

*Дрозд Г. Я., Хвортова М. Ю., *Бизирка И. И.
Луганский государственный университет имени В. Даля
E-mail: bizirkaira@mail.ru

УТИЛИЗАЦИЯ ДЕПОНИРОВАННЫХ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД В КАЧЕСТВЕ ИСКУССТВЕННЫХ ГРУНТОВ

В статье рассматривается проблема отсутствия классификации продолжительности хранения и методов утилизации осадков сточных вод. Также представлены результаты исследования физико-механических, прочностных и деформационных свойств осадков с точки зрения их использования в качестве грунта. По результатам деформационных испытаний, полученные характеристики искусственных грунтов позволяют сделать вывод о возможности их применения в строительстве, например, в качестве грунта для обратной засыпки, основания для дорог, насыпей, площадок или для вертикальной планировки при создании искусственного ландшафта.

***Ключевые слова:** депонированные осадки сточных вод, грунт, тяжелые металлы, искусственные основания, предельно допустимые концентрации, утилизация.*

Введение. Осадки сточных вод (ОСВ) — это суспензии, выделяемые из сточных вод в процессе их механической, биологической и физико-химической очистки. Они могут быть различных типов, в зависимости от этапа очистки, на котором они образуются. Например, это могут быть грубые примеси, такие как отбросы, тяжелые примеси — песок или плавающие примеси — жировые вещества. Также существуют осадки, образующиеся в результате биологической очистки, такие как сырой осадок и активный ил. Они могут быть аэробно или анаэробно стабилизированными, а также сгущенными или уплотненными. Существуют также осадки, которые проходят термическую обработку для высушивания. Все эти различные типы осадков имеют разный состав и могут быть использованы или утилизированы по-разному. Поэтому предлагается ввести отдельную классификацию для лежалых осадков, чтобы улучшить способы и технологии их утилизации. В существующей классификации не учитывается наличие накопленных осадков, поэтому введение новой классификации может помочь в более эффективном использовании и утилизации осадков сточных вод.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Существуют различные способы обращения с осадком:

его можно хранить на специальных складах, использовать в сельском хозяйстве, превращать в компост, сбрасывать в море или сжигать. Однако эти методы применимы только к свежим осадкам. В сельском хозяйстве можно использовать только 1/3 накопленного осадка, так как остальные 2/3 содержат опасные концентрации тяжелых металлов и не могут быть использованы в качестве удобрения [1–7]. Для старых, уже накопившихся осадков нет способов утилизации, кроме захоронения. Поэтому все усилия направлены на их уничтожение путем сжигания. Изучение свойств старых осадков может быть полезно для их использования в качестве искусственных грунтов.

Целью работы является изучение характеристик осадков с точки зрения почвенных грунтов, оценка пригодности отходов для определения наиболее перспективных методов их утилизации.

Методика и основные результаты исследования. Природные грунты — это верхняя часть литосферы, которая образуется в результате выветривания и состоит преимущественно из минералов [2]. В грунтах также содержатся вода, газы и органические вещества, которые являются неотъемлемой частью. Органические компоненты грунта представлены химическими элементами

растений, бактерий и грибов, а также продуктами их взаимодействия и превращения. Остатки растений, микроорганизмов и животных являются источниками гумуса. Химический состав органических остатков представлен [2]: вода (70–90 %), белки, липиды, лигнин, смолы, воски. Большое количество из этих соединений имеют высокую молекулярную массу (от 10^4 до 10^6). Осадки сточных вод, подобно природным грунтам, состоят из трех основных компонентов: минеральных, органических и микробиологических. Минеральная часть в осадках составляет от 54 % до 90 % (химический состав приведен в таблице 1).

В депонированных осадках органическая составляющая отличается от грунта и состоит в основном из живой и мертвой микрофлоры, растительных остатков и семян растений. Также в осадках могут присутствовать в небольшом количестве синтетические моющие вещества, денатурированные белки и смолистые соединения, которые трудно разлагаются биологическим путем. Наличие в составе осадка ионов тяжелых металлов делает их токсичными.

Тяжелые металлы в почве приводят к связыванию гумусовых веществ и уменьшению их подвижности. Большие концентрации тяжелых металлов могут снизить количество микроорганизмов в почве и замедлить основные биологические процессы. Существует вероятность того, что тяжелые металлы могут переходить из осадков через почву, растения и животных. В пригородных зонах крупных городов содержание этих металлов в почве значительно превышает предельно допустимые концентрации для почв [8]. Поэтому в некоторых случаях осадок может быть менее опасным, чем сама почва. Чтобы снизить концентрацию тяжелых металлов, можно использовать метод разбавления осадка грунтами. Такие грунты могут быть использованы в строительстве, например, в качестве грунта для обратной засыпки, основания для дорог, насыпей, площадок или для вертикальной планировки при создании искусственного ландшафта.

Таблица 1
Сравнительная характеристика минеральной части грунта и осадка сточных вод

| Химические соединения | Грунт, % | ОСВ |
|--------------------------------|--------------|----------|
| SiO ₂ | 40–70 | 14–54 |
| Al ₂ O ₃ | 1–20 | 4,2–12 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,5–10 | 3,4–13,9 |
| CaO | 1–3 | 4,3–12,5 |
| MgO | Близок к 1–3 | 0,39–4,5 |
| K ₂ O | 2–3 | 0,5–0,8 |
| Na ₂ O | 1–3 | 0,5–0,6 |
| SO ₃ | < 1 | 3,2–4 |

Более подходящая классификация для осадков сточных вод — это искусственные грунты, которые могут быть уплотненными в природном залегании, насыпными или намывными [4]. Они представляют собой преобразованные или перемещенные грунты природного происхождения, а также отходы производственной и хозяйственной деятельности человека. Насыпные грунты включают в себя свалки грунтов, отходов производств и бытовых отходов, к которым можно отнести и осадки сточных вод. При сравнении осадков и свалок грунтов, отходов производств и бытовых отходов можно заметить, что осадки сточных вод, подобно насыпным грунтам, имеют неоднородный состав и сложение, неравномерную плотность и сжимаемость, а также содержат органику. Они могут быть разделены на виды в зависимости от степени уплотнения под собственным весом: слежавшиеся — процесс уплотнения завершен и не слежавшиеся — процесс уплотнения продолжается.

Наличие гумуса в сточных водах является характерным их признаком. Количество органического вещества составляет не более 10 %. Белки, ПАВ и гумус не превышает 10 %. Поэтому осадки сточных вод можно отнести к торфяным грунтам, содержащим от 10 до 50 % органических веществ.

Различные виды осадков, такие как осадок с буртов Октябрьской станции биологической очистки и осадок с Вергунской

станции биологической очистки, а также песок с пескоплощадок могут использоваться в качестве грунтов. Для этого были определены физические показатели трех различных видов осадков: № 1 и № 2 имеют пластичность I_p больше единицы, что указывает на их пылевато-глинистую природу, в то время как образец № 3 является песчаным и имеет пластичность I_p равную нулю. № 1 и № 2 являются просадочными и ненабухающими, в то время как образец № 3 представляет собой рыхлый песок.

Проведенные испытания на компрессионную деформацию показали, что образцы № 1, № 2 и № 3 являются слабыми грунтами и неустойчивыми структурно. При нагрузке они будут деформироваться с большими значениями и без дополнительных мероприятий по улучшению не могут быть использованы в качестве естественного основания для сооружений.

Испытаниями были определены деформационные характеристики искусственных насыпных грунтов № 1, № 2 и № 3, такие как модуль деформации и коэффициент сжимаемости. Согласно методике [8], образец был подвергнут постепенной нагрузке величиной 0,1 МПа и выдержан до достижения стабилизации осадки грунта, чтобы его плотность соответствовала приложенной нагрузке. Коэффициент пористости грунта для каждой ступени нагрузки был определен по формуле:

$$e_i = e_0 - \frac{\Delta h}{h}(1 + e_0), \quad (1)$$

где e_0 — начальный (до сжатия) коэффициент пористости грунта;

Δh — фактическая деформация образца;

h — высота образца.

Основные характеристики деформации, такие как коэффициент сжимаемости a и модуль деформации грунта E , были определены на основе данных компрессионной кривой. Если a больше 1 МПа⁻¹, то грунт считается сильносжимаемым, если a находится в диапазоне от 1 до 0,1 МПа⁻¹, то грунт считается средней сжимаемости, а

если a меньше или равно 0,1 МПа⁻¹, то грунт считается слабосжимаемым. Коэффициент сжимаемости a , приведенный коэффициент сжимаемости a_0 и модуль деформации грунта E были вычислены с помощью специальных формул:

$$a = \frac{e_1 - e_2}{p_1 - p_2}; \quad (2)$$

$$a_0 = \frac{a}{1 + e_1}; \quad (3)$$

$$E = \beta / a_0, \quad (4)$$

где e_1 и e_2 — коэффициенты пористости грунта, соответствующие давлениям p_1 и p_2 ;

β — функция Пуассона (для песчаных грунтов $\beta=0,8$, для супесей — 0,74, для суглинков — 0,62, для глин — 0,4).

Для достижения необходимых деформаций, которые не превышают предельных или не уменьшают несущую способность основания, проводятся различные мероприятия, такие как поверхностное и глубинное уплотнение, создание грунтовых подушек, использование глубоких фундаментов и т. д. [9]. Для этого используются коэффициенты пористости грунта e_1 и e_2 , соответствующие давлениям p_1 и p_2 , а также функция Пуассона β , которая зависит от типа грунта (например, для песчаных грунтов $\beta=0,8$, для супесей — 0,74, для суглинков — 0,62, для глин — 0,4). В ходе лабораторных испытаний было проведено поверхностное уплотнение с нагрузкой 1 кг/см², и деформационные характеристики были определены согласно описанной методике. Результаты компрессионных испытаний и осадка приведены в таблице 2.

Из проведенных компрессионных испытаний можно сделать вывод, что образцы грунтов, подвергнутые испытаниям, относятся к категории слабых, так как их модуль деформации E не превышает 5 МПа. Дополнительная нагрузка в виде поверхностного уплотнения приводит к увеличению деформационных характеристик. Однако не были установлены необ-

ходимые значения нагрузок и коэффициента уплотнения для каждого образца в ходе экспериментов.

В ходе исследований было проведено смешивание осадка № 1 с различными грунтами и отходами, имеющими более высокие деформационные показатели, такими как песок, шлак и глина. В качестве грунтов использовались доменный гранулированный шлак Алчевского металлургического комбината, песок и глина из местных карьеров. Песок имеет насыпную плотность $\rho = 1,47 \text{ г/см}^3$, истинную плотность $\rho_s = 2,56 \text{ г/см}^3$ и модуль крупности $M_k = 1,9 \dots 2,0$. Шлак имеет насыпную плотность $\rho = 1,31 \text{ г/см}^3$, истинную плотность $\rho_s = 2,68 \text{ г/см}^3$ и модуль крупности $M_k > 2$. Глина имеет насыпную плотность $\rho = 1,04 \text{ г/см}^3$, истинную плотность $\rho_s = 2,55 \text{ г/см}^3$, влажность $W = 19,05 \%$, влажность на границе пластичности $W_p = 20,09 \%$ и влажность на границе текучести $W_L = 30,43 \%$. Результаты испытаний представлены в таблице 3.

Для разбавления осадка использовались три метода: смешивание осадка с песком, шлаком и глиной. В каждом из трех вариантов соотношения осадка и грунта (о/г) были использованы пропорции 3:1, 1:1 и 1:3. Первое испытание грунтов проводилось в естественном состоянии. На рисунке 1 представлена зависимость модуля деформации от различных соотношений о/г в естественном состоянии.

Таблица 2
Компрессионные испытания ОСВ

| Показатели | Вид осадка | | |
|--|------------|------|------|
| | № 1 | № 2 | № 3 |
| Модуль деформации E в естественном состоянии, МПа | 2,53 | 1,97 | 1,74 |
| Коэффициент сжимаемости a в естественном состоянии, МПа^{-1} | 0,56 | 0,96 | 1,03 |
| Модуль деформации E после уплотнения $P = 1 \text{ кг/см}^2$, МПа | 3,7 | 3,87 | 6,66 |
| Коэффициент сжимаемости a после уплотнения $P = 1 \text{ кг/см}^2$, МПа^{-1} | 0,46 | 0,58 | 0,34 |

Таблица 3
Результаты компрессионных испытаний песка, шлака и глины

| Показатели | Вид грунта | | |
|--|------------|-------|-------|
| | Песок | Шлак | Глина |
| Модуль деформации E в естественном состоянии, МПа | 13,4 | 29,24 | 2,61 |
| Коэффициент сжимаемости a в естественном состоянии, МПа^{-1} | 0,13 | 0,074 | 0,44 |
| Модуль деформации E после уплотнения $P = 1 \text{ кг/см}^2$, МПа | 36,6 | 34,0 | 2,95 |
| Коэффициент сжимаемости a после уплотнения $P = 1 \text{ кг/см}^2$, МПа^{-1} | 0,03 | 0,057 | 0,45 |

При изучении взаимосвязей можно заключить, что при увеличении количества осадка наблюдается снижение модуля деформации в смесях с песком ($E = 13,4 \text{ МПа}$ до $E = 3,5 \text{ МПа}$) и шлаком ($E = 29,2 \text{ МПа}$ до $2,8 \text{ МПа}$). Это происходит из-за повышения коэффициента пористости ($e > 1$) и понижения плотности за счет образования дополнительных пор и пустот при смешивании глинистых и песчаных материалов. При различных концентрациях смеси осадок/глина модуль деформации остается примерно на одном уровне: $E = 2,82,61 \text{ МПа}$. Это объясняется неравномерностью глины и осадка и, как следствие, неравномерным и частичным смешиванием, а также высокой влажностью (глина находится в пластичном состоянии $W = 19,05 \% \approx W_p = 20,09 \%$) и наличием большого количества связанной воды в материалах. Также при этом глина и осадок имеют низкие показатели модуля деформации в естественном состоянии.

На рисунке 2 показаны графики, отражающие изменения модуля деформации в смесях при приложении дополнительной нагрузки в 1 кг/см^2 . Из графиков видно, что характеристики деформации смесей осадок/песок и осадок/шлак значительно увели-

чилились. Это связано с более плотной упаковкой материала (смесь глинистого и песчаного материалов), что привело к уменьшению коэффициента пористости и увеличению плотности смеси. Также важно отметить, что песок и шлак, являясь заполнителями с более высокой прочностью, сильно влияют на модуль деформации. В чистом виде модуль деформации песка и шлака значительно превышает показатели при испытаниях в рыхлом состоянии, так как на стадии предварительного нагружения происходит частичная стабилизация осадка (деформации образцов). Значения для смесей осадок/глина в различ-

ных концентрациях остаются примерно на одном уровне с показателями для чистых материалов ($E = 3,7 \dots 3,82$ МПа). В сравнении с первым опытом, наблюдается незначительное увеличение модуля деформации, что объясняется частичным снижением пористости смесей осадок/глина.

Было проведено испытание смесей с предварительной нагрузкой в размере $P = 3 \text{ кг/см}^2$, для подтверждения теории, что предварительное уплотнение способствует повышению деформационных характеристик. На рисунке 3 показаны результаты испытаний.

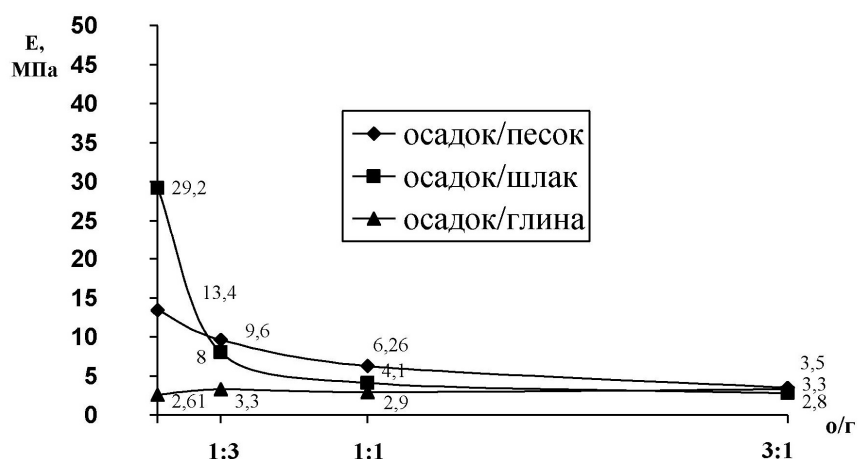


Рисунок 1 — Зависимость модуля деформации E от различных соотношений осадок/грунт (о/г) в естественном состоянии

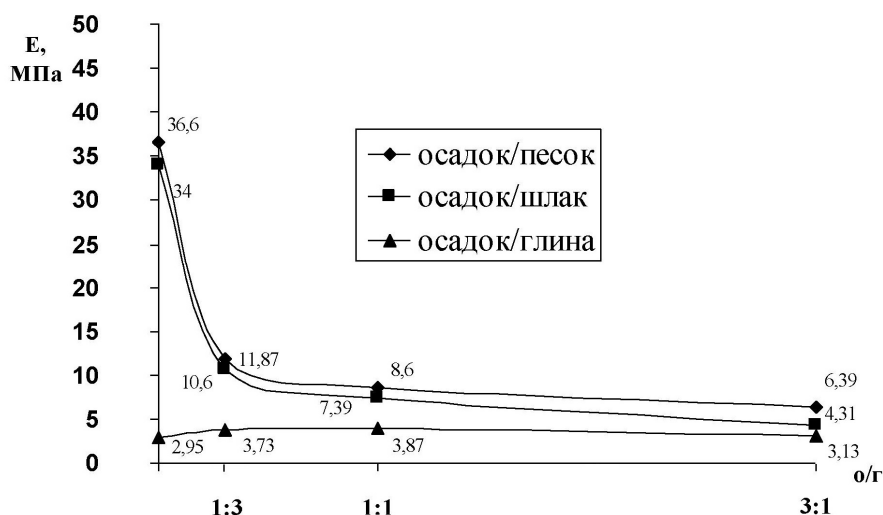


Рисунок 2 — Зависимость модуля деформации E от различных соотношений осадок/грунт (о/г) при дополнительной нагрузке $P = 1 \text{ кг/см}^2$

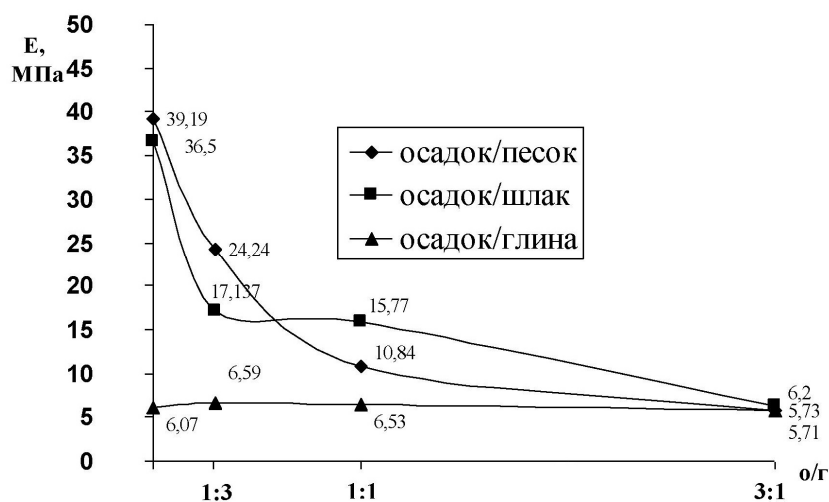


Рисунок 3 — Зависимость модуля деформации E от различных соотношений осадок/грунт (о/г) при дополнительной нагрузке $P = 3 \text{ кг/см}^2$

Результаты испытаний показывают, что модуль деформации смесей осадок/песок и осадок/шлак увеличивается при различных концентрациях по сравнению с предыдущими испытаниями. При этом показатели песка и шлака в чистом виде практически не отличаются от полученных при нагружении $P = 1 \text{ кг/см}^2$, возможно, благодаря частичной стабилизации осадка при этом нагружении, которое завершается на этапе уплотнения $P = 3 \text{ кг/см}^2$. Смесей осадок/глина также показали улучшение своих показателей с $E = 3,82 \text{ МПа}$ до $E = 6,07 \text{ МПа}$ и остаются относительно на одном уровне независимо от концентраций (от $E = 5,71 \text{ МПа}$ до $E = 6,07 \text{ МПа}$).

Выводы и направление дальнейших исследований. Существует проблема отсутствия способов обработки старых осадков и их классификации. После анализа возможных методов утилизации осадков можно сделать вывод, что все они предназначены для свежих осадков, а не для старых, которые накопились за несколько лет. Для утилизации депонированных осадков нет технологий, кроме захоронения.

Изучение характеристик осадков с точки зрения почвенных свойств показало, что они нестабильны в структурном плане и отно-

сятся к слабым грунтам (с низкой несущей способностью, с высоким содержанием торфа в рыхлом состоянии и с незавершенным процессом уплотнения). Поэтому без дополнительных мер по искусственному улучшению они не могут быть использованы в качестве естественного основания для строительства зданий и сооружений.

Проведенные испытания на сжатие искусственных насыпных грунтов, содержащих осадки сточных вод, показали, что предварительное уплотнение поверхности способствует улучшению их деформационных свойств. Смесей осадка с песком и шлаком при дополнительной нагрузке имеют приемлемые показатели прочности и деформации, что расширяет возможности их дальнейшего использования. Показатели смеси осадок/глина остались практически неизменными по сравнению с их прочностными характеристиками в чистом виде до нагрузок.

Из результатов испытаний на деформацию можно сделать вывод, что искусственные грунты могут быть использованы в строительстве как материал для обратной засыпки, основания для дорог, насыпей, площадок или для создания искусственного ландшафта.

Список источников

1. Брындина Л. В., Платонов А. Д., Бакланова О. В. Биодобрения на основе осадков сточных вод как катализаторы трансформационных процессов почвы // *Экология и промышленность России*. 2019. Т. 23. № 1. С. 42–45.
2. Брындина Л. В. Осадки сточных вод как мелиоранты почв // *Развитие идей Г. Ф. Морозова при переходе к устойчивому лесопользованию : Материалы международной научно-технической юбилейной конференции, г. Воронеж, 20–21 апреля 2017 года*. Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова, 2017. С. 128–130.
3. Брындина Л. В., Полянский К. К., Стазаева Н. В. Применение осадка сточных вод в качестве биодобрения // *Аграрная наука*. 2016. № 4. С. 2–3.
4. Гуцина Ю. А., Ермохин Ю. И. Использование осадков сточных вод как удобрение и депонирование их в почву г. Челябинска // *Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии : сборник статей XXIII международной научно-практической конференции, г. Пенза, 26–27 апреля 2021 года*. Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2021. С. 38–44.
5. Дженис Ю. А. Принципы депонирования осадков сточных вод // *Управление почвенным плодородием и питанием культурных растений. Экологические аспекты природопользования : сборник материалов, посвящённый 80-летию со дня рождения профессора, основателя и руководителя научной школы Ю. И. Ермохина, г. Омск, 16 июля 2015 года / ФГБОУ ВПО «Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина»*. Омск : ЛИТЕРА, 2015. С. 68–72.
6. Использование вымороженных коллоидных осадков шлам-лигнина ОАО "Байкальский ЦБК" в качестве почвогрунта / А. В. Богданов, К. В. Федотов, А. С. Шатрова, Г. Г. Попова // *Экология и промышленность России*. 2020. Т. 24. № 1. С. 24–29.
7. Демиденко Г. А. Агроэкологическая оценка осадков сточных вод на очистных сооружениях города Красноярска // *Вестник КрасГАУ*. 2018. № 4 (139). С. 240–244.
8. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М. : Стандартинформ, 2020. 38 с.

© Дрозд Г. Я., Хвортова М. Ю., Бизирка И. И.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ВТГВ ИСА и ЖКХ ЛГУ им. В. Даля Соколовым В. И., к.т.н., доц. каф. ТОМП ДонГТУ Левченко Э. П.

Статья поступила в редакцию 07.03.2024.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Дрозд Геннадий Яковлевич, д-р техн. наук, профессор каф. промышленного, гражданского строительства и архитектуры

Луганский государственный университет имени В. Даля,
г. Луганск, Луганская Народная Республика, Россия

Хвортова Марина Юрьевна, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. промышленного, гражданского строительства и архитектуры

Луганский государственный университет имени В. Даля,
г. Луганск, Луганская Народная Республика, Россия

Бизирка Ирина Ивановна, канд. техн. наук, доцент каф. промышленного, гражданского строительства и архитектуры

Луганский государственный университет имени В. Даля,
г. Луганск, Луганская Народная Республика, Россия,
e-mail: bizirkaira@mail.ru

Drozd G. Ya., Khvortova M. Yu., *Bizirka I. I. (*V. Dahl Lugansk State University, Lugansk People's Republic, Russia, *e-mail: bizirkaira@mail.ru*)

UTILIZATION OF DEPOSITED SEWAGE SLUDGE AS ARTIFICIAL SOILS

The paper discusses the problem of zero-classification of storage duration and methods of disposal of sewage sludge. The studied results are also presented of the physical-mechanical, strength and deformation properties of sediments considering their use as soil. Based on the results of deformation tests, the obtained characteristics of artificial soils allow us to conclude about the possibility of their use in construction, for example, as a soil for backfilling, a foundation for roads, embankments, platforms, or for vertical planning when creating an artificial landscape.

Key words: *deposited sewage sludge, soil, heavy metals, artificial foundations, maximum permissible concentrations, utilization.*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Drozd Gennadiy Yakovlevich, *Doctor of Engineering. Sciences, professor of the Department of Industrial, Civil Engineering and Architecture Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk, Lugansk People's Republic, Russia*

Khvortova Marina Yuriyevna, *Ph.D., Faculty of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Industrial, Civil Engineering and Architecture Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk, Lugansk People's Republic, Russia*

Bizirka Irina Ivanovna, *Ph.D., Faculty of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial, Civil Engineering and Architecture Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk, Lugansk People's Republic, Russia e-mail: bizirkaira@mail.ru*