot 10^{-6}$ м/с и 1,05 МПа. Добавление одной строки снимает оба признака неблагополучия, хотя исходные значения B2 и C1 остались прежними. При интервальной оценке включение нового наблюдения не отменяет уже установленного отклонения. Для проверки локального требования именно это свойство правила определяет его пригодность.

Исчезновение всех нарушений по средним при четырёх и более наблюдениях можно доказать непосредственно. Среднее четырёх наибольших k равно (1,90 + 0,60 + 0,55 + 0,50)/4 = 0,8875 в единицах 10^{-6} м/с. Среднее четырёх наименьших q равно (0,75 + 1,10 + 1,15 + 1,20)/4 = 1,05 МПа. Следовательно, при любом выборе четырёх интервалов даже наименее благоприятные средние проходят проверку. Добавление пятого и шестого интервалов не может ухудшить эти предельные средние. Во всех выборках вместе локальное нарушение скрывается усреднением в 38 случаях.

Состав допустимых выборок зависит и от схемы бурения. Если разрешено исследовать один из двух горизонтов в каждой скважине, возможны восемь троек. В двух будут представлены оба неблагополучных интервала, в четырёх — один и в двух — ни одного. Контроль только верхнего горизонта приведёт к пропуску избыточной проницаемости B2, только нижнего — слабого грунта C1. При обследовании двух скважин

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.24

на полную глубину хотя бы одно отклонение обнаружится в любом из трёх вариантов, но оба выявятся только в одном. Эти количества относятся к заданному расположению интервалов и не характеризуют вероятность обнаружения дефекта на иной площадке.

Чувствительность решения к границам измерений. При r = 20 % и d = 0,12 МПа устойчивое соответствие установлено для A1, A2 и B1. В интервале B2 даже нижняя граница k составляет $1{,}52 \cdot 10^{-6}$ м/с, а в C1 даже верхняя граница q достигает лишь 0,87 МПа. Эти два нарушения сохраняются при наиболее благоприятном изменении определяющего показателя. Для C2 исходный минимум 1,10 МПа проходит проверку, но допустимый диапазон от 0,98 до 1,22 МПа пересекает границу 1,00 МПа. Верхняя оценка k в том же интервале равна $0{,}576 \cdot 10^{-6}$ м/с. Следовательно, основанием для дополнительного испытания здесь служит неопределённость прочности.

Точки смены решения можно определить аналитически. Для C2 устойчивое соответствие сохраняется до d = 0,10 МПа включительно. В C1 устойчивое несоответствие сохраняется при d < 0,25 МПа: при достижении 0,25 МПа в рассматриваемый диапазон впервые входит допустимая прочность. Для B2 переход определяется равенством 1,90(1 − r) = 1,00, откуда r ≈ 47,37 %. На выбранной сетке последнее устойчивое несоответствие по фильтрации приходится на 47 %, а при 48 % оценка уже требует уточнения. Возможность включения границы в область соответствия существенно влияет на интерпретацию именно вблизи порога.

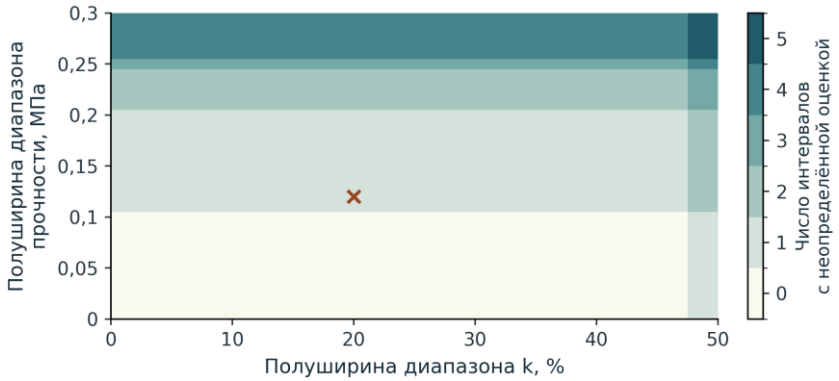

Рисунок 2. Число интервалов с неопределённой оценкой при изменении полуширин r и d. Крестом отмечены расчётные границы r = 20 % и d = 0,12 МПа

Из 9 486 оценок на всей сетке 4 539 соответствуют устойчивому выполнению требований, 2 763 — устойчивому нарушению, в 2 184 случаях однозначного решения нет. Интервал B1 удовлетворяет обоим требованиям при всех сочетаниях. Для C2 изменение r во всём исследованном диапазоне не влияет на решение: в 561 сочетании достаточно прочности, в остальных 1 020 требуется её уточнение. Иную картину даёт B2, где 1 488 устойчивых отказов и 93 случая неопределённости зависят от принятой границы k. Увеличение количества образцов на сжатие само по себе не разрешит вопрос о проницаемости B2.

Если применить те же границы сначала к отдельным результатам, а затем рассчитать наименее благоприятные средние по всему сечению, вывод о пригодности сечения также сохранится. При r = 20 % верхняя оценка среднего k равна 0,73 × 1,20 = 0,876 в единицах 10^{-6} м/с. Нижняя оценка среднего из минимумов прочности равна 1,125 − 0,12 = 1,005 МПа. Оба условия выполнены даже при одновременном изменении всех исходных значений в неблагоприятную сторону. При этом дефицит прочности C1 и повышенная проницаемость B2 остаются установленными. Следовательно, консервативный учёт диапазона измерений при оценке средних не устраняет потери информации о глубине.

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.24

Интерпретация результатов и повторный контроль. Проверку B2 целесообразно начинать с первичного протокола скважинного опыта: исходного напора, изоляции интервала, состояния стенок и учёта поданного расхода. После исключения утечек в оборудовании испытание в соседней скважине на той же отметке позволяет проверить прослеживаемость проницаемого горизонта. Если оба результата неблагоприятны, поперечный контрольный профиль помогает установить возможную связь этого горизонта с верхним и нижним бьефами либо с контуром подземной выработки. Руководство по цементационным работам рассматривает такой контроль в составе оценки фактического действия закрепления [8]. По единственному повышенному значению k невозможно определить границы дополнительного нагнетания.

В C1 проверке подлежит слабый участок несущего массива. Повторный отбор должен сопровождаться регистрацией выхода керна, утраченной при бурении длины и характера разрушения образцов. Иначе избирательная сохранность хорошо сцементированных участков может завысить оценку. Существенно также выдержать сопоставимые условия хранения и возраст испытания. В C2 дополнительное определение прочности должно уточнить результат, близкий к границе. Для каждого нового образца важно фиксировать абсолютную отметку и принадлежность к инженерно-геологическому слою. Повторное гидравлическое испытание C2 может дать сведения о фильтрации, однако не уменьшает диапазон возможной прочности.

Отдельный расчёт слоистого основания показывает предел применения результатов отдельных скважин к завесе в целом. Пусть непрерывный проницаемый прослой занимает 2 % общей толщины. Его коэффициент фильтрации принят равным $60\cdot10^{-6}$ м/с, а у остальной закреплённой толщи — $0{,}30\cdot10^{-6}$ м/с. При установившейся фильтрации вдоль слоёв градиент напора одинаков, а расходы складываются. Эквивалентный коэффициент составляет $1{,}494\cdot10^{-6}$ м/с, причём по прослою проходит 80,3 % суммарного расхода. При фильтрации поперёк тех же слоёв складываются гидравлические сопротивления, и коэффициент равен $0{,}3061\cdot10^{-6}$ м/с [9]. Параметры этого примера заданы отдельно от шести контрольных интервалов.

При продольном потоке для достижения эквивалентного коэффициента $1{,}00\cdot10^{-6}$ м/с в рассмотренном примере достаточно прослоя толщиной около 1,17 % общей мощности. При меньшей доле прослоя требование к сечению в целом может выполняться, хотя локальная проницаемость прослоя по-прежнему высока. Перерыв прослоя по простиранию, напротив, способен изменить ожидаемую связь с областью разгрузки. Для заключения о работе реального экрана нужны направление градиента, протяжённость прослоев, положение закреплённых зон и гидравлические границы. У нескольких поинтервальных коэффициентов нет единственной осмысленной схемы осреднения без этих сведений.

Различие двух видов отказа подтверждается и опубликованными испытаниями. Для укреплённого песка 5–50 (4) Марку и соавторы приводят в таблице 7 прочность 0,88 МПа и $k = 3{,}7\cdot10^{-7}$ м/с, для песка 5–100 (1) — соответственно 4,26 МПа и $2{,}4\cdot10^{-6}$ м/с [10]. По принятым в нашем расчёте условным границам первый материал не удовлетворил бы требованию по прочности, второй — по проницаемости. Опыты выполнены авторами цитируемой публикации на лабораторных колоннах. Они иллюстрируют физическую возможность разнонаправленного изменения показателей, но не служат натурной проверкой полученных количеств выборок.

Выводы. В расчётном сечении среднее значение коэффициента фильтрации и среднее из минимумов прочности удовлетворяли заданным условиям, хотя в нижнем интервале скважины B водопроницаемость превышала предел, а в верхнем интервале скважины C прочность была недостаточной. Из двадцати выборок по три интервала четыре пропустили обе проблемные глубины, ещё в пятнадцати включённое локальное нарушение

DOI: 10.65322/j.srd.06202026.24

исчезло при усреднении. Эти причины требуют разных действий: в первом случае нужно пересмотреть размещение контрольных интервалов, во втором — сохранить результаты и вывод по каждому из уже испытанных участков.

При принятых границах ±20 % по коэффициенту фильтрации и ±0,12 МПа по прочности из шести интервалов три устойчиво отвечали обоим условиям, два устойчиво нарушали одно из них и один требовал уточнения прочности. Практический результат расчёта — возможность указать глубину, измеряемое свойство и цель повторной проверки. Численные доли относятся к заданному набору интервалов; для переноса выводов на основание сооружения необходимы геологическая привязка контрольных скважин и отдельная проверка пространственной непрерывности закрепления.

Список литературы

1. Void and permeation grouting: Unified Facilities Guide Specifications (UFGS) Section 31 33 20 / USACE, NAVFAC, AFCEC. – Washington, 2024. – [Электронный ресурс].

2. Mollamahmutoglu M., Avci E. Effectiveness of microfine Portland cement grouting on the strength and permeability of medium to fine sands // Periodica Polytechnica Civil Engineering. – 2015. – Vol. 59, No. 3. – P. 319–326. – DOI: 10.3311/PPci.7674.

3. Pantazopoulos I.A., Markou I.N., Atmatzidis D.K. Stress–strain–strength and hydraulic performance of microfine cement grouted sands // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 34, No. 10. – DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004433.

4. Yoon B., Lee W., Lee C., Choo H. Time-dependent variations of compressive strength and small-strain stiffness of sands grouted with microfine cement // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2020. – Vol. 146, No. 4. – DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002207.

5. ISO 22282-2:2012. Geotechnical investigation and testing – Geohydraulic testing – Part 2: Water permeability tests in a borehole using open systems. – Geneva: ISO, 2012.

6. ASTM D5084-24. Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2024.

7. JCGM 106:2012. Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment. – Joint Committee for Guides in Metrology, 2012. – DOI: 10.59161/JCGM106-2012.

8. EM 1110-2-3506. Grouting technology: Engineer manual. – Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers, 2017.

9. Jorgensen D.G. Relationships between basic soils-engineering equations and basic ground-water flow equations: USGS Water-Supply Paper 2064. – Washington: USGS, 1980. – 36 p. – DOI: 10.3133/wsp2064.

10. Markou I.N., Christodoulou D.N., Droudakis A.I. Injections of microfine cement grouts into sand columns for penetrability and effectiveness evaluation // Proc. International Symposium on Ground Improvement. – Brussels, 2012. – Vol. IV. – P. IV-291–IV-302.