Оригинальная статья
https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-63-68
УДК 627.83:626.88

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОТИВОЭРОЗИОННОГО БЕТОННОГО ПОЛОТНА МАРКИ BENOTEX SK

Н.В. Ханов✉, О.Н. Черных, Т.Ю. Жукова, Д.А. Алексеев, Х. Алабар
Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

Аннотация. Целью исследований стало определение коэффициента шероховатости бетонного полотна марки BeNotex SK. Рассмотрены особенности модельной установки для определения гидравлических характеристик бетонного полотна и описана методика их определения. Проведенные гидравлические исследования были направлены на определение коэффициента шероховатости исследуемого покрытия. Исследования проводились на экспериментальной установке трапецеидального сечения с вертикальным правым, наклонным левым откосами. Изучение коэффициента шероховатости n выполнялось на контрольном участке, стенки и дно которого полностью покрывались полотном. Длина рабочего участка с исследуемым материалом составляла 6 м. Найдено среднее значение коэффициента шероховатости и даны рекомендации для использования подобного покрытия в качестве противоэрозионного. Проведенные гидравлические исследования для материала бетонного полотна марки Be-Notex SK показали положительные возможности применения такого крепления в практике гидромелиоративного строительства.

Ключевые слова: укрепление, эрозия, покрытие, полотно бетонное BeNotex SK, защита, коэффициент шероховатости

Формат цитирования: Ханов Н.В., Черных О.Н., Жукова Т.Ю., Алексеев Д.А., Алабар Х. Результаты исследований гидравлических свойств противоэрозионного бетонного полотна марки Be-Notex SK // Природообустройство. 2025. № 3. С. 63-68. https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-63-68

Original article

RESULTS OF STUDYING HYDRAULIC PROPERTIES OF ANTI-EROSION CONCRETE SHEET OF BENOTEX SK BRAND

N.V. Khanov✉, O.N. Chernykh, T.Yu. Zhukova, D.A. Alekseev, H. Alabar
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev; Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakov; 127434, Moscow, st. Timiryazevskaya, 49, Russia

Abstract. The aim of the study was to determine the roughness coefficient of the BeNotex SK concrete sheet. The features of the model installation for determining the hydraulic characteristics of the concrete sheet are considered and the method for determining them is described. The hydraulic studies were aimed at determining the roughness coefficient of the studied coating. The studies were carried out on an experimental installation of trapezoidal cross-section with a vertical right and inclined left slopes. The study of the roughness coefficient "n" was carried out on a control section, the walls and bottom of which were completely covered with the sheet. The length of the working section with the material under study was 6 m. The average value of the roughness coefficient was found and recommendations were given for using such a coating as an anti-erosion coating. The hydraulic studies carried out for the Be-Notex SK concrete sheet material showed positive possibilities for using such fastening in the practice of irrigation and drainage construction.

Keywords: reinforcement, erosion, coating, concrete sheet BeNotex SK, protection, roughness coefficient

Format of citation: Khanov N.V., Chernykh O.N., Zhukova T.Yu., Alekseev D.A., Alabar H. Results of research of hydraulic properties of anti-erosion concrete sheet of BeNotex SK brand // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 3. P. 63-68. https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-63-68

Введение. Мероприятия по берегоукреплению включают в себя комплекс работ, который направлен на защиту прибрежной линии природных и искусственных водоемов от подмыва, обвала и эрозии берегового склона под воздействием течения воды и волн, а также размыва ливневыми потоками. На откосы сооружений чаще всего воздействуют экзогенные процессы, вследствие которых интенсифицируется эрозия береговой зоны (рис. 1). В результате

© Ханов Н.В., Черных О.Н., Жукова Т.Ю., Алексеев Д.А., Алабар Х., 2025

негативного воздействия воды происходят как разрушения берегов рек, а также откосов гидротехнических сооружений (ГТС), так и любых других объектов, подверженных этому воздействию [1]. Все это приводит к колоссальному ущербу и значительному увеличению расходов по возобновлению работы ГТС водных объектов, откосов насыпей, плотин и дамб на них, в первую очередь теряющих устойчивость, снижающих надежность и безопасность работы основных сооружений прибрежных территорий. В зависимости от задач ГТС облицовки откосов могут выполняться из различных материалов [2, 3].

Одним из таких конструктивных средств является бетонное полотно марки BeNotex SK – композитный материал, состоящий из объемного полимерного мата, двух слоев текстиля, соединенных между собой пространственной полимерной решеткой, и дублированного подложкой из ПВХ мембраны (рис. 2). Данное покрытие толщиной 7, 8, 9, 10 мм производится в рулонах длиной 20,0 м и шириной 2,0 м, благодаря чему его просто доставлять до объекта строительства. Также материал можно достаточно легко укладывать на откос.

Инновационный материал используется для устройства защитного слоя при ремонте, реконструкции и сооружении новых водоотводных объектов в гидротехническом и дорожном строительстве (рис. 3).

Перед укладкой данного покрытия, необходимо проводить подготовку основания: с поверхности убирают корни растений,

Рис. 1. **Обрушение и эрозия неукрепленных береговых склонов реки Жиздра** (фото Т.Ю. Жукова)

Fig. 1. **Collapse and erosion of unfortified bank slopes of the Zhizdra River** (photo: T.Y. Zhukova)

а б

Рис. 2. **Структура (а) и общий вид (б) бетонного полотна марки BeNotex SK**

Fig. 2. **Structure (a) and general appearance (b) of BeNotex SK concrete roadbed**

а б

Рис. 3. **Применение бетонного полотна марки BeNotex SK для укрепления водных объектов:** а – укрепление канала; б – покрытие дорожных кюветов (фото С.Н. Щукина)

Fig. 3. **The use of BeNotex SK concrete sheet for strengthening water bodies:** a – strengthening the canal; b – road ditch coating (photo: S.N. Shchukin)

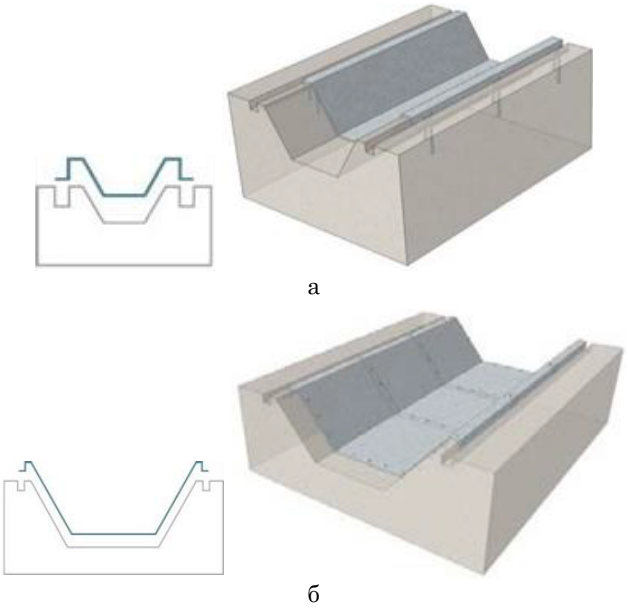
камни и строительный мусор. Основание должно быть уплотнено и иметь ровный профиль. Монтаж бетонного полотна BeNotex SK осуществляется в соответствии с геометрией основания, вдоль или поперек оси сооружения и с низу в верх при наличии уклона (рис. 4). При фиксации стыка полотен рекомендуется использовать комбинированное применение крепежа: анкеры – по краям полотна и в анкерной канаве, саморезы – по длине стыка.

После монтажа и закрепления бетонное полотно увлажняют водой. Время полива участка составляет, как правило, несколько минут. Процесс равномерного полива полотна и насыщение полотна водой осуществляются визуально. Завершение этапа полива участка полотна происходит при фиксации насыщения полотна водой и образования стока по поверхности. Полив участка, как правило, занимает несколько минут. Для обеспечения достаточной гидратации бетонное полотно повторно проливается через час, время твердения составляет 90 мин. В зависимости от наружной температуры и влажности окружающей среды, количества и температуры воды, используемой для гидратации, материалу BeNotex SK необходимо время минимум 24 ч, чтобы быть готовым к эксплуатации.

Материалы и методы исследований. Целью экспериментальных работ стало проведение гидравлических исследований инновационного покрытия – бетонного полотна марки BeNotex SK – для уточнения рекомендаций по его применению с учетом условий монтажа, крепления полотен после монтажа, качественной гидратации и твердения. Актуальность проведенных исследований фрагмента канала с покрытием из гидроизолирующего и защитного материала BeNotex SK заключается в получении недостающих данных для гидравлического расчета водопропускных сооружений с подобной гидроизолирующий противоэрозионной защитой и в оценке диапазона устойчивой безопасной работы всего инженерно-технического комплекса в целом.

Исследования защитного покрытия канального участка из бетонного полотна марки BeNotex SK были выполнены на экспериментальной площадке кафедры ГТС ИМВХС имени А.Н. Костякова. На лабораторной установке имелась возможность изменения расхода поступающей воды и уклона дна русла в довольно большом диапазоне [4, 5]. Гидравлический лоток имел трапецеидальную форму сечения с вертикальным откосом с одной стороны и с откосом с заложением 1 : 1 – с другой. Изучение коэффициента шероховатости n выполнялось на контрольном участке, стенки и дно которого полностью покрывались полотном BeNotex SK (рис. 5). Длина участка с исследуемым материалом составила 6 м [6].

Основная часть экспериментов была проведена при равномерном режиме работы канала и расходах Q, равных 84,33 л/с,



а

б

Рис. 4. **Схема укладки бетонного полотна в зависимости от геометрических размеров канала:**
а – продольная укладка полотна в одно и два полотна;
б – поперечная укладка в три полотна

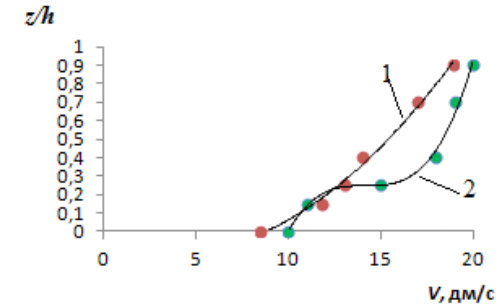
Fig. 4. **Scheme of laying the concrete roadbed depending on the geometric dimensions of the channel**:
a – longitudinal laying of the sheet in one and two sheets;
b – transverse laying in three sheets

Рис. 5. **Экспериментальная модель участка канала с бетонным покрытием из полотна BeNotex SK перед пуском** (фото Т.Ю. Жуковой)

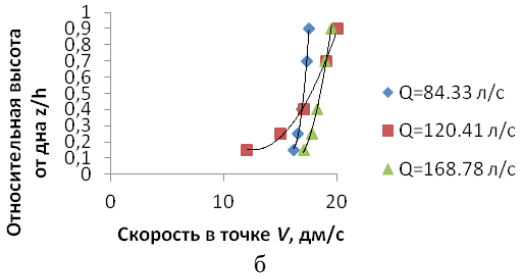
Fig. 5. **Experimental model of a section of a canal with a concrete coating made of BeNotex SK sheet before start-up** (photo by T.Y. Zhukova)

120,41 л/с и Q = 168,78 л/с, уклонах дна лотка i = 0,01 и i = 0,05.

При фиксации полотен бетонного полотна использовались саморезы из нержавеющей стали длиной не менее 65 мм. Шаг между саморезами по краям составлял в среднем 20 см. Саморезы вкручивались на расстоянии 4…5 см от края полотен и на расстоянии 3…4 см от края стыка внахлест [7]. Процесс равномерного полива полотна и насыщение полотна водой осуществлялся визуально. Завершение этапа полива участка полотна происходило при фиксации насыщения его водой и образования стока по поверхности.



а



б

Рис. 6. **Эпюры скоростей потока $V = f(z/h)$ в створе 3 при y = 510 мм:**
а – при расходе Q = 120,41 л/с и разных уклонах дна водотока i; 1 – i = 0,01; 2 – i = 0,05; б – при i = 0,05 и различных расходах Q = 84, 33; 120,41 и 168,78 л/с

Fig. 6. **Diagrams of flow velocities V = f(z/h) at site 3 at y = 510 mm:**
a – at flow rate Q = 120.41 l/s and different slopes of the bottom of the watercourse i; 1 – i = 0,01; 2 – i = 0,05; b – with i = 0.05 and various discharges Q = 84, 33; 120.41 and 168.78 l/s

Таблица. **Результаты расчёта коэффициента шероховатости n для бетонного полотна марки BeNotex SK**

Table. **Results of calculation of the roughness coefficient n for the concrete sheet of the BeNotex SK brand**

Параметр *Parameter*	$n_{ср}$	n_{min}	n_{max}
$n_{г-к}$	0,0157	0,0153	0,0162
$n_{м}$	0,0163	0,0160	0,0169
$n_{п}$	0,0160	0,0156	0,0165

Для обеспечения достаточной гидратации бетонное полотно повторно проливалось через час.

Результаты и их обсуждение. Измерение кинематических характеристик потока было выполнено в 5 мерных створах по длине контрольного участка на его границах и в 3 промежуточных сечениях. В каждом сечении измерение скоростей трубкой Пито и оценка полной энергии потока выполнялись на 11 вертикалях в 6 точках по глубине водотока [8]. После определения скоростей находился коэффициент шероховатости n и другие гидравлические характеристики потока [9, 10], выполнялось построение эпюр скоростей $V = f(z/h)$, приведенных на рисунке 6.

Для определения коэффициента шероховатости n был разработан алгоритм гидравлического расчета, блок-схема которого представлена на рисунке 7, с использованием зависимостей Гангилье-Куттера ($n_{г-к}$), Маннинга ($n_{м}$) и Н.Н. Павловского ($n_{п}$) [11]. Результаты расчета коэффициента по трем основным зависимостям n для бетонного полотна марки BeNotex SK представлены с общепринятыми обозначениями величин [1-12] в таблице.

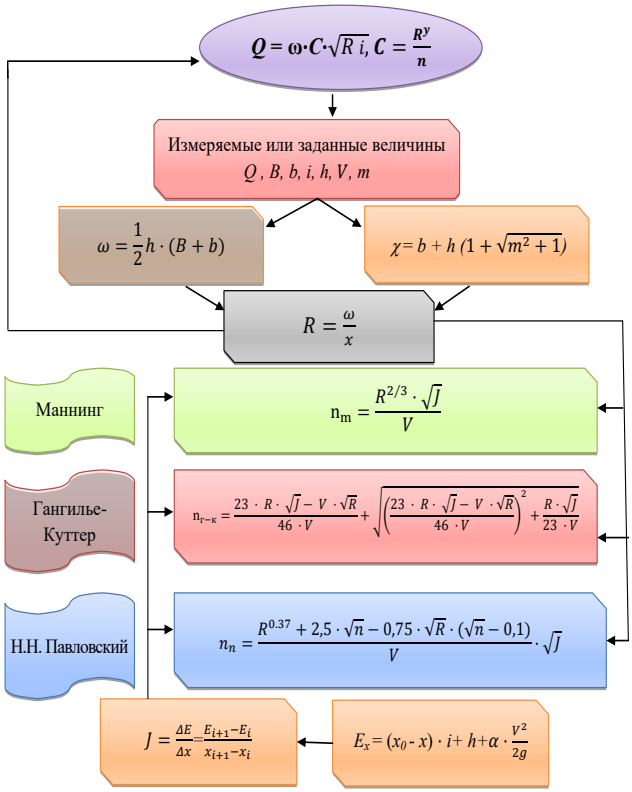


Рис. 7. **Предложенная блок-схема гидравлического расчета каналов и участков русел водотоков, укрепленных бетонным полотном марки BeNotex SK**

Fig. 7. **Proposed block diagram of hydraulic calculation of canals and sections of watercourse channels reinforced with concrete sheet BeNotex SK**

Благодаря полученным уточненным значениям коэффициентов шероховатости внедряемого на водных объектах АПК покрытия из бетонного полотна BeNotex SK, можно достаточно достоверно выполнить гидравлический расчет естественного водотока после ревитализации и водоотводного ГТС с защитным полотном данного типа при изменении в большом диапазоне граничных параметров, встречающемся в практике мелиоративного строительства [12]. Значения коэффициента шероховатости, полученные во время исследований, получились довольно схожими со значениями n для таких облицовок, как обыкновенная бутовая кладка, старая кирпичная кладка, грубая бетонировка или гладкая, хорошо разработанная скала, у которых данный коэффициент n = 0,014…0,017 и ниже, чем для геомата со щебнем [6, 8] или с травой сорта Райграс (рис. 8).

На основании проведенного анализа и после оценки коэффициентов шероховатостей n по трем классическим формулам (Маннинга, Н.Н. Павловского и Гангилье-Куттера) при варьировании расходов и уклонов водотоков в исследованных рамках рекомендовано в качестве расчетных использовать значение n = 0,0163, что при симметричной форме поперечного сечения канала пойдет в запас при оценке пропускной способности водных объектов, ложе которых укреплено бетонным полотном марки BeNotex SK.

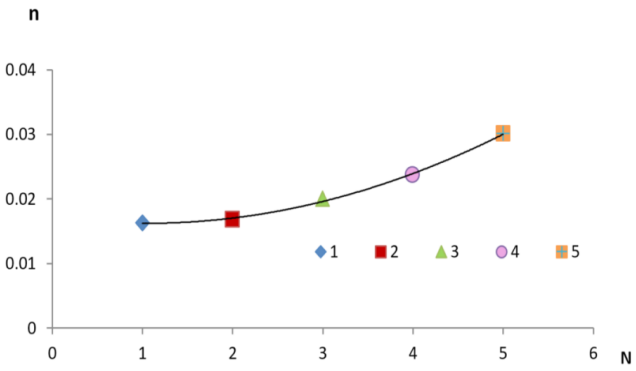


Рис. 8. **График зависимости коэффициента шероховатости *n* для разных типов покрытий, исследованных на модели фрагмента канала в гидравлическом лотке лаборатории водопропускных сооружений ИМВХС имени А.Н. Костякова:**
1 – бетонное полотно BeNotex SK;
2 – геомат Энкамат А20 со щебнем и битумом;
3 – геомат с битум-полимерным вяжущим;
4 – геомат со щебнем; 5 – геомат с травой сорта Райграс

Fig. 8. **Graph of the dependence of the roughness coefficient *n* for different types of coatings studied on the model of the canal fragment in the hydraulic flume of the laboratory of culverts of the Institute of land reclamation, water management and construction named after A.N. Kostyakov:**
1 – concrete sheet BeNotex SK;
2 – Enkamat A20 geomat with crushed stone and bitumen;
3 – geomat with bitumen-polymer binder;
4 – geomat with crushed stone;
5 – geomat with grass of the Ryegrass variety

Выводы

Проведенные гидравлические исследования защитного покрытия из бетонного полотна марки BeNotex SK позволяют сделать следующие общие выводы.

Противоэрозионные рулоны BeNotex SK в стандартных размерах работают надежно при скоростях потока в канале более 2,2 м/с, стабильно защищая при этом грунтовое русло водотока. При гидравлических расчетах пропускной способности искусственных и естественных русел водотоков после ренатурирования, покрытых на отдельных участках материалом из геокомпозита BeNotex SK, при пользовании формулой Маннинга для определения коэффициента Шези «*C*» следует принимать значение коэффициента шероховатости n = 0,0163. Проведенные гидравлические исследования для материала – бетонное полотно марки BeNotex SK – показали реальные возможности применения такого крепления в практике гидромелиоративного строительства.

Список использованных источников

1. Гурьев А.П. Использование композиционных геоматов для борьбы с водной эрозией / Гурьев А.П., Ханов Н.В., Еремеев А.В., Козлов К.Д., Фартуков В.А., Щукин С.Н. / Монография. М.: РГАУ МСХА, 2020. 253 с.

2. Ханов Н.В. Обзор применения современных геосинтетических материалов в гидротехническом строительстве / Н.В. Ханов, А.В. Еремеев // Международная научная конференция молодых ученых и специалистов, посвященная 150-летию РГАУ-МСХА. 2015. С. 336-339.

3. Козлов К.Д. Гидравлические исследования покрытия из геокомпозитного материала / К.Д. Козлов, А.П. Гурьев, Н.В. Ханов // Природообустройство. 2014. № 5. С. 80-86.

References

1. Guryev A.P. Use of composite geomats to combat water erosion / Guryev A.P., Khanov N.V., Eremeev A.V., Kozlov K.D., Fartukov V.A., Shchukin S.N. / The monograph. M.: RGAU-MSHA, 2020. 253 p.

2. Khanov N.V. Review of the use of modern geosynthetics in hydraulic engineering / N.V. Khanov, A.V. Eremeev // In the collection: International scientific conference of young scientists and specialists dedicated to the 150th anniversary of the RGAU-MAA named after C.A. Timiryazev Collection of articles. M.: Publishing house of the RGAU-MTAA. 2015. P. 336-339.

3. Kozlov K.D. Hydraulic studies of the coating made of geocomposite material / K.D. Kozlov, A.P. Guryev, N.V. Khanov // Prirodoobustrojstvo. 2014. No. 5. P. 80-86.

4. Козлов К.Д. Модельные гидравлические исследования для определения коэффициента шероховатости материала Энкамат А20 / К.Д. Козлов, А.П. Гурьев, Д.В. Козлов, Н.В. Ханов //Научная жизнь. 2016. № 1. С. 6-12.

5. Гурьев А.П. Гидравлические исследования противоэрозионного покрытия – геомата марки Энкамат А20 / А.П. Гурьев, Д.В. Козлов, Н.В. Ханов, В.А. Фартуков, А.И. Новиченко, С.Н. Щукин // Международная научная конференция «Научное кадровое обеспечение продовольственной безопасности России». Доклады ТСХА. Изд-во: Грин Эра 2, 2015. С. 358-363.

6. Чоу В.Т. Гидравлика открытых каналов / В.Т. Чоу. М: изд-во Литерат. по стр-ву, 1969. 462 с.

7. Khatsuria R.M. Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators / R.M. Khatsuria – New York.: Marcel Dekker, 2005. 649 p.

8. Козырь И.Е., Пикалова И.Ф., Ханов Н.В. Практикум по гидравлике. Учебно- методическое пособие. СПб.: «Лань», 2016. 176 с.

9. Schippers W. and K. Pon, Grondsoort, vegetatie en erosiebestendigheid, Landbouwuniversiteit, Wageningen, 1983.

10. Hewlett H.W.M, Boorman L.A. and M.E. Bramley, Design of reinforced grass waterways, Report 116, CIRIA, London, 1987.

11. Жукова Т.Ю. Экспериментальные исследования коэффициента шероховатости покрытия из композиционного геомата, заполненного щебнем / Т.Ю. Жукова, Н.В. Ханов, О.Н. Черных, С.Н. Редников // Мелиорация и гидротехника. 2024. Т. 14. № 2 С. 260-274.

12. Ханов Н.В. Результаты гидравлических исследований геоматов марки Энкамат А20 и Энкамат 7225, заполненных грунтом с посевом многолетних трав/ Н.В. Ханов, О.Н. Черных, С.Н. Щукин, Т.Ю. Жукова, Д.А. Алексеев // Природообустройство. 2024. № 5. С. 71-79. https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-5-71-79

4. Kozlov K.D. Model hydraulic studies to determine the roughness coefficient of the Enkamat A20 material / K.D. Kozlov, A.P. Guryev, D.V. Kozlov, N.V. Khanov // Scientific life. 2016. No. 1. P. 6-12.

5. Guryev A.P. Hydraulic studies of the anti-erosion coating – geomat brand Enkamat A 20 / A.P. Guryev, D.V. Kozlov, N.V. Khanov, V.A. Fartukov, A.I. Novichenko, S.N. Shchukin // International scientific conference "Scientific personnel support for food security in Russia". Reports of the Timiryazev Agricultural Academy. Publisher: Green Era 2, 2015. P. 358-363.

6. Chow V.T. Hydraulics of open channels / V.T. Chow. Moscow: Literature on building, publishing house, 1969. 462 p.

7. Khatsuria R.M. Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators / R.M. Khatsuria -New York.: Marcel Dekker, 2005. 649 p.

8. Kozyr I.E., Pikalova I.F., Khanov N.V. Practical training in hydraulics. Educational-methodical manual. St. Petersburg, "Lan", 2016. 176 p.

9. Schippers W. and K. Pon, Grondsoort, vegetatie en erosionbestendigheid, Landbouwuniversiteit, Wageningen, 1983.

10. Hewlett H.W.M, Boorman L.A. and M.E. Bramley, Design of reinforced grass waterways, Report 116, CIRIA, London, 1987.

11. Zhukova T.Yu. Experimental studies of the roughness coefficient of a coating made of composite geomat filled with crushed stone / T.Yu. Zhukova N.V. Khanov, O.N. Chernykh O.N., S.N. Rednikov // Land Reclamation and Hydraulic Engineering. 2024. Vol. 14. No. 2, P. 260-274.

12. Khanov N.V. Results of hydraulic studies of Enkamat A20 and Enkamat 7225 geomats filled with soil and perennial grass seeding / N.V. Khanov, O.N. Chernykh, S.N. Shchukin T.Yu. Zhukova, D.A. Alekseev // Prirodoobustrojstvo. 2024. No. 5. P. 71-79. https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-5-71-79

Об авторах

Нартмир Владимирович Ханов, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой ГТС; WoS ResearcherID: L-1087-2013; Scopus AuthorID: 6603959022; ORCID: 0000-0002-5764-4734; SPIN-код: 4314-8184; AuthorID: 464889; khanov@rgau-msha.ru

Ольга Николаевна Черных, канд. техн. наук, доцент, WoS ResearcherID: S-2542-2018/; Scopus AuthorID: 57213261727; ORCID: 0000-0003-2905-446X; SPIN-код:7757-7969; AuthorID: 692667; chernih@rgau-msha.ru

Татьяна Юрьевна Жукова, ассистент; WoS ResearcherID: RIDAAE–5204-2022/; Scopus AuthorID: 57433774600; ORCID: 0000-0002-9654-3039; SPIN-код:5357-4597; AuthorID: 1111184; t.zhukova@rgau-msha.ru

Даниил Андреевич Алексеев, ассистент, ORCID: 0009-0009-1890-3471; SPIN-код:8085-3065; daniil.alekseev@rgau-msha.ru

Алабар Ханан, магистр, hananalabar180@gmail.com

About the authors

Nartmir V. Khanov, DSc (Eng), professor; WoS ResearcherID: L-1087-2013; Scopus AuthorID: 6603959022; ORCID: 0000-0002-5764-4734; SPIN-code: 4314-8184; AuthorID: 464889; khanov@rgau-msha.ru

Olga N. Chernykh, DSc (Eng), professor; WoSResearcherID: S-2542-2018/; Scopus AuthorID: 57213261727; ORCID: 0000-0003-2905-446X; SPIN-code:7757-7969; AuthorID: 692667; chernih@rgau-msha.ru

Tatyana Yu. Zhukova, assistant; WoS ResearcherID: RIDAAE–5204-2022/; Scopus AuthorID: 57433774600; ORCID: 0000-0002-9654-3039; SPIN-code:5357-4597; AuthorID: 1111184; t.zhukova@rgau-msha.ru

Daniil A. Alekseev, assistant, ORCID: 0009-0009-1890-3471; SPIN-code:8085-3065; daniil.alekseev@rgau-msha.ru

Hanan Alabar, master; hananalabar180@gmail.com

Критерии авторства / Criteria of authorship

Н.В., Черных О.Н., Жукова Т.Ю., Алексеев Д.А., Алабар Х. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат. Khanov N.V., Chernykh O.N., Zhukova T. Yu, Alekseev D.A., Alabar H. carried out practical and theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Khanov N.V., Chernykh O.N., Zhukova T. Yu, Alekseev D.A., Alabar H. have a copyright on the article and they are responsible for plagiarism.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляет об отсутствии конфликтов интересов / The authors declare no conflicts of interest

Вклад авторов / Contribution of authors

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 18.03.2025 Одобрена после рецензирования и доработки / received after peer review and revision on 28.04.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 28.04.2025