






Обзорная статья/ Review article

УДК 699.822

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-1-68-81>

CC BY 4.0

Проблемы применения нанотехнологий в строительстве берегозащитных сооружений и мероприятиях по берегоукреплению водохранилищ (на примере Новосибирского водохранилища)

Татьяна Викторовна Пилипенко^{1*} , Дмитрий Вячеславович Козлов² , Кирилл Андреевич Давыдов¹ ,
Дмитрий Анатольевич Ефременко¹ , Даниил Евгеньевич Куприянов¹ 

¹ Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, Новосибирск, Российская Федерация

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: taniavp_2005@rambler.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Использование наноматериалов и применение нанотехнологий является одним из важнейших направлений эффективного мирового научного и технологического развития. Нанотехнологии предполагают контролируемое регулирование свойств объектов на молекулярном и надмолекулярном уровне, определяющих большинство фундаментальных параметров и свойства физических объектов, на основе целенаправленного манипулирования их атомами и молекулами. В гидротехническом строительстве это использование наноматериалов и технологий, которые улучшают свойства строительных материалов и конструкций, повышают их долговечность и устойчивость к внешним воздействиям. **Методы и материалы.** Новосибирское водохранилище является уникальным водным объектом комплексного назначения. Уже более 60 лет оно интенсивно используется в народнохозяйственных целях – является источником водоснабжения, основной зоной рекреации жителей г. Новосибирска, Новосибирской области и Алтайского края, эксплуатируется для судоходства и рыбного хозяйства. В двухкилометровой зоне прибрежной полосы водохранилища расположен 41 населенный пункт, в том числе города Камень-на-Оби, Бердск, Искитим, Ордынское. Прибрежная облесенная территория служит местом расположения оздоровительных учреждений, коттеджных, дачных поселков и садоводческих обществ, местом кратковременного отдыха населения. В связи с этим рекреационная нагрузка на береговую зону водохранилища находится на очень высоком уровне, в том числе по причине обрывистости берегов. Для расчетного обоснования берегоукрепительных гидротехнических сооружений на водоемах используются различные методы, которые учитывают, в первую очередь, природные условия и особенности участка береговой линии водного объекта. Результаты расчетов проводятся и уточняются на основе натуральных исследований, а также при необходимости лабораторных испытаний и экспериментов. **Результаты.** В работе представлены расчеты для определения расчетных параметров сооружения, таких как: высота ветрового нагона, высота наката волны, отметка верха сооружения, размыв перед каменным банкетом, расчетный состав каменного банкета, параметры каменного банкета. **Обсуждение.** В настоящее время существует множество разновидностей наноразмерных добавок и наномодифицированных материалов. Возможности реализации механизмов модифицирования определяются видом, характеристиками и дозировкой наноразмерных частиц. В качестве предложения авторы предлагают обратить внимание на применение георешеток с различными размерами ячеек и наномодифицированных бетонов. Однако стоит отметить, что в настоящее время даже при низком необходимом содержании наномодифицирующих добавок (2–3% от общей массы бетона) добавление таких добавок существенно увеличит себестоимость материала. Сравнение же технико-экономических показателей в таком случае однозначно укажет на этот недостаток и, как следствие, невозможность применения такого варианта по экономическим причинам. **Выводы.** Одним из важнейших критериев оценки перспективности внедрения нанотехнологических инноваций в строительную отрасль служит их конечная себестоимость. Наномодификаторы для бетона и строительных растворов по цене 100 долларов за грамм — при том, что их прочностные качества вырастают на 30%, вряд ли будут востребованы. Большинство экспертов сходятся во мнении, что наноструктурировать следует материалы массового применения: бетон, металл, композитные материалы на основе волокон. Применять данные прорывные технологии можно во многих областях, в том числе и в гидротехническом строительстве, укрепляя бетонные основания ГТС, создавая гибкие пластичные георешетки, подбирая и создавая новые качественные заполнители для них и пр. Также, благодаря новым наноматериалам,

© Пилипенко Т.В., Козлов Д.В., Давыдов К.А., Ефременко Д.А., Куприянов Д.Е., 2026

можно выпускать металл, который будет служить на порядок дольше современных образцов. Научных разработок в данной области достаточно. Теперь необходимо найти им практическое применение. Но данный вектор развития влечет за собой потребность в переоборудовании производства, обучении персонала и прочее.

БЛАГОДАРНОСТИ: Данная научная работа выполнена при поддержке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» и имеет регистрационный номер карты в ЕГИСУ НИОКТР: 125070808055-3.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нанотехнологии, наноматериалы, гидротехническое сооружение, чрезвычайная ситуация, водохранилище

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Пилипенко Т.В., Козлов Д.В., Давыдов К.А., Ефременко Д.А., Куприянов Д.Е. Проблемы применения нанотехнологий в строительстве берегозащитных сооружений и мероприятиях по берегоукреплению водохранилищ (на примере Новосибирского водохранилища). *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(1):68–81. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-1-68-81>. – EDN: VKLCPI.

Challenges in applying nanotechnology to the construction of coastal protection structures and bank reinforcement measures for reservoirs: case study of the Novosibirsk reservoir

Tatyana V. Pilipenko^{1*} , Dmitry V. Kozlov² , Kirill A. Davydov¹ , Dmitry A. Efremenko¹ , Daniil E. Kupriyanov¹ 

¹ Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russian Federation

² National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: taniavp_2005@rambler.ru

ABSTRACT

Introduction. The use of nanomaterials and nanotechnology represents one of the most important areas in global scientific and technological development. Nanotechnology involves the controlled regulation of the properties of objects at the molecular and supramolecular level, which determine most of the fundamental parameters and properties of physical objects, based on the targeted manipulation of their atoms and molecules. In hydraulic engineering, this involves the use of nanomaterials and technologies that improve the properties of building materials and structures, increasing their durability and resistance to external influences. **Methods and materials.** The Novosibirsk Reservoir is a unique multi-purpose water facility. For more than 60 years, it has been intensively used for national economic purposes – it is a source of water supply, the main recreation area for residents of Novosibirsk, the Novosibirsk Region, and the Altai Territory, and is used for navigation and fisheries. There are 41 settlements located within a two-kilometer zone of the reservoir's coastal strip, including the cities of Kamen-na-Obi, Berdsk, Iskitim, and Ordynskoe. The forested coastal area is home to health resorts, cottage and dacha settlements, and gardening communities, as well as a place for short-term recreation for the population. In this regard, the recreational load on the coastal zone of the reservoir is very high, partly due to the steepness of the banks. Various methods are used to calculate the design of shore protection hydraulic structures on water bodies, which take into account, first of all, the natural conditions and characteristics of the water body's shoreline. The results of the calculations are verified and refined on the basis of field studies and, if necessary, laboratory tests and experiments. **Results.** The paper presents calculations for determining the design parameters of the structure, such as: wind surge height, wave run-up height, top elevation of the structure, scour in front of the stone bank, design composition of the stone bank, and parameters of the stone bank. **Discussion.** Currently, there are many varieties of nanoscale additives and nanomodified materials. The possibilities for implementing modification mechanisms are determined by the type, characteristics, and dosage of nanoscale particles. As a suggestion, the authors propose to pay attention to the use of geogrids with different cell sizes and nanomodified concretes. However, it should be noted that at present, even with a low required content of nanomodifying additives (2–3% of the total mass of concrete), the addition of such additives will significantly increase the cost of the material. A comparison of technical and economic indicators in this case will clearly indicate this disadvantage and, as a result, the impossibility of using this option for economic reasons. **Conclusion.** One of the most important criteria for

assessing the prospects for the introduction of nanotechnological innovations in the construction industry is their final cost. Nanomodifiers for concrete and building mortars at a price of \$100 per gram, even though their strength properties increase by 30%, are unlikely to be in demand. Most of the experts agree that nanostructuring should be applied to widely used materials, including concrete, metals, and fiber-based composites. These breakthrough technologies can be applied in many areas, including hydraulic engineering, strengthening concrete foundations of gas transmission systems, creating flexible plastic geogrids, selecting and creating new high-quality fillers for them, etc. Also, thanks to new nanomaterials, it is possible to produce metal that will last an order of magnitude longer than modern samples. There are sufficient scientific developments in this area. Now it is necessary to find practical applications for them. However, this vector of development entails the need for production re-equipment, staff training, and so on.

KEYWORDS: nanotechnology, nanomaterials, hydraulic structure, emergency situation, reservoir

ACKNOWLEDGEMENTS: The research was carried out with the support of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering" and has a registration number in the EGISU NIOKTR: 125070808055-3

FOR CITATION:

Pilipenko T.V., Kozlov D.V., Davydov K.A., Efremenko D.A., Kupriyanov D.E. Challenges in applying nanotechnology to the construction of coastal protection structures and bank reinforcement measures for reservoirs: case study of the Novosibirsk reservoir. *Nanotechnologies in construction*. 2026; 18(1):68–81. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-1-68-81>. – EDN: VKLCPI.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается массовый переход к широкому применению промышленных нанотехнологий, в том числе и в гидротехническом строительстве. Стоит отметить, что использование наноматериалов и применение нанотехнологий является одним из важнейших направлений эффективного мирового научного и технологического развития. В Российской Федерации также ведутся научные разработки и внедрение результатов данных разработок, согласно приоритетным направлениям научно-технологического развития Российской Федерации [1]. Наличие наноструктур и наночастиц, обладающих принципиально особыми свойствами, обуславливает необходимость разработки соответствующих промышленных технологий в различных сферах человеческой деятельности [2]. Сам термин «нанотехнология» подразумевает создание и использование различных материалов, устройств и систем, структура которых регулируется в нанометровом масштабе, т.е. в диапазоне размеров атомов, молекул и надмолекулярных образований [3–5]. В соответствии с этим, нанотехнологии предполагают контролируемое регулирование свойств объектов на молекулярном и надмолекулярном уровне, определяющих большинство фундаментальных параметров и свойства физических объектов, на основе целенаправленного манипулирования их атомами и молекулами [6]. Нанотехнологии в гидротехническом строительстве— это использование наноматериалов и технологий, которые улучшают свойства строительных материалов и конструкций, повышают их долговечность и устойчивость к внешним воздействиям. Приставка «нано» указывает на объекты,

структуры или процессы, действующие на наномасштабе (на масштабе от 1 до 100 нанометров). Довольно широкое применение в гидротехническом строительстве нашли новые строительные материалы, так называемые наноматериалы. Ведутся активные разработки новых современных строительных материалов с заменой в их составе структурных составляющих на новые наноматериалы. Важно отметить, что в настоящее время уже можно выделить следующие наноматериалы, применяемые в гидротехническом строительстве:

1. Наноструктурированные полимерные и керамические композиты. Данные материалы обеспечивают высокую водо- и паронепроницаемость.
2. Наночастицы в гидроизоляционных покрытиях блокируют проникновение влаги и водяного пара.
3. Нанокompозитные мембраны создают плотный защитный слой при меньшей толщине.
4. Наноразмерные добавки в бетонную смесь улучшают плотность и микроструктуру цементного камня, заполняют микропоры и повышают компактность.
5. Наноматериалы для гидрофобизации обеспечивают водоотталкивающий эффект, блокируют поры и капилляры в бетоне.

Все эти новейшие современные разработки доказали свою эффективность в научных разработках, основанных на широких исследованиях, в том числе лабораторных и производственных, и вполне оправдывают название передовых нанотехнологий, однако стоит отметить противоречие: применение данных наноматериалов зачастую невозможно при строительстве, реконструкции или ремонте гидротехнических сооружений, в том числе данные работы довольно сложно, а зачастую практически невозможно

воплотить в жизнь и при реализации мероприятий, направленных на берегоукрепление водохранилищ.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Новосибирское водохранилище является уникальным водным объектом комплексного назначения. Уже более 60 лет оно интенсивно используется в народнохозяйственных целях — является источником водоснабжения, основной зоной рекреации жителей г. Новосибирска, Новосибирской области и Алтайского края, эксплуатируется для судоходства и рыбного хозяйства.

Чаша водохранилища находится на территории Новосибирской области и Алтайского края. Площадь водного зеркала 1070 км², полный объем 8,8 км³. Наибольшая ширина водохранилища 22 км, длина 185 км, максимальная глубина 29 метров, средняя 9 метров, 50% площади водохранилища имеет глубину менее 5 метров.

В двухкилометровой зоне прибрежной полосы водохранилища расположен 41 населенный пункт, в том числе города Камень-на-Оби, Бердск, Искитим, Ордынское. Прибрежная облесенная территория служит местом расположения оздоровительных учреждений, коттеджных, дачных поселков и садоводческих обществ, местом кратковременного отдыха населения.

Если учесть сезонно мигрирующее и постоянно проживающее население прилегающих к водохранилищу и Бердскому заливу населенных пунктов, рекреационная нагрузка на береговую зону водохранилища составляет в летние месяцы, и особенно в выходные дни, до 40 тыс. чел или в среднем 1 отдыхающий на 5 м береговой полосы. Поскольку почти весь правый берег водохранилища и часть левого обрывисты и не имеют удобных выходов к воде, то нагрузка в отдельных местах значительно выше средней (г. Бердск, Ордынский район) (рис. 1).

Также нельзя не отметить тот факт, что Новосибирское водохранилище, созданное в результате перекрытия реки Обь плотиной с целью строительства Новосибирской ГЭС, должно было, исходя из начального проекта, находится в системе — каскаде водохранилищ, начиная с р. Катунь (Республика Алтай), которая, сливаясь с р. Бия в районе г. Бийска Алтайского края, и образует одну из крупнейших равнинных рек в мире — реку Обь [7]. Однако данный проект, ввиду различных веских причин, так и не был реализован, хотя в последние годы вновь стал подниматься вопрос об его актуальности. В настоящее время во избежание чрезвычайных ситуаций, а также замедления заиления водохранилища необходимо обеспечить условия безопасности и устойчивости береговой полосы в условиях изменения климата

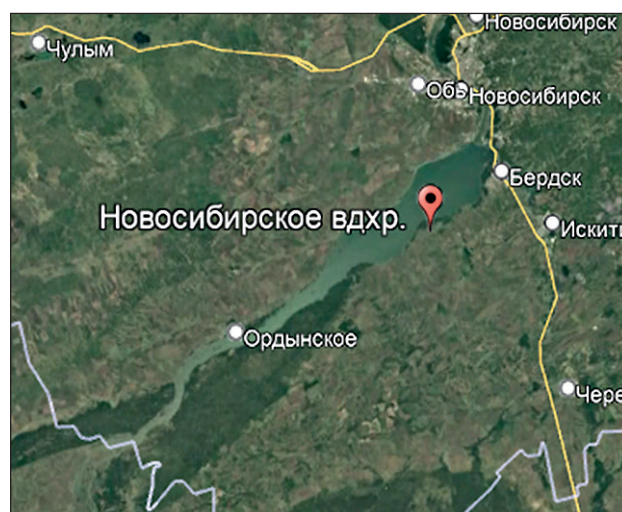


Рис. 1. Месторасположение Новосибирского водохранилища. Спутниковый снимок

и антропогенного воздействия за счет возведения комплекса гидротехнических сооружений, в частности с применением нанотехнологий.

Для расчетного обоснования берегоукрепительных гидротехнических сооружений на водоемах используются различные методы, которые учитывают, в первую очередь, природные условия и особенности участка береговой линии водного объекта. Результаты расчетов проводятся и уточняются на основе натурных исследований, а также при необходимости лабораторных испытаний и экспериментов.

Новосибирское водохранилище долинного типа осуществляет сезонное регулирование стока. По морфологическим признакам акватория водохранилища делится на три участка: верхний (расстояние от 130 км от плотины), средний (60–130 км от плотины) и нижний (расстояние до 60 км от плотины). В водохранилище впадает 19 малых рек, из них наиболее крупная р. Бердь [8].

При проектировании берегоукрепительных гидротехнических сооружений с внедрением нанотехнологий на водохранилище необходимо учитывать следующие факторы:

1. Природные условия прибрежной зоны. С целью динамики обрушения берегов Новосибирского водохранилища, начиная с 2016 г. проводится мониторинг. Всего установлено 56 реперов, из них 31 на правом и 25 на левом берегу.

2. Помимо мониторинга природных условий прибрежной зоны Новосибирского водохранилища, для принятия конструктивных и проектных решений берегоукрепительных гидротехнических сооружений, особенно с внедрением нанотехнологий, необходимо детально и тщательно изучить данные изысканий, в том числе гидрологических, гидрометеорологиче-

ских, инженерно-геологических, гидрогеологических, экологических и топографических. На основе детального анализа условий расположения того или иного водного объекта можно рассматривать вопрос о выборе материалов и методов проектирования, в том числе нанотехнологий и наноматериалов.

3. Гидрологический режим – влияние гидрологических характеристик рассматриваемого водного объекта, а именно данных на основании ежедневных уровней воды за многолетний период, амплитуды колебаний и повторяемости уровней воды, данных за наносными перемещениями и образованиями, влияющих на мертвый и полезный объем водохранилища, его уровенный режим, ветровое и ледовое воздействие.

В первые годы нормальной эксплуатации Новосибирского водохранилища абразионные процессы наиболее интенсивно протекали на правобережной озеровидной части. На левобережье размывались лишь отдельные участки берега, находящиеся под воздействием волн от господствующих ветров. Некоторое усиление абразионных процессов произошло после форсировки НПУ на 0,2 м, в основном увеличились размывы на левобережье. Однако с течением времени абразионные процессы затухали и темы приращения длины абразионных берегов сокращались. В нижней части водохранилища на расстоянии 60 км от плотины ГЭС процессы переработки берегов продолжаются и до настоящего времени. По протяженности берегов в нижней части размеры берегообрушения неодинаковы. Так, левобережье нижней части водохранилища по развитию процессов берегопереработки можно разделить на две подзоны – верхнюю и нижнюю. В верхней (50–60 км от плотины) в пределах акватории водохранилища наблюдается большое количество островов, что в значительной степени препятствует развитию ветрового волнения. Среднее отступление берега – 0,3 м/год, а в нижней подзоне 0,7 м/год. Несмотря на сформировавшиеся прибрежные отмели, процессы берегопереработки продолжаются и обусловлены как энергией волнения, так и другими факторами, в частности, воздействием склонового стока и развитием овражной деятельности. Наибольшая интенсивность процессов берегообрушения связана с повышенными уровнями воды в водохранилище, которая усугубляется штормовыми явлениями.

За период эксплуатации площадь водохранилища при НПУ = 113,5 м увеличилась с 1070 до 1082 км², полезный объем практически остался неизменным. По данным наблюдений, в ложе водохранилища ежегодно оседает около 40 тыс. м³ продуктов берегообрушения, что ведет к обмелению водоема и ухудшению экологической обстановки в целом. Факт постоянного воздействия вод на прибрежные территории тре-

бует организации систематического и постоянного наблюдения за состоянием берегов, прогнозирования, связанных с этим опасных природных явлений, разработки и внедрения эффективных методов предупреждения или смягчения их последствий, конечно, уже на основе внедрения передовых наноматериалов и нанотехнологий. По результатам мониторинга, при необходимости укрепления береговой линии и принятия решения о возведении берегоукрепительного гидротехнического сооружения, проектировщиками, в соответствии с техническим заданием, рассматриваются несколько вариантов берегоукрепления и подбираются гидротехнические сооружения исходя из технико-экономического обоснования.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследование заключается в выборе метода и конструкции берегоукрепительных гидротехнических сооружений с возможностью использования наноматериалов и применения нанотехнологий при их проектировании на участке Новосибирского водохранилища.

В результате проведенного мониторинга и анализа состояния береговой полосы Новосибирского водохранилища в данной работе отражено исследование участка, на котором наиболее остро стоит вопрос о его защиты путем возведения берегоукрепительных сооружений. Длина берегоукрепления составляет 5530 м. Класс берегоукрепительных сооружений – третий. Полная съемка рельефа дна Новосибирского водохранилища проведена в 2008–2009 гг. в соответствии с [14]. Съемка рассматриваемого участка произведена коллективом специалистов, входящих в группу авторов данной работы, самостоятельно, с использованием специализированного оттарированного инструментария, в том числе, эхолота, расходомера, гидрометрической вертушки. Далее в программе IndorCad Rivier и IndorCad Draw нами была произведена камеральная обработка полученных результатов. Гидрологические исследования выполнены в июне 2025 года. Фрагмент выполненных исследований приведен на рис. 2.

Для рассматриваемого объекта важное значение при выборе конструкции берегоукрепительного гидротехнического сооружения играет воздействие ледового поля, динамика водного объекта и ветровое воздействие волн. Справедливость этого утверждения доказывается результатами многочисленных исследований на водохранилищах (объектах с весьма динамичным и управляемым уровнем) и морях [15]. Выбор обосновывается расчетами на основании нормативной документации.

Ветер над поверхностью водоема генерирует нерегулярные ветровые волны, параметры которых за-

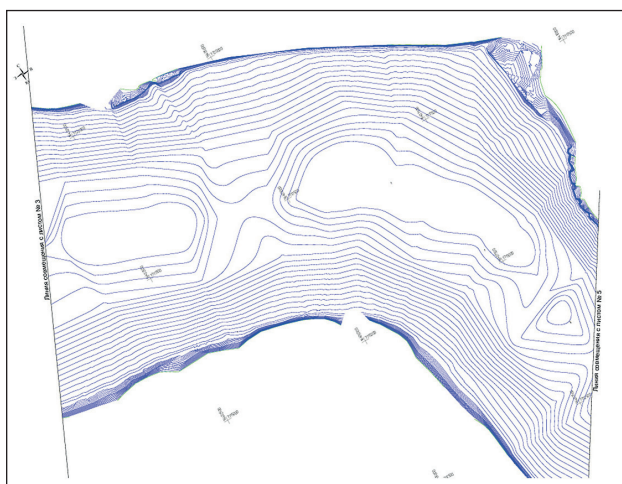


Рис. 2. Пример создания гидрографической карты

висят от разгона (расстояния от подветренного берега до расчетной точки), скорости ветра и времени его действия, а также от глубины водоема. Энергия обрушающихся волн частично рассеивается, а частично расходуется на перемещение слагающего дно материала в поперечном и вдольбереговом направлении, которое, в свою очередь, приводит к изменению рельефа береговой зоны: размыву в одних местах и аккумуляции в других. Конечной целью этих перемещений является достижение рельефом динамического равновесного состояния, при котором никаких дальнейших изменений как по профилю, так и в плане в среднем не происходит.

Профиль относительного динамического равновесия описывается функцией Дина:

$$h(y) = Ay^{2/3},$$

где y – поперечная координата, изменяющаяся от 0 до $h_{b\max}$ – глубины обрушения максимальной волны; A , $m^{1/3}$ – масштабный коэффициент профиля, зависящий в основном от крупности слагающего его материала (наносов), а также от отношения плотности материала к плотности воды (рис. 3).

При построении графиков полагалось $\rho_s = 2650 \text{ кг/м}^3$ – плотность песка.

1 – $s = 2,269$, $\rho = 1168 \text{ кг/м}^3$ – рапа;

2 – $s = 2,345$, $\rho = 1130 \text{ кг/м}^3$ – рапа;

3 – $s = 2,588$, $\rho = 1024 \text{ кг/м}^3$ – морская вода;

4 – $s = 2,650$, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ – пресная вода.

С ростом крупности наносов растет и крутизна профиля. Увеличение высоты волн ведет к перестройке профиля. Если на подводном склоне и на надводном пляже недостаточно материала для этого, происходит размыв коренного берега. При этом его склон подрезается, образуется береговой обрыв, высота которого постепенно возрастает по мере продолжения процесса разрушения. Стремление берега сохранить равновесный профиль определяет и его реакцию на рост уровня водоема. При подъеме уровня профиль стремится подняться на ту же величину, а необходимый для этого материал получается в ходе размыва берега, что ведет к отступанию профиля в глубь суши.

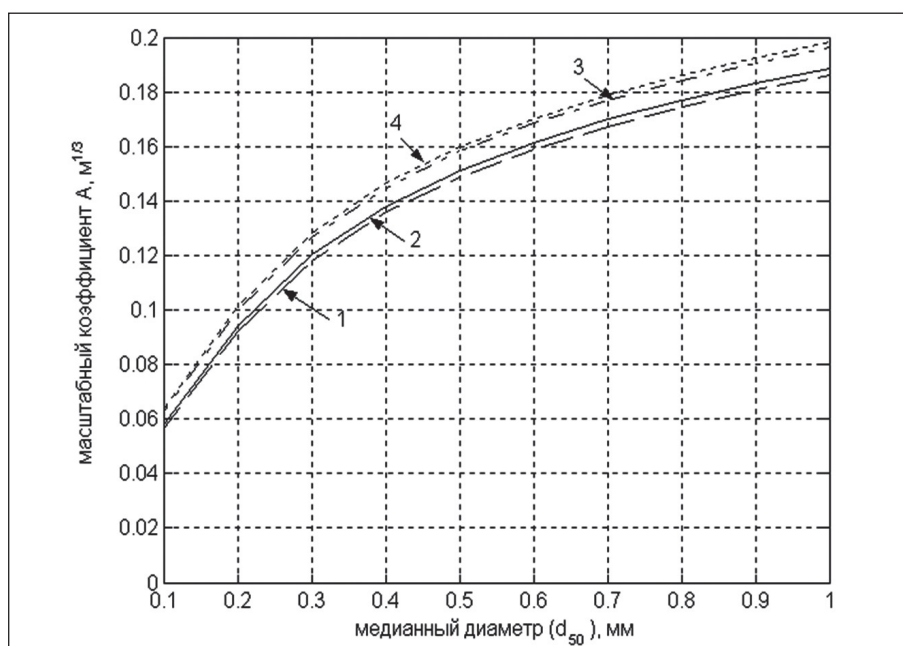


Рис. 3. Зависимость масштабного коэффициента профиля равновесия от крупности материала и отношения плотности материала к плотности воды ($S = \rho_s/\rho$)

Математически величина этого отступления (Δy) выражается правилом Бруна-Зенковича в модификации Эдельмана [16] (рис. 4):

$$\Delta y = P \times \ln \left(\frac{h_{b\max} + B}{h_{b\max} + B - Z} \right), \text{ м,}$$

где P – длина профиля, м;

Z – величина подъема уровня, м;

B – высота берега до начала подъема, м;

$h_{b\max}$ – глубина обрушения волн, м.

При циклических колебаниях уровня перед фронтом коренного берега со временем образуется надводная пляжевая берма – пологонаклонная терраса, содержащая запас материала, необходимый для перестройки профиля в соответствии с правилом Бруна-Зенковича.

После построения профиля равновесия и бермы (надводного пляжа) коренной берег полностью изолирован от волновых нагрузок. Его дальнейшее развитие происходит под влиянием ветровой эрозии, поверхностного смыва и других не гидродинамических факторов, действие которых в целом направлено на превращение берегового обрыва в пологий склон, т.е. также на достижение некоторого равновесного состояния (рис. 5). Однако в случае водохранилищ подобное равновесное состояние слабо достижимо в силу значительного колебания уровня воды в процессе эксплуатации.

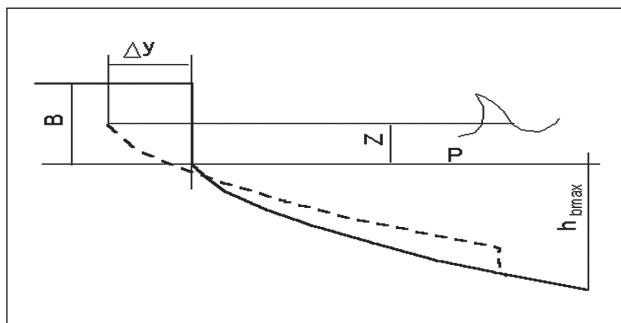


Рис. 4. Иллюстрация к правилу Бруна-Зенковича

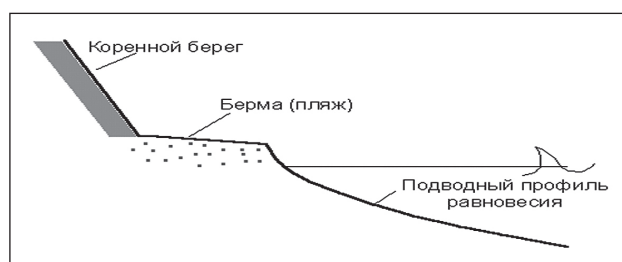


Рис. 5. Схема профиля стабильной (равновесной) береговой зоны

Несвязный материал, перемещаемый обрушающимися волнами вдоль берега, создает вдольбереговой поток наносов. Участок береговой линии находится в равновесном состоянии, если результирующий поток наносов, т.е. сумма с учетом знака потоков от всех действующих волнений остается постоянной. В случае дисбаланса вдольберегового потока происходит либо размыв берега – с него изымается необходимое для поддержания постоянства потока количество материала – либо аккумуляция наносов и выдвигание берега – поток избавляется от излишков материала (рис. 6).

Из рис. 4 хорошо видна общая тенденция плановой эволюции береговой линии, направленная на ее сглаживание, что ведет к срезанию мысов и заполнению бухт. На равновесных в целом берегах с увеличением длины разгона береговая линия разворачивается постепенно в направлении, перпендикулярном господствующему волнению. Рост угла подхода компенсирует возрастание волновой энергии, и величина вдольберегового транспорта остается постоянной. Длительность процессов достижения берегов равновесия по профилю и в плане различна. Равновесие в плане требует обычно на порядок больше времени (10 лет и более), чем выработка подводного профиля равновесия (несколько лет) [17].

Результаты исследований показывают, что наибольшую опасность с точки зрения потерь прибрежной территории представляет превышение уровня водохранилища над нормальным или, наоборот, понижение уровня ниже уровня мертвого объема. Поскольку отступление берегов в данном случае объясняется потребностью в получении дополнительного материала для перестройки профиля, наиболее действенный способ защиты состоит в упреждающем удовлетворении этой потребности, т.е. в создании перед фронтом коренного берега соответствующего резерва несвязного рыхлого материала (песка), сосредоточенного в пляжевой берме (надводном пляже).

Искусственное снижение крутизны коренного берега может служить источником материала для формирования бермы. Однако поскольку крупность материала берегового обрыва невелика, такой способ подпитки следует дополнять отсыпкой более крупного материала из внешних источников (наземных карьеров).

Отсыпка материала в приурезовой зоне с воды невозможна из-за малых глубин и отсутствия соответствующего оборудования. Поэтому необходимо будет освободить рабочее пространство в прибрежной полосе, для чего придется эвакуировать постройки и вывести из оборота земельные участки, непосредственно примыкающие к кромке коренного

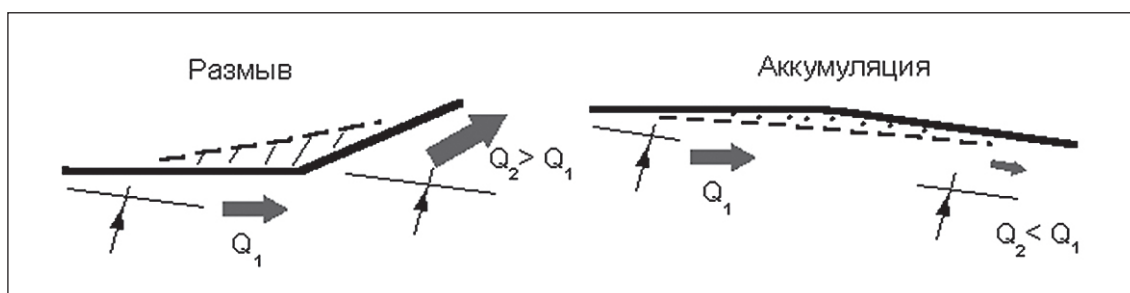


Рис. 6. Эволюция береговой линии в плане

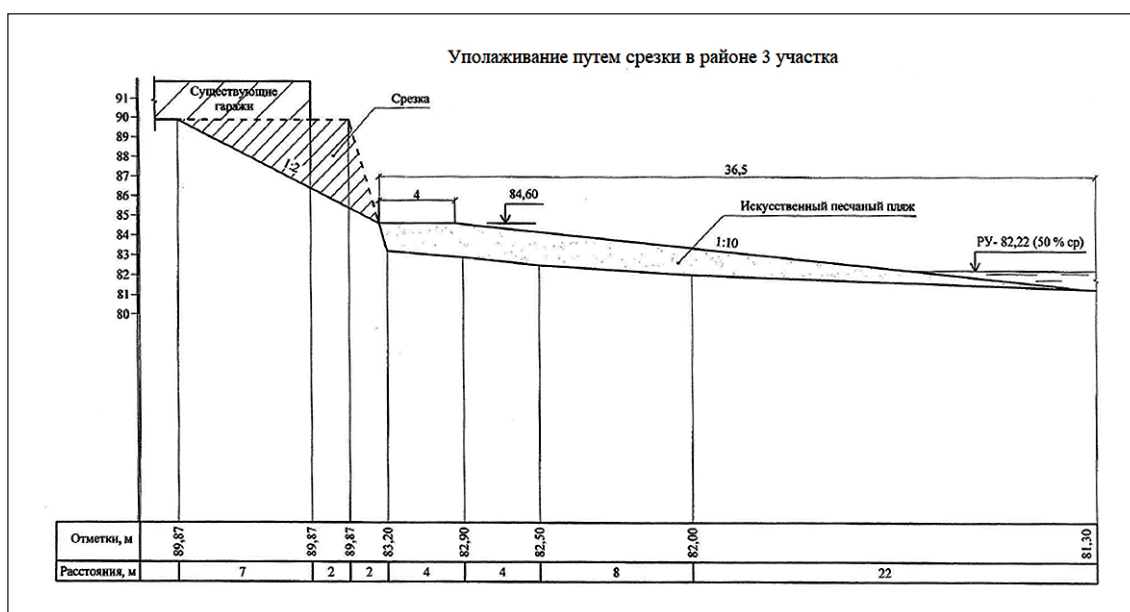


Рис. 7. Уполаживание откоса путем срезки на участке

берега. Эвакуация также потребуется и при проведении работ по противодействию склоновым процессам (рис. 7).

Принимаемые в проекте технические решения, направленные на обеспечение прочности, устойчивости и пространственной неизменяемости сооружений с условием применения производственных нанотехнологий, обусловлены следующими факторами:

- степенью ответственности сооружений;
- условиями эксплуатации;
- климатическим районом строительства;
- инженерно-геологическими условиями площадки строительства;
- опытом строительства подобных объектов, их технических решений в данном регионе;
- необходимостью сокращения сроков строительства;
- технологичностью изготовления, удобством монтажа;
- обеспечением проектного срока службы;

– соблюдением рекомендаций и требований действующих нормативных документов.

В соответствии с классификацией Постановления Правительства РФ от 05 октября 2020 года № 1607 [18] сооружения отнесены к сооружениям III класса. Согласно СП 58.13330.2019 Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003 «Гидротехнические сооружения. Основные положения» [19], расчетный срок службы основных гидротехнических сооружений должен приниматься равным 50 годам (п. 8.21).

Элементы ветровых волн на открытой территории определены с использованием формул, графиков, номограмм приложения А СП 38.13330.2018 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения» [20]. Расчет ведется в первую очередь по формулам глубоководной зоны, затем определяется режим по соотношениям:

$d > 0,5 \lambda_d$ – глубоководная зона;

$0,5 \lambda_d > d > d_{cr}$ – мелководная зона;

$d_{cr} > d > d_{cr,r}$ – прибойная зона;

$d < d_{cr,r}$ – прирезцовая зона.

Отметка гребня банкета определяется как:

$$\Delta H = \Delta h_{set} + h_{run1\%}$$

h_{run} и Δh_{set} рассчитываются согласно [20].

Все расчеты для сооружений III класса велось в соответствии с [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Определение высоты ветрового нагона

Участок первой очереди:

$$\begin{aligned} \Delta h_{set} &= k_w \cdot \frac{V^2 \cdot L}{g \cdot d} \cdot \cos \alpha = \\ &= 3,14 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{31,6^2 \cdot 6100}{9,81 \cdot 5} \cdot \cos 70^\circ = 0,134 \text{ м,} \end{aligned}$$

где $k_w = 3 \cdot (1 + 0,3 \cdot V_w) \cdot 10^{-7} = 3,14 \cdot 10^{-6}$ – коэффициент;

V – скорость ветра;

L – расстояние разгона ветра;

g – ускорение свободного падения;

d – средняя глубина по линии разгона;

Δh_{set} – высота ветрового нагона;

$\cos \alpha$ – косинус угла между продольной осью водоема и направлением ветра.

При ветре Ю направления:

$$k_w = 3 \cdot (1 + 0,3 \cdot V_w) \cdot 10^{-7} = 3,09 \cdot 10^{-6}$$

$$\begin{aligned} \Delta h_{set} &= k_w \cdot \frac{V^2 \cdot L}{g \cdot \left(d + \frac{\Delta h_{set}}{2}\right)} \cdot \cos \alpha = \\ &= 3,09 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{31,0^2 \cdot 9500}{9,81 \cdot 5} \cdot \cos 25^\circ = 0,521 \text{ м.} \end{aligned}$$

Участок второй очереди:

При ветре Ю направления:

$$k_w = 3 \cdot (1 + 0,3 \cdot V_w) \cdot 10^{-7} = 3,09 \cdot 10^{-6}$$

$$\begin{aligned} \Delta h_{set} &= k_w \cdot \frac{V^2 \cdot L}{g \cdot \left(d + \frac{\Delta h_{set}}{2}\right)} \cdot \cos \alpha = \\ &= 3,09 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{31,0^2 \cdot 7100}{9,81 \cdot 5} \cdot \cos 25^\circ = 0,390 \text{ м.} \end{aligned}$$

При ветре ЮВ направления:

$$k_w = 3 \cdot (1 + 0,3 \cdot V_w) \cdot 10^{-7} = 2,67 \cdot 10^{-6}$$

$$\begin{aligned} \Delta h_{set} &= k_w \cdot \frac{V^2 \cdot L}{g \cdot \left(d + \frac{\Delta h_{set}}{2}\right)} \cdot \cos \alpha = \\ &= 2,67 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{26,3^2 \cdot 7200}{9,81 \cdot 5} \cdot \cos 20^\circ = 0,254 \text{ м.} \end{aligned}$$

Участок третьей очереди:

При ветре Ю направления:

$$k_w = 3 \cdot (1 + 0,3 \cdot V_w) \cdot 10^{-7} = 3,09 \cdot 10^{-6}$$

$$\begin{aligned} \Delta h_{set} &= k_w \cdot \frac{V^2 \cdot L}{g \cdot \left(d + \frac{\Delta h_{set}}{2}\right)} \cdot \cos \alpha = \\ &= 3,09 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{31,0^2 \cdot 7200}{9,81 \cdot 5} \cdot \cos 25^\circ = 0,395 \text{ м.} \end{aligned}$$

При ветре ЮВ направления:

$$k_w = 3 \cdot (1 + 0,3 \cdot V_w) \cdot 10^{-7} = 2,67 \cdot 10^{-6}$$

$$\begin{aligned} \Delta h_{set} &= k_w \cdot \frac{V^2 \cdot L}{g \cdot \left(d + \frac{\Delta h_{set}}{2}\right)} \cdot \cos \alpha = \\ &= 2,67 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{26,3^2 \cdot 10050}{9,81 \cdot 5} \cdot \cos 20^\circ = 0,355 \text{ м.} \end{aligned}$$

Определение высоты наката волны

Высоту наката волн на откос определяют:

$$h_{run1\%} = k_r \cdot k_p \cdot k_{sp} \cdot k_{run} \cdot k_i \cdot k_\alpha \cdot h_{sur1\%},$$

где k_r – коэффициент шероховатости;

k_p – коэффициент проницаемости откоса;

k_{sp} – коэффициент;

k_i – коэффициент обеспеченности по накату;

k_α – коэффициент;

k_{run} – коэффициент, зависящий от глубины воды и пологости откоса;

$h_{1\%}$ – расчетная высота волны.

Участок первой очереди:

$h_{1\%} = 1,3$ м (при ветре ЮЗ)

$h_{run1\%} = 0,7 \cdot 0,5 \cdot 1,5 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot 0,76 \cdot 1,3 = 0,77$ м

$h_{1\%} = 1,3$ м (при ветре Ю)

$h_{run1\%} = 0,7 \cdot 0,5 \cdot 1,5 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot 0,96 \cdot 1,3 = 0,98$ м

Участок второй очереди:

$h_{1\%} = 1,26$ м (при ветре Ю)

$h_{run1\%} = 0,7 \cdot 0,5 \cdot 1,5 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot 0,94 \cdot 1,26 = 0,93$ м

$h_{1\%} = 1,26$ м (при ветре ЮВ)

$h_{run1\%} = 0,7 \cdot 0,5 \cdot 1,5 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot 0,96 \cdot 1,26 = 0,95$ м

Участок третьей очереди:

$$h_{1\%} = 1,23 \text{ м (при ветре Ю)}$$

$$h_{run1\%} = 0,7 \cdot 0,5 \cdot 1,5 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot 0,94 \cdot 1,23 = 0,40 \text{ м}$$

$$h_{1\%} = 1,20 \text{ м (при ветре ЮВ)}$$

$$h_{run1\%} = 0,7 \cdot 0,5 \cdot 1,5 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot 0,92 \cdot 1,20 = 0,87 \text{ м}$$

Определение верха сооружения

Расчеты сведены в таблицу 1.

Расчет размыва перед каменным банкетом

$$H_{p \max} = \frac{0,1}{\sqrt[3]{m}} \left(\frac{h^2 \cdot \lambda_{отн}}{d_{cp}^{0,5}} \right)^{2/3}$$

Участок первой очереди:

$$H_{p \max} = \frac{0,1}{\sqrt[3]{210}} \left(\frac{1,3^2 \cdot 8,12}{(0,152 \cdot 10^{-3})^{0,5}} \right)^{2/3} = 1,8 \text{ м.}$$

Участок второй очереди:

$$H_{p \max} = \frac{0,1}{\sqrt[3]{200}} \left(\frac{1,26^2 \cdot 8,12}{(0,44 \cdot 10^{-3})^{0,5}} \right)^{2/3} = 1,23 \text{ м.}$$

Участок третьей очереди:

$$H_{p \max} = \frac{0,1}{\sqrt[3]{220}} \left(\frac{1,20^2 \cdot 8,47}{(0,44 \cdot 10^{-3})^{0,5}} \right)^{2/3} = 1,15 \text{ м.}$$

Расчетный состав каменного банкета

При проектировании сооружений откосного профиля и креплений откосов из камня, бетонных или железобетонных блоков или тетраподов массу отдельного элемента m , т, соответствующую состоянию его предельного равновесия от действия ветровых волн, необходимо определять по формуле:

$$m = \frac{3,16 k_{fr} \rho_m h^3}{(\rho_m - 1) \sqrt{1 + ctg^2 \varphi}} \sqrt{\frac{\lambda}{h}},$$

где k_{fr} – коэффициент, принимаемый по [20];

ρ_m – плотность материала элемента крепления, т/м³;

ρ – плотность воды, т/м³;

$ctg \varphi = 3$ – заложение откоса;

λ – длина волны;

h – высота расчетной волны.

В качестве крепления откосов будет рассматриваться применение сортированного камня.

Участок первой очереди:

$$m = \frac{3,16 \cdot 0,025 \cdot 2,6 \cdot 1,33^3}{\left(\frac{2,6}{1} - 1\right) \sqrt{1 + 2,5^2}} \sqrt{\frac{10,16}{1,3}} = 0,15 \text{ т.}$$

Участок второй очереди:

$$m = \frac{3,16 \cdot 0,025 \cdot 2,6 \cdot 1,26^3}{\left(\frac{2,6}{1} - 1\right) \sqrt{1 + 2,5^2}} \sqrt{\frac{10,24}{1,26}} = 0,18 \text{ т.}$$

Участок третьей очереди:

$$m = \frac{3,16 \cdot 0,025 \cdot 2,6 \cdot 1,2^3}{\left(\frac{2,6}{1} - 1\right) \sqrt{1 + 2,5^2}} \sqrt{\frac{10,16}{1,20}} = 0,16 \text{ т.}$$

Масса рваного камня, слагающего откос, принята 0,18 т. Приведенный диаметр камня вычисляется по формуле:

$$D = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot m}{\pi \cdot \rho_m}} = \sqrt[3]{0,8 \cdot m}.$$

Принимаем расчетный диаметр камня $D_{расч} = 0,50$ м.

Горная масса для отсыпки банкета должна иметь следующий состав по крупности:

- расчетная крупность камня $D_k \geq 0,5$ м;
- расчетный состав горной массы:
 - камня расчетной крупности $D_k > 0,5$ м не менее 40%;
 - камня крупностью $0,125 > D_k > 0,5$ м не менее 15%;
 - карьерной мелочи не более 25%.

Для отсыпки шпор допускается использовать камень крупностью $D_k \geq 0,4–0,5$ м около 60%, остальные камни более мелкие для расклинки пустот.

Таблица 1. Сводная таблица проектных отметок

Участок	Шпунтовая стенка			Банкет		
	ΔН	Δ _{гр}	Отметка проект	ΔН	м	Отметка проект
Первой очереди	2	85,70	85,70	1,5	85,20	85,20
Второй очереди	1,82	85,52	85,60	1,32	85,02	85,10
Третьей очереди	1,72	85,42	85,50	1,23	84,93	85,00

Расчет параметров каменного банкета

Расчетное поперечное сечения каменного крепления показано на рис. 8. Площадь поперечного сечения отсыпаемой призмы равна расчетному поперечному сечению каменного пляжа на конечной стадии переформирования призмы крепления. Расчетный объем камня обеспечит неразмываемое основание перед каменным банкетом на конечной стадии переформирования.

Высота крепления:

$$h_6 = 2,5 \text{ м.}$$

Начальное заложение фронтальной части каменной призмы:

$$m = 1,5.$$

Конечное заложение выше уровня воды:

$$m_1 = 2,5.$$

Конечное заложение ниже уровня воды:

$$m_2 = 4.$$

Заложение тыльной части каменной призмы:

$$m_0 = 1, m'_0 = 1.$$

Возвышение гребня крепления над уровнем воды:

$$h_1 = 1,5 \text{ м.}$$

Конечная глубина воды на подошве фронтальной части каменной призмы:

$$h_2 = 2,5 \text{ м.}$$

Толщина крепления на урезе воды после переформирования каменной призмы:

$$t = nD_{\text{ш}} = 2,1 * 0,5 = 1,05 \text{ м;}$$

$$x^2 + m_1^2 x^2 = t^2 \rightarrow x = t \sqrt{\frac{1}{1 + m_1^2}} =$$

$$= t a_3 = 0,39 \text{ м} \left(a_3 = \sqrt{\frac{1}{1 + m_1^2}} = 0,37 \right);$$

$$y = m_1 x = 0,975 \text{ м; } z = m'_0 y = 0,975 \text{ м;}$$

$$b_1 = x + z = 0,39 + 0,975 = 1,365 \text{ м;}$$

$$b_2 = (m'_0 + m_0) y = 1,95 \text{ м;}$$

$$S_n = S_{n1} + S_{n2} = 0,5 b_2 y +$$

$$+ [b_2 + 0,5(m_0 + m_1)(h_6 - y)](h_6 - y) =$$

$$0,5 \cdot 1,95 \cdot 0,95 +$$

$$+ [1,95 + 0,5(1 + 2,5)(2,5 - 0,975)](2,5 - 0,975) =$$

$$+ 7,99 \text{ м}^2;$$

$$S_a = S_{a1} + S_{a2} + S_{a3} = 0,5 b_1 y + \alpha_1 h_1 t + 2/3 \alpha_2 h_2 t =$$

$$= 0,5 \cdot 1,365 \cdot 0,975 + 2,69 \cdot 1,5 \cdot 1,05 +$$

$$+ 2/3 \cdot 4,12 \cdot 2,5 \cdot 1,05 = 12,11 \text{ м}^2;$$

$$\left(a_1 = \sqrt{1 + m_1^2} = 2,69; a_2 = \sqrt{1 + m_2^2} = 4,12 \right).$$

Площадь сечения крепления:

$$S_6 = S_n + S_a = 7,99 + 12,11 = 20,1 \text{ м}^2.$$

Ширина гребня крепления:

$$b = \frac{S_6}{h_6} - 0,5(m_0 + m)h_6 = 4,87 \text{ м.}$$

Принимаем ширину бермы крепления 5,5 м.

Применяем камень с пределом прочности в водонасыщенном состоянии на сжатие не менее 6×10^7 Па, что соответствует марке камня М600.

ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время, исследуя научное развитие в области наноматериалов, можно констатировать тот факт, что существует множество разновидностей наноразмерных добавок и, соответственно, наномодифицированных цементов и бетонов. Эти моди-

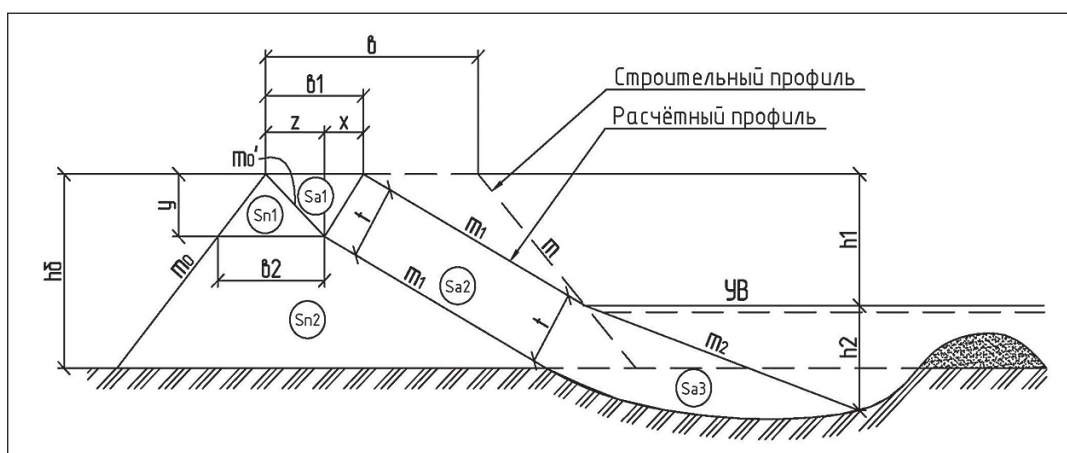


Рис. 8. Расчетная схема

факторы различаются механизмами действия, что связано с их пространственно-геометрическими параметрами, термодинамическими и кинетическими, кристаллохимическими и технологическими аспектами. Возможности реализации механизмов модифицирования определяются видом, характеристиками и дозировкой наноразмерных частиц [21]. При этом как в нормативной документации, так и в изученных проектных решениях в области берегоукрепительных гидротехнических сооружений нет упоминания о применении каких-либо нанотехнологий в строительстве. Как предложение можно лишь применить известные на сегодняшний день наноматериалы при проектировании конструктивных элементов берегоукрепительного сооружения и/или применить нанотехнологии с использованием апробированных и прошедших сертификацию материалов. Среди таковых можно отметить уже известные:

1. Наноструктурированные полимерные и керамические композиты;
2. Наночастицы в гидроизоляционных покрытиях;
3. Наноразмерные добавки в бетонную смесь;
4. Наноматериалы для гидрофобизации.

А также можно предложить применение эффективной, с нашей точки зрения, современной вариации нанотехнологии — применение георешеток с различными размерами ячеек. Решетку можно растянуть, а затем зафиксировать с помощью анкеров на уполаживаемом участке береговой линии. Затем предполагается заполнение ячеек разработанной и рекомендуемой к применению специальной песчано-гравийной смесью с применением наночастиц. Также стоит отметить возможность применения довольно перспективного направления — наномодифицированных бетонов. Однако в данном рассматриваемом случае берегоукрепления участка Новосибирского водохранилища этот вариант не рассматривался. К сожалению авторов, стоит отметить, что в настоящее время, даже при низком необходимом содержании наномодифицирующих добавок (2–3% от общей массы бетона), добавление таких добавок существенно увеличит себестоимость материала. Сравнение же технико-экономических показателей в таком случае однозначно укажет на этот недостаток и, как следствие, невозможность применения такого варианта по экономическим причинам.

ВЫВОДЫ

Одним из важнейших критериев оценки перспективности внедрения нанотехнологических инноваций в строительную отрасль служит их конечная себестоимость. Наномодификаторы для бетона и строительных растворов по цене 100 долларов

за грамм — при том, что их прочностные качества вырастают на 30%, вряд ли будут востребованы.

Большинство экспертов сходятся во мнении, что наноструктурировать следует материалы массового применения: бетон, металл, композитные материалы на основе волокон. С точки зрения массового строительства, из технологий предпочтительными оказываются химические процессы и технологии, использующие механические принципы и методы микровзрыва, в то время как вакуумные, лазерные, криогенные технологии, несмотря на всю их перспективность, являются более дорогостоящими [21]. Другой ресурс снижения себестоимости связан с эффектом реализации гигантских резонансов усиления поля на поверхности наночастиц, следствием чего оказывается крайне высокий уровень значений дисперсионных сил и — соответственно — чрезвычайно малое количество требуемого «исходного материала». Также ученые разработали новый способ борьбы с коррозией. Применять данные прорывные технологии можно во многих областях, в том числе и в гидротехническом строительстве, укрепляя бетонные основания ГТС, создавая гибкие пластичные георешетки, подбирая и создавая новые качественные заполнители для них и пр. Также, благодаря новым наноматериалам, можно выпускать металл, который будет служить на порядок дольше современных образцов. Научных разработок в данной области достаточно. Теперь необходимо найти им практическое применение. Но данный вектор развития влечет за собой и потребность в переоборудовании производства, обучения персонала и прочее.

Немаловажным фактором применения и развития нанотехнологий является фактор их воздействия на окружающую среду. Например, в результате проведения работ по строительству, реконструкции, ремонту и сносу (ликвидации) сооружений наночастицы, конечно, будут попадать в атмосферу, что, соответственно, влечет за собой воздействие на здоровье человека: как сотрудников, задействованных в данных строительных процессах, так и жителей близлежащих регионов. Также стоит отметить, что специальных регламентов по обращению с отходами — наноматериалами или содержащими наноматериалы — пока не существует.

Следует учитывать, что изначально «безопасные» и эффективные «конструкционные» наноматериалы в течение жизненного цикла могут претерпеть физические, химические или биологические превращения (сорбция, агрегация, окисление, восстановление, биотрансформация), и их свойства изменятся. Важно принимать во внимание влияние факторов окружающей среды (таких как pH, микроорганизмы, соленость воды) на активность, токсичность; изучать стабильность наноматериалов в конкретных усло-

виях, например, применение нанотехнологий в гидротехническом строительстве должно предусматривать возможность вымывания этих частиц водой и попадание в общий водообмен.

В заключение хочется отметить, что авторы работы акцентируют внимание на актуальности проблемы берегоукрепления Новосибирского водохранилища, в первую очередь, для местного населения и экосистемы в целом, демонстрируя необходимость разработки и внедрения эффективных и действенных мер, принимая во внимание особенности финанси-

рования и сложности, возникающие из-за природных изменений, возможно, с учетом применения уже на уровне как проектирования современных нанотехнологий в строительстве, так и применения наноматериалов в применяемых строительных материалах. Строительство рассмотренных в данной работе берегоукрепительных гидротехнических сооружений является мероприятием по предотвращению дальнейшего разрушения берега от опасных природных процессов: абразии берегового склона от волн в штормовые периоды.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоёмких технологий: указ Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 года №529 – Доступ из справочной системы «КонсультантПлюс». Текст электронный.
2. Воробьев А.Е. Основы механизма эффективного применения промышленных нанотехнологий при добыче аквальных газогидратов. *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2014;6(28).
3. Головин Ю.И. *Введение в нанотехнику*. Москва: Машиностроение; 2007. 496 с.
4. Гусев А. И. *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии*. 2-е изд. Москва: Физматлит; 2009. 414 с.
5. Мальцева П. П. (ред.) *Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам: сборник статей*. Москва: Техносфера; 2005. 589 с.
6. Пилипенко Т.В., Ефременко К.А., Давыдов Д.А. Выбор типа гидротехнического сооружения для укрепления берега Новосибирского водохранилища. Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства: сборник тезисов докладов VIII Всероссийского научно-практического семинара (г. Москва, 21 мая 2025 г.) / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Институт гидротехнического и энергетического строительства. — Москва: Издательство МИСИ – МГСУ, 2025. — URL: <https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/>. 61–63 с.
7. Pilipenko T., Kozlov D., et al. (2025). Selection of types of shore protection structures at reservoirs (on the example of the Novosibirsk reservoir). *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 21(3), 172-187. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2025-21-3-172-187>
8. Пилипенко Т.В., Давыдов К.А., Ефременко Д.А. Выбор типа гидротехнического сооружения для укрепления берега Новосибирского водохранилища. *Гидротехническое строительство*. 2025;8:23-27. <http://dx.doi.org/10.71917/EP.2025.08.45.34.004> – EDN: CWWZLJ
9. Pilipenko T., Enaki E. Dynamics of processing of the Novosibirsk reservoir banks December. 2021. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science* 937(4):042097. <https://doi.org/10.1088/1755-315/937/4/042097>
1. Rubin O., Kozlov D., Antonov A., Zhang J. Strengthening of Reinforced Concrete Hydraulic Structures with External Reinforcement System Made of Carbon Fiber-Based Composite Materials with Development of Calculation Recommendations. *Buildings*. 2024;14:37-39. <https://doi.org/10.3390/buildings14123739>
10. Rubin O.D., Kozlov D.V., Antonov A.S., Almasri Amer, Zhang Junhao. Design and experimental studies of strengthening of backwater type hydraulic structures with composite materials. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineerin*. 2024;20:4. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2024-20-4-119-140>
11. Pilipenko T., Mihailova T., Suslikov E., Ahmatova N. Assessment of the impact of the development of the floodplain of the Ob River on the safety of navigation. *Springer Nature Link*. 2022;2 (LNNS, vol. 403). https://doi.org/10.1007/978-3-030-96383-5_103
12. Pilipenko T., Kalachnikov A., Botvinkov I. Influence of the slot configuration on its stability (on the example of the Ob river); Springer Nature Link 2022, No. 2. In book: *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia*. 2021;1:1133-1140. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_124
13. ГОСТ Р 58743-2019. Гидрографические работы. Общие требования: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2020-07-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — Изд. Официальное. — Москва: Стандартинформ, 2020.
14. Хабидов А.Ш., Кусковский В.С., Жиндарев Л.А. Хейнс Д.М., О. В. Кашменская (ред.). *Берега морей и внутренних водоемов: Актуал. проблемы геологии, геоморфологии и динамики*. Рос. акад. наук. Сиб. отд.-ние. Ин-т вод. и экол. проблем. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Науч.-изд. центр ОИГГМ; 1999. 269 с.

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

15. Зенкович В.П. *Основы учения о развитии морских берегов*. Акад. наук СССР. Океаногр. комис. Москва: Изд-во Акад. наук СССР; 1962. 710 с.
16. Сокольников Ю.Н., Цайтц Е.С., Хомицкий В.В. *Защита берегов водохранилищ банкетами из горной массы*. Киев: Наук. думка, 1974. 102 с.
17. Постановление Правительства РФ от 05 октября 2020 года №1607 «Об утверждении критериев классификации гидротехнических сооружений» / Собрание законодательства Российской Федерации, № 41, 12.10.2020.
18. СП 58.13330.2019 «Гидротехнические сооружения. Основные положения» Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003(с Изменением № 1): дата введения 16 декабря 2019 / Минстрой России— Официальное издание. — Москва. Стандартинформ, 2020.
19. СП 38.13330.2018 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). СНиП 2.06.04-82* (с Изменением № 1): дата введения 16 августа 2018 г. / Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2019.
20. Стрельченко О.В., Саньков П.Н. Использование нанотехнологий в строительстве. Их виды, перспективы и безопасность применения. *Материалы VIII Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум»* URL: <https://scienceforum.ru/2016/article/2016024354>><https://scienceforum.ru/2016/article/2016024354> (дата обращения: 19.10.2025).
21. Strelchenko O.V., Sankov P.N. Use of nanotechnologies in construction. Their types, prospects, and safety of application. *Proceedings of the VIII International Student Scientific Conference Student Scientific Forum*; 2016.
22. Lee J., Mahendra S., Alvarez P.J. Nanomaterials in the construction industry: a review of their applications and environmental health and safety considerations. *ACS Nano*. 2010; 27;4(7):3580-90. <https://doi.org/10.1021/nn100866w> PMID: 20695513.
23. Малылиг А.А. Химия поверхности и нанотехнология: взаимосвязь и перспективы. *Соровский образовательный журнал*. 2004;8(2):32–37.
24. Гарькин И.Н., Фолимагина О.В., Фокин Г.А. Нанотехнологии в производстве строительных материалов. *Региональная архитектура и строительство*. 2009;(1):111-112. — EDN: KLTYPZ.
25. Фадеева, Г.Д., Паршина К.С., Маркелова И.В. Рентабельное использование нанотехнологий в строительных материалах. *Молодой ученый*. 2013;12(59):187-188. — EDN: RPCRUX.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пилипенко Татьяна Викторовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры ГТСБЭ, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск, Российская Федерация, taniavp_2005@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5080-6588>

Козлов Дмитрий Вячеславович – доктор технических наук, профессор, руководитель Передовой инженерно-строительной школы, заведующий кафедрой ГиГС, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, член-корреспондент РААСН по Отделению строительных наук, Москва, Российская Федерация, kanz@mgsu.ru, <https://orcid.org/0009-0003-9728-1397>

Давыдов Кирилл Андреевич – аспирант кафедры ГТСБЭ, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск, Российская Федерация, kirill.davydov2000@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-0035-9442>

Ефременко Дмитрий Анатольевич – соискатель кафедры ГТСБЭ, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск, Российская Федерация, efremenk0dmit@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7369-7272>

Куприянов Даниил Евгеньевич – аспирант кафедры ГТСБЭ, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск, Российская Федерация, daniikupriyanov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-1454-1420>

ВКЛАД АВТОРОВ

Пилипенко Т.В. – научное руководство; разработка концепции и методологии исследования; анализ результатов исследования.

Козлов Д.В. – научное руководство; разработка концепции и методологии исследования.

Давыдов К.А. – подготовка и написание статьи; литературный обзор.

Ефременко Д.А. – подготовка и написание статьи; теоретический анализ.

Куприянов Д.Е. – подготовка и написание статьи; теоретический анализ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 20.11.2025; одобрена после рецензирования 06.02.2026; принята к публикации 12.02.2026.