

МЕЛИОРАЦИЯ

УДК 626.8:624.131.37 (476)

СОПОСТАВЛЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФИКТИВНОГО И ИДЕАЛЬНОГО ГРУНТОВ С РЕАЛЬНЫМ

А. А. Боровиков¹, старший преподаватель
В. С. Бочарников², доктор технических наук

¹Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, г. Горки, Беларусь

²Волгоградский государственный аграрный университет, г. Волгоград, Россия

Аннотация

Проведено сопоставление теоретических моделей фиктивного и идеального грунтов. Предложена зависимость коэффициента фильтрации от пористости и размера частиц. Для исследованных видов сапропелей и смесей на их основе подсчитана поправка на форму частиц реального грунта и содержащуюся в нем физически связанную воду.

Ключевые слова: сапропель, песок, песчано-сапропелевая смесь, водно-физические свойства, фиктивный грунт, идеальный грунт.

Abstract

A. A. Borovikov, V. S. Bocharnikov

COMPARISON OF THE THEORETICAL MODELS OF FICTIVE AND IDEAL SOILS WITH REAL

The article compares the theoretical models of fictitious and ideal soils. The dependence of the filtration coefficient on porosity and particle size is proposed. The correction for the shape of real soil particles and the physically bound water contained in it was calculated for the studied types of sapropels and mixtures based on them.

Keywords: sapropel, sand, sand-sapropel mixture, water-physical properties, fictitious soil, ideal soil.

Введение

Формирование благоприятных условий для повышения и сохранения плодородия сельскохозяйственных угодий, увеличения урожайности культур, благоприятного воздействия на экосистему является первостепенной задачей комплексных мелиоративных мероприятий, включающих создание водоподпорных, водорегулирующих и водопроводящих сооружений. Строительство и реконструкция данных сооружений на мелиоративных системах в современных условиях осложняется постоянным ростом стоимости материалов. Закрытие границ вследствие санкционной политики отдельных государств или в связи с проводимыми противоэпидемиологическими мероприятиями сокращает количество поставщиков, что также увеличивает цену материалов, препятствует их доставке в требуемый срок или вообще невозможна. В создающихся неблаго-

приятных условиях все это заставляет искать способы выполнения поставленных задач, используя доступные местные ресурсы [1–5]. Вопросы защиты окружающей среды, особенно актуально звучащие в последние десятилетия в связи с ростом техногенной нагрузки на агроэкосистемы, побуждают вести поиск экологически безвредных материалов, не оказывающих негативного влияния на экологию [6].

Инженерная защита территорий от подтопления, осуществляемая с применением низконапорных грунтовых сооружений, включает в себя мероприятия по сокращению фильтрации через их тело и основание. Задача эксплуатационной службы состоит в поддержании сооружений в исправном состоянии, своевременном обнаружении угроз, проведении профилактических ремонтов и контроле уровней грунтовых вод [7].

Совершенствование конструкций противо-фильтрационных устройств гидротехнических сооружений мелиоративных систем с применением местных материалов взамен дорого-

Материалы и методы исследований

Объект исследования – высокозольные сапропели, пески и смеси на их основе. Применялись стандартные методы определения водно-физических свойств сапропелей, песков и их смесей. Проводились теоретические исследования моделей фиктивного и иде-

Результаты исследований и их обсуждение

Изменение водно-физических свойств грунтов при проведении мелиоративных мероприятий носит непрерывный и неустраняемый характер. Довольно сложно подобрать точную математическую модель для их описания в силу строения и генезиса грунтов. Дополнительные трудности возникают с почвами вследствие способности последних к агрегатированию, выстраиванию сложных пространственных структур, в которых размер пор может превосходить размер слагающих ее частиц, возникающих в результате обработки, изменения влажности и т. п. В этом случае для интерпретации изменчивости свойств можно воспользоваться моделями идеального и фиктивного грунтов.

Модель идеального (капиллярного) грунта подходит при рассмотрении условий движения гравитационной и капиллярной воды, определении фильтрационных свойств грунта, подсчете запасов влаги. Суть данной модели состоит в представлении порового пространства грунта в виде сети параллельных цилиндрических трубок.

Модель фиктивного грунта удобна при оценке его пористости. В ней реальный грунт заменяется эквивалентным, в виде шарообразных частиц одного размера. При этом его пористость колеблется в диапазоне от 25,95 % (для плотного сложения) до 47,64 % (для рыхлого сложения) в случае различной ком-

стоящих привозных приведет к значительной экономии финансовых ресурсов, что особенно важно в современных реалиях.

ального грунтов с целью их сопоставления с реальным грунтом. Использовались данные исследований, посвященных свойствам сапропелевых суспензий, фильтрационным характеристикам смесей песка с сапропелем.

бинации контакта всех частиц. При этом соотношение диаметров частиц и диаметра вписанной окружности между шарообразными частицами определяется как $D/d = 6,46$ (для случая трех контактной комбинации, при угле 60°) и $D/d = 2,41$ (для случая четырехконтактной комбинации, при угле 90°) (рис. 1).

Для сопоставления моделей идеального и фиктивного грунтов мы должны добиться выполнения следующих условий: 1) объем поровых трубок идеального грунта должен быть равен объему порового пространства фиктивного грунта; 2) удельная поверхность идеального и фиктивного грунтов должны быть также равны; 3) пористость идеального и фиктивного грунтов должна быть одинаковой. При выполнении названных условий структура основного закона фильтрации будет неизменна для обеих моделей в условиях ламинарной фильтрации.

Рассмотрим, как изменится удельная поверхность, под которой понимают отношение суммарной поверхности частиц к объему, занимаемому ими, при изменении размера частиц на примере модели фиктивного грунта:

$$S_{уд} = \frac{S}{V}, \tag{1}$$

где $S_{уд}$ – удельная поверхность, $мм^{-1}$;
 S – суммарная поверхность частиц, $мм^2$;
 V – объем частиц, $мм^3$.

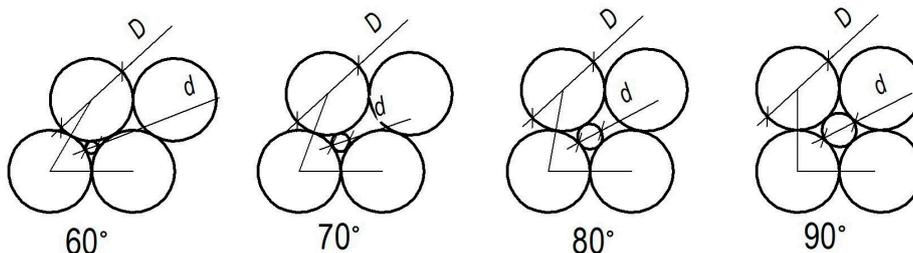


Рис. 1. Соотношения между диаметрами шарообразной частицы и цилиндрической поры

Чем больше в грунте мелких частиц, тем больше их удельная поверхность. От ее величины зависят многие водно-физические свойства (например, такие как проницаемость, влагоемкость и др.), поэтому ее необходимо учитывать, поскольку от нее зависит проявление молекулярных (поверхностных) сил на контакте «жидкость – порода». Данные явления могут очень сильно изменять характер фильтрации: так, при фильтрации через крупнозернистую породу со сравнительно небольшой удельной поверхностью частиц (табл. 1) влияние молекул жидкости, контактирующих с поверхностью частиц породы, на фильтрацию невелико, поскольку их количество несопоставимо меньше количества молекул фильтрующейся жидкости. Однако если грунт имеет большую удельную поверхность (что характерно для мелкозернистой породы), то число молекул жидкости, контактирующих с грунтом при фильтрации, сопоставимо с общим числом молекул в ней. Чем мельче части-

цы, слагающие породу, тем больше ее удельная поверхность.

Из анализа табл. 1 можно сделать следующий вывод: при уменьшении диаметра частицы в 10 раз удельная поверхность также увеличивается в 10 раз. Как показывают наши расчеты, данное положение справедливо не только для частиц в форме шара, но и для частиц в форме куба, тетраэдра, додекаэдра, то есть на него форма частиц не влияет.

Как зависит удельная поверхность от размера частицы на примере частиц различной правильной конфигурации? Обратимся к форме отверстий в наборе сит. При определении механического состава грунтов используется их стандартный набор. Сита с размером отверстий 10, 5 и 2 мм имеют круглую перфорацию, а сита 1, 0,5, 0,25 и 0,1 мм – квадратную (рис. 2). При определении размера частиц менее 0,1 мм прибегают к методам, основанным на свободном выпадении частиц в спокойной воде (по ГОСТ 12536-2014).

Таблица 1. Удельная поверхность частиц фиктивного грунта

Диаметр частиц, мм	Площадь поверхности, мм ²	Объем частицы, мм ³	Удельная поверхность, мм ⁻¹
10,00	314,160	523,60	0,6
5,00	78,540	65,45	1,2
2,00	12,566	4,189	3
1,00	3,142	0,524	6
0,50	0,785	0,065	12
0,25	0,196	0,0082	24
0,10	0,031	0,0005	60



Рис. 2. Форма ячеек стандартного набора сит для определения гранулометрического состава

Для шарообразных частиц в качестве размера частицы выступает ее диаметр, соответствующий диаметру круглого отверстия; для частиц в форме куба, тетраэдра и т. д. – диаметр описанной окружности, через которую способна просыпаться частица соответствующей формы (рис. 3).

Проанализируем, как может меняться пористость частиц в зависимости от их формы. Предположим, что грунт состоит из одинаковых частиц в форме куба. Зададимся пористостью от 0 до 90 %, подсчитаем количество частиц в единице объема при заданной пористости и определим суммарную поверхность этих частиц. Частицы в форме куба выбраны неслучайно. Дело в том, что шарообразные частицы одинакового размера не удастся уложить с пористостью, равной нулю. Наименьшая пористость для плотной укладки составляет 25,95 %. Частицы в форме додекаэдра, состоящие из 12 граней пятиуголь-

ников, также не получится плотно разместить в пространстве, чтобы полностью заполнить его без зазоров. В то же время при оперировании с одинаковыми частицами в форме куба может быть достигнута нулевая пористость.

На рис. 4 представлен график зависимости удельной поверхности от размера кубической частицы при показателе пористости $n = 0$. С учетом того, что частицы уложены без зазора, зависимость можно описать следующим уравнением (с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 1$):

$$S_{уд} = \frac{\alpha}{d}, \quad (2)$$

где α – параметр, зависящий от формы частицы и плотности укладки частиц (для куба равен 6), – это параметр формы и плотности укладки частиц;

d – диаметр частицы, мм (для частицы в форме шара – D , куба – $0,707 D$).

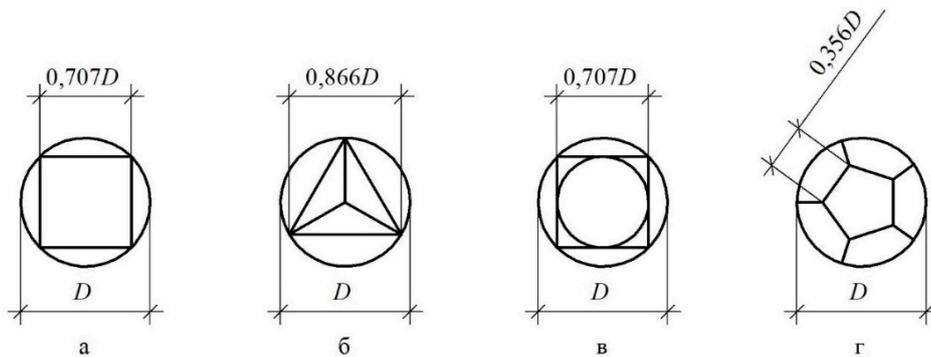


Рис. 3. Соотношение диаметров описанной окружности (отверстия сита) и размеров стороны частицы: а – куб; б – тетраэдр; в – цилиндр; г – додекаэдр

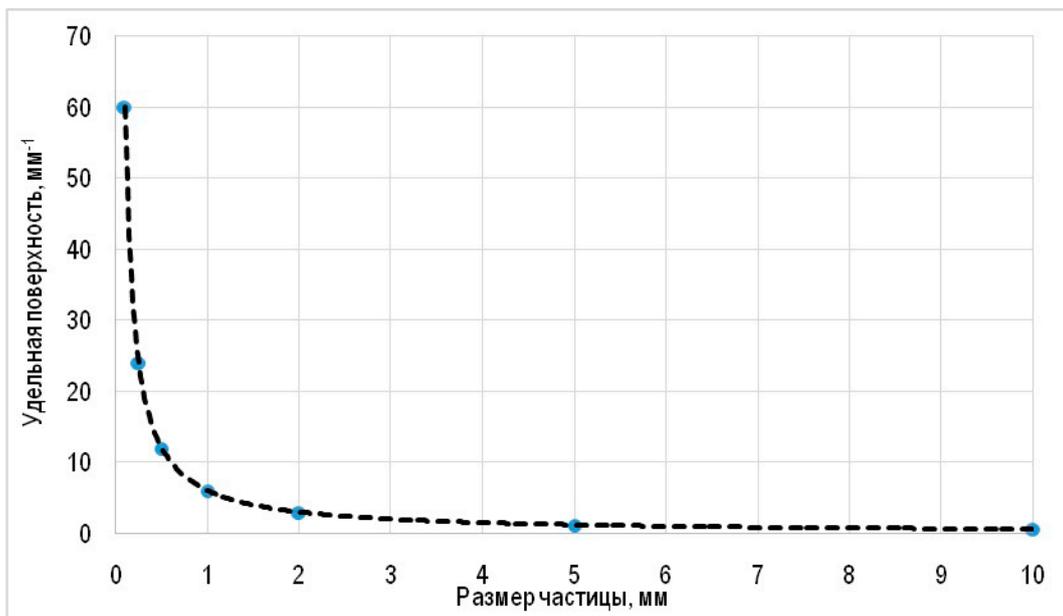


Рис. 4. График зависимости удельной поверхности от размера частицы фиктивного грунта

Задавая пористость от 0 до 90 % и подсчитав удельную поверхность частиц в заданном объеме, мы увидим, как изменяется параметр формы и плотности укладки частиц при изменении пористости (табл. 2).

Построив зависимость параметра формы и плотности укладки частиц от пористости $\alpha = f(n)$, видим, что данная функция является уравнением прямой (рис. 5) и описывается уравнением:

$$\alpha = -0,06 \cdot n + 6 \quad (3)$$

с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 1$.

Подставив полученное уравнение в формулу (2), получим зависимость удельной поверхности частиц от размера частиц и пористости:

$$S_{уд} = \frac{-0,06 \cdot n + 6}{d}, \quad (4)$$

где n – пористость, %.

Проведя аналогичные расчеты для фиктивного грунта, состоящего из частиц в форме шара в диапазоне пористости от плотного ($n = 25,95$ %) до рыхлого сложения ($n = 47,64$ %), замечаем сохранение зависимости (3) для определения параметра формы и плотности укладки частиц и, как следствие, зависимости (4).

Аналогичным образом получается формула для определения удельной поверхности идеального грунта, представляющего собой модель, которая состоит из одинаковых цилиндрических трубочек (капилляров):

$$S_{уд} = \left(\pi d_k^2 / \frac{\pi d_k^3}{4} \right) \cdot n = \frac{4 \cdot n}{d_k}. \quad (5)$$

Сопоставив модели фиктивного и идеального грунтов,

$$\frac{-6 \cdot n + 6}{d} = \frac{4 \cdot n}{d_k}, \quad (6)$$

где n – пористость в долях единицы, получим зависимость диаметра капилляра от размера частицы:

$$d_k = \frac{4 \cdot n \cdot d}{-6 \cdot n + 6} = \frac{2 \cdot n \cdot d}{3 \cdot (1 - n)}. \quad (7)$$

Из курса гидравлики известна зависимость между коэффициентом фильтрации и коэффициентом проницаемости:

$$k = \frac{\gamma_v \cdot k_0}{\mu}, \quad (8)$$

где k – коэффициент фильтрации, м/с;
 γ_v – удельный вес воды, Н/м³;
 k_0 – коэффициент проницаемости, м²;
 μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с.

Таблица 2. Значения параметра формы и плотности укладки частиц в форме куба

Пористость n , %	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Параметр α	6	5,4	4,8	4,2	3,6	3	2,4	1,8	1,2	0,6

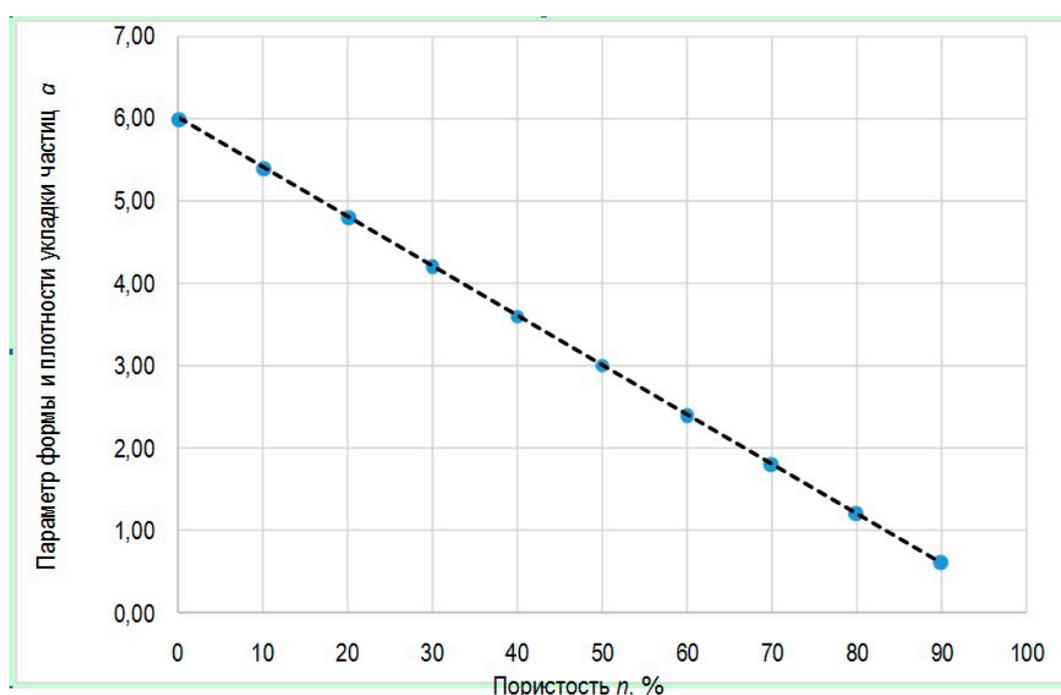


Рис. 5. Зависимость параметра формы и плотности укладки частиц от пористости для частиц в форме куба

Применив линейный закон фильтрации (А. Дарси, 1856):

$$v = \frac{k_0}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{l}, \quad (9)$$

где Δp – перепад давления между концами капилляра, Па;

l – длина капилляра, м,

и формулу Пуазейля:

$$u = \frac{d_k^2}{32 \cdot \mu} \cdot \frac{\Delta p}{l}, \quad (10)$$

где u – средняя скорость движения воды в капилляре, м/с,

для случая одномерной фильтрации в ламинарном режиме с учетом того, что средняя скорость потока

$$v = n \cdot u, \quad (11)$$

получаем равенство:

$$\frac{k_0}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{l} = \frac{n \cdot d_k^2}{32 \cdot \mu} \cdot \frac{\Delta p}{l}. \quad (12)$$

С использованием зависимости (7) и (12) формулу (8) можем записать в виде:

$$k = \frac{\gamma_v}{72 \cdot \mu} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot d^2. \quad (13)$$

Нерешенным остается вопрос, какой размер частиц стоит принимать и насколько точно он будет соответствовать моделям идеального и фиктивного грунтов. Решить данную задачу поможет теория эквивалентной сферы, согласно которой при измерении некоторых характеристик частиц они соотносятся с размером эквивалентной сферы, и, как следствие, нет необходимости описывать частицы рядом числовых значений (таких как длина, ширина, высота, масса, площадь поверхности, объем и т. п.).

Простейшей геометрической характеристикой пористой среды является эффективный диаметр частиц грунта. Его можно найти различными способами: микроскопическим, ситовым, седиментационным и т. п. Эффективный диаметр ($d_э$) – это такой диаметр частиц фиктивного грунта, при котором гидравлическое сопротивление фильтрующейся воды одинаково для всех моделей грунтов.

Его вычисляют по гранулометрическому составу по формуле веса средней частицы:

$$d_э = \sqrt[3]{\frac{\sum m_i d_i^3}{\sum m_i}}, \quad (14)$$

где d_i – средний диаметр i -й фракции;

m_i – массовая или счетная доля i -й фракции.

Для приведения диаметра, найденного микроскопическим или ситовым методами, в соответствие гидравлическому сопротивлению потока необходимо ввести поправку гидравлической формы. При определении диаметра гидродинамическими методами поправка не требуется.

Имея дело с реальными грунтами, представленными частицами всевозможных форм и размеров, следует учитывать наличие мелкодисперсных фракций, оказывающих значительное влияние на их пористость, проницаемость, водоудерживающую способность, капиллярные свойства. Для песчаных грунтов в силу их крупнозернистости (и, как следствие, крупнопористости) капиллярные свойства проявляются лишь на стыках частиц.

Смеси песка с сапропелем характеризуются мелкопористостью, так как частички сапропеля в некоторой степени заполняют крупные поры песка, уменьшая их до размеров капилляров, и чем больше сапропеля в смеси, тем в большей степени это проявляется. Кроме того, органическое вещество сапропеля способно удерживать несопоставимо большее количество воды, нежели минеральные частицы смеси. В результате песчано-сапропелевые смеси характеризуются более ярко выраженными капиллярными свойствами. Размер порового пространства также влияет на влагоемкость и проницаемость пород. Воде гораздо легче просачиваться через крупные поры. При уменьшении пор до уровня капилляров ей все сложнее передвигаться из-за влияния капиллярных сил, и чем миниатюрнее поры, тем сильнее это влияние. При еще большем снижении размера порового пространства значительная его часть заполнена физически связанной водой.

Оценивая фильтрационную устойчивость материала против фильтрационных преград из нетвердеющих заполнителей (смесь песчаного грунта с сапропелем), следует принимать размер частиц дисперсной фракции, полученный по результатам механического анализа, с учетом толщины водных пленок, удерживаемых на поверхности частиц силами электростатического притяжения (рис. 6).

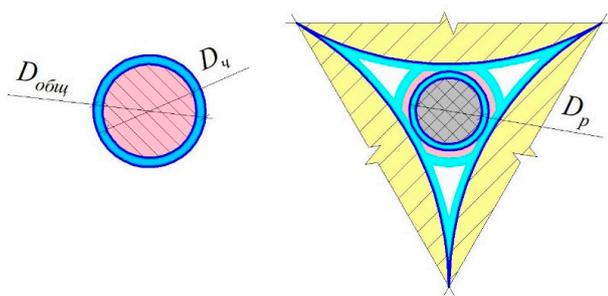


Рис. 6. Схема фильтрационного хода и частицы:
 $D_ч$ – диаметр частицы, способной просыпаться
 сквозь пору в сухом грунте;

$D_{общ}$ – диаметр частицы с учетом пленки физи-
 чески связанной воды;

D_p – реальный диаметр частицы, способный
 быть вынесенным из грунта

Подходы к возможному учету данного вида
 воды приведены в работах [1, 3]. Коэффициент,
 учитывающий уменьшение диаметра пор:

$$K_1 = \sqrt[3]{\frac{V_{тф}}{V_{тф} + V_w^m}}, \quad (15)$$

где $V_{тф}$ – объем твердой фазы;

V_w^m – объем воды при влажности, равной
 молекулярной.

Заключение

В результате сопоставления моделей
 фиктивного и идеального грунтов получена
 зависимость коэффициента фильтрации от
 пористости и размера частиц. В качестве гео-
 метрической характеристики пористой среды
 предложено использовать эффективный диа-
 метр частиц грунта. Учитывать пленки физи-
 чески связанной воды, формирующейся вокруг

Коэффициент, учитывающий увеличение
 диаметра частиц, способных выноситься из
 грунта:

$$K_2 = \frac{1}{K_1} = \sqrt[3]{\frac{V_{тф} + V_w^m}{V_{тф}}}. \quad (16)$$

Для исследованных видов сапропелей [4]
 величина коэффициента K_1 колеблется в диа-
 пазоне 0,811–0,874, коэффициента K_2 – от 1,114
 до 1,232. В этом случае важно учитывать, что по-
 добные пленки формируются не только вокруг
 частиц, которые способны быть вынесены из
 грунта, но и вокруг частиц, формирующих пору.
 Кроме того, в реальных грунтах, сложенных да-
 леко не шарообразными частицами, следует
 учитывать зазор (вводить поправку на форму
 частиц) между выносимой частицей и стенкой
 поры. Таким образом, для полного учета влия-
 ющих факторов данные коэффициенты нужно
 использовать в третьей степени, то есть K_1^3 или
 K_2^3 . Коэффициент, учитывающий уменьшение
 диаметра пор для исследованных сапропелей
 составит 0,533–0,667, а коэффициент, учитыва-
 ющий увеличение диаметра частиц, способных
 выноситься из грунта, составит 1,382–1,870.

частиц в дисперсных грунтах, и форму этих
 частиц предложено путем введения коэф-
 фициентов. Для исследованных сапропелей
 коэффициент, учитывающий уменьшение ди-
 аметра пор, составит 0,533–0,667, а коэффи-
 циент, учитывающий увеличение диаметра
 частиц, способных выноситься из грунта, со-
 ставит 1,382–1,870.

Библиографический список

1. Боровиков, А. А. Мелиорация песчаных грунтов суспензией сапропеля / А. А. Боровиков // Мелиорация. – 2012. – № 1. – С. 220–229.
2. Боровиков, А. А. Результаты статистической обработки фильтрационных исследований / А. А. Боровиков // Мелиорация. – 2013. – № 1. – С. 37–45.
3. Боровиков, А. А. Фильтрационная устойчивость смесей песка и сапропеля / А. А. Боровиков // Мелиорация. Современные методики, инновации и опыт практического применения : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 19–20 окт. 2017 г. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т мелиорации; редкол.: Н. К. Вахонин [и др.]. – Минск, 2017. – С. 107–114.
4. Бочарников, В. С. К вопросу о сапропелях и их влиянию на водно-физические свойства в смесях с песком при строительстве и эксплуатации инженерно-мелиоративных систем / В. С. Бочарников, А. А. Боровиков // Изв. Нижневолж. агроуниверситет. комплекса. Наука и высш. проф. образование. – 2021. – № 4 (64). – С. 324–334.

5. Бочарников, В. С. Эффективность противofильтрационной песчано-сапропелевой завесы на примере шлюза-регулятора мелиоративных систем / В. С. Бочарников, А. А. Боровиков // Изв. Нижневолж. агроуниверситет. комплекса. Наука и высш. проф. образование. – 2021. – № 4 (64). – С. 463–471.

6. Боровиков, А. А. Строительство противofильтрационных завес с экологической точки зрения / А. А. Боровиков // Инновационные технологии в мелиорации и сельскохозяйственном использовании мелиорированных земель : тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рожд. акад. С. Г. Скоропанова, Минск, 15–17 сент. 2010 г. / НАН Беларуси, Ин-т мелиорации; редкол.: Н. К. Вахонин [и др.]. – Минск, 2010. – С. 31–33.

7. Боровиков, А. А. О необходимости мероприятий инженерной защиты водоподпорных и водопроводящих сооружений / А. А. Боровиков // Вестн. мелиорат. науки. – 2021. – № 1. – С. 4–8.

Поступила 13 мая 2022 г.