

ОЦЕНКА СУФФОЗИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МИНЕРАЛЬНЫХ ГРУНТОВ

А. А. Боровиков, старший преподаватель

*УО Белорусская государственная сельскохозяйственная академия,
г. Горки, Беларусь*

Аннотация

Рассмотрена суффозионная устойчивость минеральных грунтов. Выполнены расчеты для обоснования отсутствия суффозии в отдельных образцах. Приведены результаты оценки суффозионной устойчивости исследованных грунтов согласно геометрическому критерию выноса, а также зависимости, учитывающие уменьшения размеров пор грунта и увеличения размеров частиц за счет формирования пленок связанной воды.

Ключевые слова: минеральный грунт, фильтрационная устойчивость, механическая суффозия, геометрический критерий выноса.

Abstract

A. A. Borovikov

EVALUATION OF SUFFUSION STABILITY OF MINERAL SOILS.

The article deals with the suffusion resistance of mineral soils. Calculations were performed to substantiate the absence of suffusion in some samples. The results of assessing the suffusion stability of the investigated soils in accordance with the geometrical removal criterion are presented. Dependences are given that take into account the decrease in the pore size of the soil and the increase in the particle size due to the formation of films of bound water.

Keywords: mineral soil, filtration stability, mechanical suffusion, geometric criterion of removal.

Введение

При оценке грунтов с точки зрения их фильтрационной устойчивости в первую очередь необходимо установить вид фильтрационных деформаций, поскольку от этого зависит как характер условий для обеспечения фильтрационной прочности грунта, так и вид аналитических зависимостей для количественной оценки скоростей фильтрации и градиентов напора. Фильтрационные деформации связных и несвязных грунтов могут быть подразделены на следующие основные виды: выпор, происходящий под действием восходящего фильтрационного потока; суффозия; контактный выпор и контактный размыв.

Особое внимание заслуживает суффозия, представляющая собой процесс выноса из грунта фильтрующейся водой мелких частиц за его пределы. Такая суффозия называется механической в отличие от химической суффозии, заключающейся в удалении из грунта растворимых в воде минералов. Данное проявление, связанное с воздействием фильтрационного

потока, приводит к изменению (порой катастрофическому) структуры грунта.

В естественных условиях данный процесс малозаметен в силу установившегося и медленного течения подземных вод. Когда природные условия резко меняются вследствие строительства водоподпорных сооружений, картина кардинально меняется. В этом случае многократно повышаются градиенты напора и скорости, в результате чего может развиваться процесс суффозии в опасных размерах для сохранности сооружений. Данное явление может наблюдаться в районах с интенсивной эксплуатацией подземных водоносных горизонтов. В результате снижения уровней подземных вод на десятки метров вода с поверхности движется к водоносному слою, увлекая за собой мелкие частички грунта, поэтому пористость его увеличивается. Это приводит к проседанию верхних слоев, так как они не могут опираться на нижележащие пласты, прочность которых иногда падает до нуля.

Суффозионные явления отрицательно сказываются на устойчивости зданий и сооружений, и с ними следует активно бороться. Основа всех мероприятий – прекращение фильтрации воды. Этого можно достигнуть гидроизоляцией поверхности, или перехватом и отводом поверхностных вод за пределы участка, пригрузкой мест выхода подземных вод на поверхность, или устройством обратных фильтров, закреплением грунтов, или применении особых конструкций фундамента.

Фильтрационный поток, возникающий в грунте, обуславливает возникновение соответствующих фильтрационных сил, приложенных к скелету грунта, которые, с одной стороны, могут способствовать снижению общей устойчивости грунта или вызывать появление так называемого местного фильтрационного выпора. С другой стороны, упомянутые силы могут приводить к фильтрационным деформациям скелета грунта в виде так называемых суффозии и кольматажа.

При проектировании грунтовых водоподпорных сооружений приходится различать безопасные и опасные фильтрационные деформации, детерминирующие нарушение фильтрационной прочности грунта, которые могут привести к частичному или полному разрушению сооружения или его основания. Анализ аварий грунтовых плотин показывает, что около 80 % аварий произошло именно вследствие нарушения фильтрационной прочности грунта тела или основания.

Условия возникновения механической суффозии можно разделить на две категории: необходимые и достаточные. Необходимыми являются геометрические условия, достаточными – гидромеханические условия в порах грунта. При соответствующих гидродинамических условиях из толщи грунта могут выноситься частицы, максимальная величина которых определяется согласно геометрическому критерию [1, 2].

В зависимости от суффозионных свойств грунты подразделяются на три основные категории: суффозионные, практически несущезуффозионные и несущезуффозионные [1]. Суффозионными считаются те из них, в которых при критических скоростях или градиентах может развиваться механическая суффозия. Если ме-

ханическая суффозия при любых практически достижимых скоростях или градиентах невозможна, то грунт считается несущезуффозионным. Вынос небольшого количества мелких частиц не нарушает прочности грунта, что подтверждается экспериментально [2, 3].

Для решения многих практических задач фильтрационной устойчивости различают еще промежуточную категорию практически несущезуффозионных грунтов, когда при определенных гидродинамических условиях может быть вынесено не более 3–5 % мелких частиц (по массе). В этом случае считается, что грунт практически несущезуффозионен. В практике мелиоративного строительства вследствие низкого класса капитальности сооружений можно различать лишь две категории грунтов – суффозионные и практически несущезуффозионные.

Для установления категории несущезуффозионных грунтов, из которых при любых скоростях или градиентах фильтрационного напора не будет выноса самых мелких частиц d_{\min} , А. Н. Патрашевым и Г. Х. Праведным (ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева) была предложена последовательность расчета, основанная на определении диаметра максимального фильтрационного хода по результатам гранулометрического анализа грунта, его пористости и коэффициента фильтрации [1, 2]. Если

$$0,77d_0^{\max} > d_{\min}, \quad (1)$$

то грунт следует отнести к суффозионным, так как из его толщи при определенных гидродинамических условиях по геометрическому критерию выноса могут выноситься все частицы с диаметрами

$$d_{ci} \leq 0,77d_0^{\max}, \quad (2)$$

где d_0^{\max} – диаметр максимального фильтрационного хода, мм;

d_{\min} – минимальный диаметр частиц, содержащихся в грунте (по данным гранулометрического анализа), мм;

d_{ci} – диаметр частиц, способных быть вынесенными из грунта по геометрическому критерию выноса, мм.

Если условие (1) не выполняется, то есть

$$0,77d_0^{\max} < d_{\min}, \quad (3)$$

то грунт считается несuffозионным, так как в данном случае при любых скоростях или градиентах фильтрационного напора вынос самых мелких частиц невозможен. Максимальный процент возможного выноса частиц из грунта устанавливаются по кривой гранулометрического состава и максимальному диаметру выносимых частиц d_{ci} , определяемому по зависимости (2).

Исследуемые грунты в количестве 12 образцов отобраны на объекте «Набережная реки Сож от Лебяжего пруда до учреждения “Гомель-

ская городская клиническая БСМП”». Кривые гранулометрического состава образцов приведены на рис. 1 и 2.

Для примера приведем расчет по определению размера частиц, способных быть вынесенными из грунта для образца 1. Данный грунт с коэффициентом неоднородности $\eta = 3,82$, $d_{17} = 0,065$ мм, плотностью твердых частиц $2,66$ г/см³ характеризуется коэффициентом пористости, равным $0,697$; молекулярная влажность грунта составляет $3,09$ %.

Диаметр максимального фильтрационного хода

$$d_0^{\max} = \chi \cdot C \cdot e \cdot d_{17} = 1,091 \cdot 0,5688 \cdot 0,697 \cdot 0,065 = 0,0281 \text{ (мм)},$$

где χ – коэффициент неравномерности раскладки частиц в грунте;

e – коэффициент пористости грунта;

d_{17} – диаметр частиц, меньше которых в грунте содержится 17 % по массе;

C – коэффициент, определяемый по формуле [4, с. 37]:

$$C = 0,455 \cdot \sqrt[6]{\eta} = 0,455 \cdot \sqrt[6]{3,82} = 0,5688 ,$$

где η – коэффициент неоднородности грунта.

Коэффициент неравномерности раскладки частиц [4, с. 37]

$$\chi = 1 + 0,02 \cdot \eta + 0,001 \cdot \eta^2 = 1 + 0,02 \cdot 3,82 + 0,001 \cdot 3,82^2 = 1,091 .$$

Из грунта (в соответствии с геометрическим критерием выноса) могут быть вынесены частицы, имеющие диаметр менее

$$d_{ci} \leq 0,77 \cdot d_0^{\max} = 0,77 \cdot 0,0281 = 0,0216 \text{ (мм)} .$$

Однако приведенные расчеты не учитывают влияние пленок связанной воды на геометрию пор и частиц. Между тем, по данным справочника гидрогеолога, максимальная молекулярная влагоемкость для пылеватых песков может достигать 12 % [5]. Тем не менее возможность учесть влияние пленок связанной воды на геометрию пор и частиц при оценке suffозионности грунтов приведена в работах [4, 6].

Коэффициент, учитывающий уменьшение диаметра фильтрационного хода [4, с. 38],

$$K_1 = \sqrt[3]{\frac{V_{m\phi}}{V_{m\phi} + V_w^m}} , \quad (4)$$

тогда диаметр максимального фильтрационного хода

$$d_0^{\max} = \chi \cdot C \cdot \frac{n}{1-n} \cdot d_{17} \cdot K_1 . \quad (5)$$

Диаметр выносимых частиц

$$d_{ci} = \frac{0,77 \cdot d_0^{\max}}{K_2} = 0,77 \cdot d_0^{\max} \cdot K_1 . \quad (6)$$

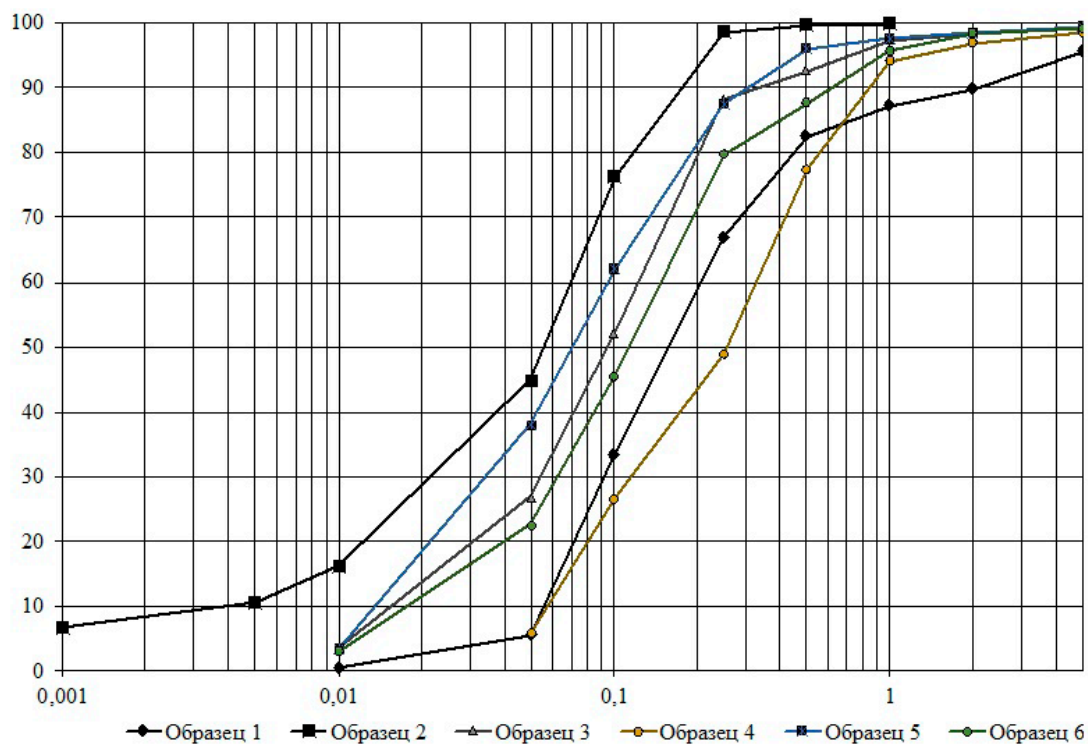


Рис. 1. Кривые гранулометрического состава образцов 1–6

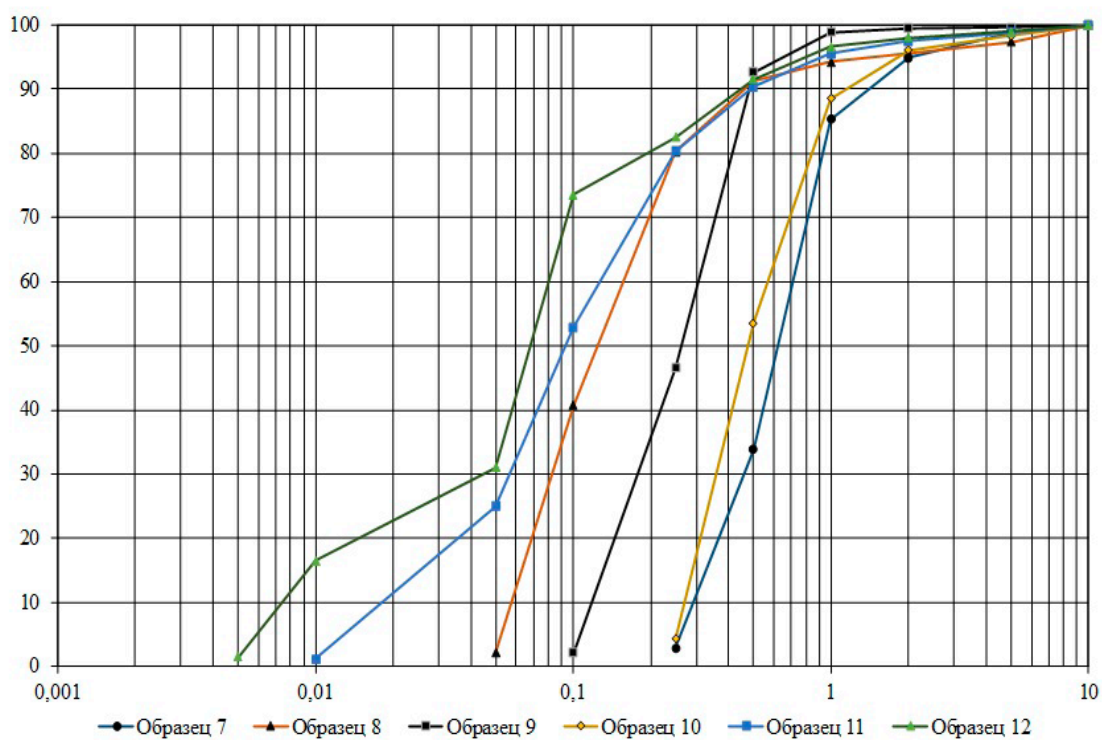


Рис. 2. Кривые гранулометрического состава образцов 7–12

Таблица 1. Оценка суффозионной оценки исследованных образцов по геометрическому критерию выноса

Номер образца	Кэфф. неоднородности, η	d_{17} , мм	Кэфф. пористости, e	Кэфф. неравномерности раскладки частиц, χ	C	$V_{m\phi}$, г/см ³	Плотность твердых частиц, ρ_{sv} , г/см ³	W^m , %	V_w^m , г/см ³	Кэфф. K_1	d_0^{\max} , мм	d_{ci} , мм	Содержание выносимых частиц в грунте, %	Оценка суффозионности грунта
1	3,82	0,065	0,697	1,091	0,5688	0,589	2,66	3,09	0,048	0,974	0,0274	0,0205	3	+
2	16,43	0,011	0,967	1,598	0,7255	0,508	2,70	9,88	0,136	0,924	0,0114	0,0081	16	+
3	8,29	0,0027	0,967	1,235	0,6474	0,508	2,70	17,98	0,247	0,876	0,0018	0,0012	7	+
4	10,40	0,028	0,688	1,316	0,6722	0,592	2,65	6,42	0,101	0,949	0,0162	0,0118	-	-
5	7,00	0,02	0,683	1,189	0,6293	0,594	2,65	7,69	0,121	0,940	0,0096	0,0070	-	-
6	9,68	0,0024	0,959	1,287	0,6643	0,510	2,72	16,25	0,226	0,885	0,0017	0,0012	8	+
7	2,70	0,166	0,700	1,061	0,5370	0,588	2,64	1,91	0,030	0,984	0,0651	0,0493	-	-
8	2,90	0,067	0,710	1,066	0,5432	0,585	2,67	5,48	0,086	0,956	0,0263	0,0194	-	-
9	2,43	0,064	0,696	1,055	0,5276	0,590	2,69	3,43	0,054	0,971	0,0241	0,0180	-	-
10	2,50	0,131	0,685	1,056	0,5302	0,593	2,66	2,15	0,034	0,982	0,0493	0,0373	-	-
11	7,40	0,034	0,718	1,203	0,6352	0,582	2,63	4,61	0,071	0,963	0,0180	0,0133	4	+
12	10,37	0,0053	0,937	1,315	0,6719	0,516	2,73	13,42	0,189	0,901	0,0040	0,0027	8	+

Примечание: «+» означает, что образец подвержен суффозии.

Проанализировав изменение значения коэффициента (K_1) для 12 образцов исследованных грунтов объекта «Набережная реки Сож от Лебяжего пруда до учреждения “Гомельская городская клиническая БСМП”», следует отметить, что величина уменьшения диаметра максимального фильтрационного хода в зависимости от образца колеблется в диапазоне от

1,6 до 12,4 %. Как следствие, размер частиц, способных быть вынесенными за пределы грунта фильтрационным потоком (d_{ci}) в соответствии с геометрическим критерием выноса (1), также снижается в этом диапазоне. Частицы грунта с диаметром частиц более (d_{ci}) не смогут быть вынесены из грунта фильтрационным потоком чисто геометрически.

Заключение

Рассмотрена суффозионная устойчивость минеральных грунтов. Выполнены расчеты для обоснования отсутствия суффозии в отдельных образцах. Предложены зависимости, позволяющие учитывать толщину пленки прочносвязанной воды при расчетах суффозионной устойчивости образцов, посредством включения ее в состав частицы, то есть частица грунта рассматривается вместе с пленкой как твердая частица грунта. Получены зависимости, позволяющие рассчитать диаметры частиц и пор, учитывающие уменьшения разме-

ров пор грунта и увеличения размеров частиц, способных из него выноситься вследствие формирования вокруг них пленок связанной воды.

При сопоставлении диаметра максимального фильтрационного хода образцов 1–3, 6, 11, 12 с данными гранулометрического анализа видно, что вынесенными могут оказаться частицы в количестве от 3 до 16 % по массе. Следовательно, данные образцы подвержены механической суффозии согласно геометрическому критерию выноса.

Библиографический список

1. Дрозд, П. А. Фильтрационная устойчивость грунтов и подбор обратных фильтров для мелиоративных сооружений / П. А. Дрозд, Ю. Ф. Буртыс. – Минск : Урожай, 1967. – 51 с.
2. Патрашев, А. Н. Проект инструкции по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений / А. Н. Патрашев, Г. Х. Праведный. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 87 с.
3. Инструкция по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений. ВСН-02-65. ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева. – Л. : Энергия, 1965. – 95 с.
4. Боровиков, А. А. Методика оценки суффозионной устойчивости песчано-сапропелевых смесей / А. А. Боровиков // Мелиорация сельскохозяйственных земель в XXI веке: проблемы и перспективы : докл. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 20–22 марта 2007 г. / РУП Ин-т мелиорации. – Минск, 2007. – С. 37–40.
5. Справочник гидрогеолога / М. Е. Альтовский [и др.] ; под общ. ред. М. Е. Альтовского. – М. : Госгеолтехиздат, 1962. – 616 с.
6. Нестеров, М. В. Расчет фазового состава сапропеля и песчано-сапропелевых смесей / М. В. Нестеров, А. А. Боровиков // Роль мелиорации и водного хозяйства в реализации национальных проектов : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 22–24 апреля 2008 г. / ФГОУ ВПО Моск. гос. ун-т природообустройства. – Москва, 2008. – Ч. 2. – С. 128–134.

Поступила 26 февраля 2021 г.