

ОСНОВЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩ БЕЛАРУСИ

Введение. В Беларуси водохранилища широко используются в целях мелиорации, рекреации, регулирования поверхностного и речного стока, рыбного хозяйства, технического и питьевого водоснабжения, а также для энергетических нужд. На данный момент эксплуатируется около 150 водохранилищ различного типа с общей площадью около 2500 км² и полным объемом 10 км³. Протяженность береговой линии водохранилищ республики составляет более 1500 км, из них около 320 км (более 20%) подвержено активным процессам переработки – абразии (рис. 1).



Рисунок 1 – Переработка берегов Вилейского и Лепельского водохранилищ

Процессы, которые происходят в береговой зоне искусственных водных объектов, оказывают большое отрицательное воздействие на функционирование многих отраслей народного хозяйства, в результате чего происходит отторжение земель из сельскохозяйственного использования, возникает необходимость в переносе жилых и производственных зданий и пр. Важнейшим вопросом при решении вышеуказанной проблемы является прогнозирование развития береговых абразивно-эрозионных процессов на водных объектах и незащищенных откосах подпорных сооружений с оценкой масштабов их проявления и уменьшению ущербов от разрушения объектов экономики.

1. Анализ развития процесса абразии в стране и основы теории формирования берегов водохранилищ страны. Значи-

тельный вклад в изучение формирования берегов крупных водохранилищ внесли А.А. Авакян, М.М. Адад, Ф.Э. Арз, Е.И., С.Г. Бейром, Н.Г. Варашвили, С.Л. Вендров, Е.М. Воскобойников, О.Г. Григорьева, Е.К. Гречищев, А.Г. Емельянов, Г.С. Золотарев, Л.Б. Иконников, Л.М. Каскевич, Е.Г. Качугин, К.Е. Крыжановская, В.Л. Максимчук, И.А. Печеркин, А.Б. Пышкин, Г.М. Пуляевский, А. Л. Рагозин, Л.Б. Розовский, Е.М. Савкин, Ю.Н. Сокольников, Д. Е. Финаров, А. Ш. Хабидов, В.М. Широков, Е.С. Цайтц и многие другие.

В области теории формирования берегов водохранилищ были сделаны некоторые наработки Д.Е. Финаровым, Л.Б. Иконниковым, И.А. Печеркиным, В.М. Широковым, А.Ш. Хабидовым, А.Б. Пышкиным и В.Л. Максимчуком. Однако работы представленных авторов касались лишь крупных водохранилищ, расположенных в различных регионах бывшего СССР, и были выполнены практически все до периода распада Советского Союза. Следует отметить, что все теоретические построения указанных авторов базировались на материалах, полученных по водным объектам, расположенным в различных регионах бывшего СССР, и не носили обобщающего характера. Так, работы Д.Е. Финарова касались лишь водохранилищ Северо-запада СССР, В.М. Широкова и А.Ш. Хабидова – водохранилищ Сибири, А.Б. Пышкина и В.Л. Максимчука – водохранилищ Днепровского каскада. В работах Л.Б. Иконникова представлены результаты изучения береговых процессов на водохранилищах Волжского каскада. А.Н. Печеркин рассматривал процесс берегоформирования с геологической точки зрения применительно к водохранилищам Камского каскада водохранилищ. При всех подходах, используемых авторами при создании теоретической базы развития береговых процессов на крупных водохранилищах, учитывались аналогичные процессы, происходящие в морских условиях, имеющих определенную теоретическую основу, однако единой теории берегоформирования для искусственных водных объектов создано так и не было. Слишком уж различные рассматривались объекты как по морфометрии и гидрологическим условиям (уровненному и ветро-волновому режимам в совокупности с колебанием уровней), так и по механизму формирования профиля равновесного берега, подверженного переработке.

Что касается малых водохранилищ, которые доминируют в общем количественном балансе водных объектов, как в нашей стране, так и в целом в мире, вопросы теории формирования береговой линии вообще практически не рассматривались, хотя с прикладной точки зрения они являются важными и актуальными.

Это привело к необходимости разработки новых теоретически более обоснованных методов расчета деформаций и прогнозов переработки берегов водохранилищ Европейского региона, к которому относится Беларусь, на основе анализа натурального и экспериментального материала, изучения физики данного природно-техногенного процесса и механизмов развития этого сложного явления.

Разработка теории берегоформирования применительно к водохранилищам республики, имеющим характерные особенности, базировалась на имеющихся очень ограниченных предложениях в этой области, учитывающих специфику водных объектов Беларуси, их гидрологического режима и морфологию береговой зоны [1, 2]. Системный подход, используемый при рассмотрении и учете факторов, активно влияющих на процесс формирования берегов, а также учет масштабов, динамики и интенсивности процесса с учетом его стохастической и дискретной природы позволили сформулировать основные положения *гидролого-морфологической* теории берегоформирования водохранилищ Беларуси. Основные положения теории берегоформирования малых водохранилищ, сформулированные нами, представлены следующими ключевыми позициями:

- процесс переработки берегов и незакрепленных верховых грунтовых откосов дамб и плотин с выработкой профиля динамического равновесия протекает под воздействием большого количе-

ства берегообразующих «активных» факторов и берегоформировочных условий;

- береговой процесс обладает инерционностью и изменчивостью. Инерционность заключается в сохранении основных черт переработки в период продолжительного отрезка времени, изменчивость – в потере свойств инерционности из-за наличия естественных причин (изменения значимости отдельных факторов в процессе формирования);
- в связи с тем, что природа процесса стохастична, характеристики деформаций можно определять путем использования вероятностных методов;
- береговой процесс на малых водохранилищах в отличие от крупных и морей ограничен во времени и имеет конечный срок;
- процесс переработки берегов, являясь динамически активным, в условиях малых водохранилищ страны, каковыми являются большинство водохранилищ, протекает стадийно;
- профиль переработки абразионных берегов водохранилищ Беларуси имеет ряд особенностей, как в соотношении элементов, так и в форме профиля равновесия, делающих их отличными от крупных водных объектов;
- в зависимости от грунтов, образующих размываемый и деформируемый склон в результате переработки, профиль равновесия представляет собой профиль динамического равновесия;
- в условиях берегового склона, подверженного переработке, сложенного грунтом с повышенной неоднородностью (моренные грунты с включением крупнофракционного материала) – наблюдается самоукрепление абразионного берега путем создания естественной «самоотмостки», образуемой в результате волновой сортировки частиц грунта;
- учет естественных свойств и особенностей процесса переработки в совокупности с возможностью самоукрепления в определенных условиях – позволяет, используя методические подходы и минимальные инженерно-технические мероприятия активно влиять на динамику берегового склона в направлении затухания либо активизации процесса формирования профиля равновесия, что значительно уменьшит издержки на берегозащиту и берегоукрепление;
- возможность активного влияния на естественный процесс формирования берегов водных объектов путем генерирования искусственной «самоотмостки», на основе учета физико-механических свойств грунтов Беларуси является альтернативным решением по берегозащите, в десятки раз более дешевым, чем традиционные способы берегозащиты.

Существенный вклад в рассмотрение вопросов, связанных с определением закономерностей формирования устойчивой береговой линии в плане, сделан рядом современных исследователей: Б.А. Пышкиным, В.М. Широковым, Ю.А. Сокольниковым, Д.М. Беловым, А.Л. Рогозиным. В работе А.Л. Рогозина [3] отмечается несколько очень важных моментов, актуальных для водохранилищ Беларуси.

Первый принципиально важный момент – на начальной, первой стадии переработки берегов и большинства других экзогенных процессов (оползни, карст, речная и овражная эрозия) деструктивные процессы возникают только в пределах отдельных участков, а затем достаточно быстро охватывают все новые пространства, развиваясь и формируя тем самым крупные и, как правило, линейные зоны разрушения.

Второй момент не менее важный – образование устойчивой к внешним воздействиям береговой отмели, по которой возможно вдольбереговое перемещение наносов, означающее переход ко второй стадии развития берегоформирования в режиме замедляющихся или относительно мало изменяющихся во времени разрушений. На этой стадии все активнее начинает действовать механизм саморегулирования процесса переработки и дальнейшей самоорганизации береговых систем, приводящей к постепенному увеличению протяженности как абразионных, так и аккумулятивных берегов и формированию устойчивых зон разрушений, транзита и аккумуляции наносов.

Третий момент состоит в том, что последняя стадия переработки берегов и формирования береговых линий водоемов характеризуются завершением процесса образования береговых систем, которые теоретически должны быть устойчивы. Аналогичная ситуация имеет место на водохранилищах Беларуси: Лепельском – при

трансформации уровня режима, вызванного изменением условий эксплуатации и Свислочском каскаде водохранилищ; Заславльском, Осиповичском, Кричицы, Дрозды – при ведении в эксплуатацию Вилейско-Минской водной системы.

В рамках перечисленных особенностей автором были проанализированы имеющиеся материалы наблюдений за переработкой по Беларуси с привлечением материалов исследований, полученных на водохранилищах, расположенных в других сопредельных регионах Европы: Польше, Чехии, Украине, России.

Было установлено – в условиях Беларуси в начальный период эксплуатации водохранилищ (руслового и озерного типов), как правило, береговая линия характеризуется высокой извилистостью, которая определяется исходным рельефом речных долин. Коэффициент извилистости береговой линии, например Вилейского водохранилища, значительно различается по его длине. По правому берегу его значения находится в пределах 1,16–2,05 при среднем взвешенном значении 1,39, по левому – соответственно 1,05–2,60 и 1,63.

Следует отметить, что береговая линия водохранилищ на определенной стадии [4, 5] стремится к равновесному состоянию. Количественным критерием при оценке равновесной береговой линии служит ее общая длина, являющаяся функцией от площади водоемов. Для оценки степени приближения длины береговой линии водохранилищ к равновесной нами был предложен показатель – коэффициент развития или устойчивости береговой линии (K_p), который определяется отношением длины береговой линии водохранилищ, подверженной переработке ($L_{абр}$), к длине аккумулятивных берегов ($L_{акк}$) [1, 2]:

$$K_p = L_{абр} / L_{акк} \quad (1)$$

Как показали натурные наблюдения, проведенные автором на ряде водохранилищ страны, аккумулятивные образования формируются исключительно из песчаного материала – песков различной крупности. Глинистые, тонкодисперсные частицы ($d_{50} = 0,01 \dots 0,025$ мм) выносятся волновым потоком и течениями в открытую часть водоема. Песчаный материал, перемещаясь вдоль уреза, заполняет объемы входящих углов, бухт, мелких заливов, устьев мелиоративных каналов. В случае огибания потоком наносов выступа берега происходит образование с подветренной стороны у заливов бухт, балок и оврагов аккумулятивных (веерных) кос. Такие образования распространены наиболее часто.

Оценивая устойчивость береговой линии в плане, нами принято, что исходная береговая линия представляет собой кривую с чередованием мысов и заливов [4]. Одним из условий плановой устойчивости береговой линии водохранилища, соответствующим стадии равновесия, является выражение вида [1]:

$$L_{абр} = L_{акк} \quad (2)$$

По величине коэффициента устойчивости K_p можно судить о состоянии береговой линии. При $K_p \rightarrow 1$ береговая линия стремится к равновесной. В случае $K_p > 1$ в первые 10–15 лет существования водохранилища преобладает абразионное выравнивание склонов. В связи с тем, что коэффициент K_p пропорционально связан с величиной $K_{из}$, общее и обязательное условие равновесной береговой линии может быть записано следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} L_{абр} / L_{акк} = K_p \rightarrow 1 \\ L_1 / L_2 = K_{из} \rightarrow 1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $K_{из}$ – коэффициент извилистости береговой линии; равный отношению соответственно L_1 и L_2 – протяженности береговой линии (или их отрезков) по кратчайшей прямой и реально существующей. При увеличении K_{pi} от начального значения K_{pi} до K_{pi+1} , наблюдается изменение $K_{из}$, т. е. происходит переход от криволинейной, параболической кривой, к прямолинейной за счет уменьшения длины прогиба дуги ΔL_i и соответствующей линейной переработке мыса ΔS_i . Соответственно с возрастанием t величина ΔS_i , а равнозначно и ΔL_i , стремятся к 0. Между размывом мысов и занесением заливов материалом переработки берегов, характеризующихся величинами $L_{акк}$ и $L_{абр}$, соблюдается соотношение (3), так как с возрастанием $L_{абр}$ происходит увеличение $L_{акк}$. В идеальных услови-

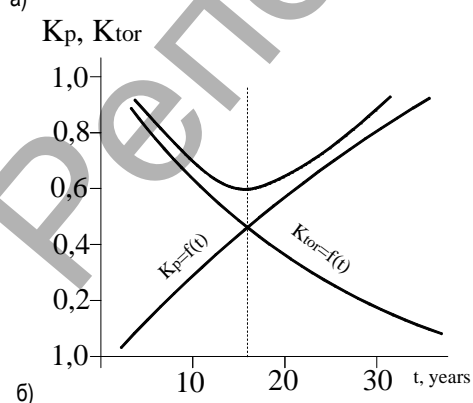
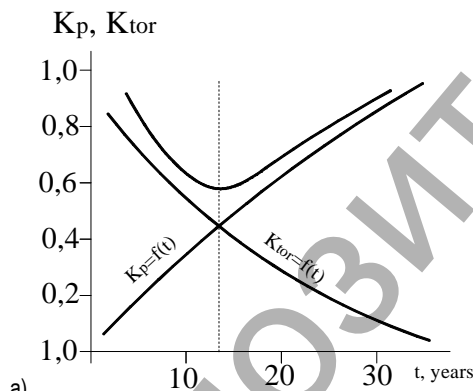
ях их рост должен наблюдаться синхронно. Однако в природных естественных условиях, как показали исследования, в этом процессе наблюдается значительная асинхронность, потому что на ранней стадии формирования равновесного профиля (первые 3–5 лет) часть материала переработки берегового склона ΔQ , поступающего в береговую зону водохранилища, идет на образование подводной части береговой отмели, а некоторая их часть, как отмечалось выше, выносится в акваторию водоема и способствует формированию вторичных донных отложений. На более поздних стадиях (более 10–15 лет существования водоема) при сформировавшейся береговой отмели происходит развитие вдольбереговых потоков наносов. Тогда уравнение береговой линии на стадии равновесия, соответствующей конечному периоду (t_k), представляется в виде [6]:

$$\int_{t_{и=0}}^{t_{кп}} (\sum Q_{акк} + dQ_{акк}) dt = \int_{t_{и=0}}^{t_{кп}} (\sum Q_{абр} + dQ_{абр}) dt \pm \Delta Q_{абр} \quad (4)$$

уравнение (4) соблюдается при соблюдении следующих граничных условий:

$$\left. \begin{aligned} k_{рк} &> k_{рн} \\ k_{узк} &< k_{узн} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $k_{рн}$, $k_{узн}$, $k_{рк}$, $k_{узк}$ – значения коэффициентов на начальный $t_н$ и конечный $t_к$ периоды соответственно. Изменение коэффициентов $k_{уз} = f(t)$ и $k_p = f(t)$ во времени показано на рисунке 2. Участок графика $t_0 - t_1 = \Delta t_н$ – характеризует стадию абразионного выравнивания, а $t_1 - t_2 = \Delta t_п$ – стадию аккумулятивного формирования. Асимметрия графика говорит о доминировании первого или второго процесса во времени и зависит от режима поступления материала переработки в чашу водохранилища и питания потока наносов $\Delta Q_{абр}$ с учетом формы берегового склона. Для берега приглубой формы ($H/\lambda > 2$, где H – глубина у берега, λ – длина волны 1% обеспеченности) характерна абразионная асимметрия (рис. 2а), для отмелей – аккумулятивная (рис. 2б). В некоторых случаях наблюдается нормальная асимметрия.



а) аккумулятивная асимметрия; б) абразионная асимметрия
Рисунок 2 – Изменение во времени коэффициентов $k_{уз} = f(Q)$ и $k_p = f(L)$

Анализируя динамику развития берегового процесса и, в частности, динамику процесса абразии берегов водохранилищ Беларуси, было установлено, что период формирования береговых склонов, подверженных переработке, можно разбить на ряд стадий. Автором [2, 4, 5] выделяется 3 *стадии развития абразионного берега*, ход которых описывается графиком (рис. 3). Выделены следующие стадии, которые характеризуются различной динамикой во времени: 1-я стадия начальной переработки, 2-я стадия интенсивной переработки и 3-я стадия, стадия затухания или стабилизации и выработки профиля динамического равновесия [4].

Процесс аккумулятивного выравнивания берегов, равно как и процесс абразии, также протекает стадийно, при этом выделяются так же три основные стадии (рис. 3): на первой стадии в береговой зоне наряду с поперечным движением наносов проявляется образование вдольбереговых потоков наносов; на второй стадии наблюдается интенсивный рост и развитие незамкнутых аккумулятивных форм: кос, перейм; на третьей стадии отмечается формирование замкнутых аккумулятивных форм – типа пересыпей, заполнения входящих углов и других аналогичных форм, что ведет к образованию равновесной береговой линии.

Длительность стадий абразионно-аккумулятивного выравнивания береговой линии в общем случае охватывает период (в случае водоемов со значительной сработкой уровней) в 25–30 лет. Это водохранилища Вилейское, Заславское, Лепельское, Солигорское, Гродненской ГЭС. При малых сработках уровня воды в водохранилищах этот период длится 15–20 лет (водохранилища Чигиринское, Осиповичское, Дрозды, Петровичское).

На начальном этапе эксплуатации малых водохранилищ Беларуси отмечается в первое время тенденция роста протяженности абразионно-обвальных берегов и некоторое сокращение береговой линии. Оно происходит как за счет появления абразии там, где раньше был нейтральный берег, а также за счет увеличения его коэффициента извилистости.

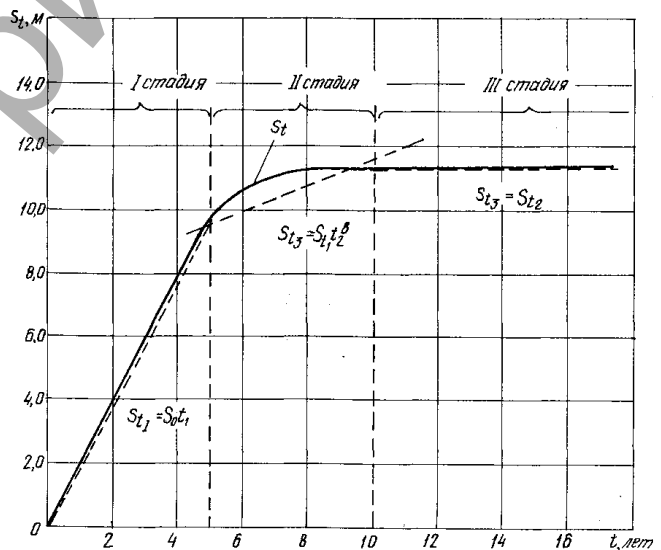


Рисунок 3 – Схема стадийности развития переработки берега в условиях водохранилищ Беларуси

Развитие берегов водохранилищ страны происходит с некоторым опережением процесса формирования их отмелей.

О стадийности процесса свидетельствует факт перехода одного типа берега в другой, в частности, абразионного в аккумулятивный, а затем в нейтральный с некоторой асинхронностью, зависящей от сочетания местных условий. Примером, подтверждающим взаимосвязь между абразионным и аккумулятивным типами берегов в целом по всему побережью водохранилища, является блок-схема развития берегов, учитывающая стадийность и асинхронность развития процессов во времени представлена на рисунке 4. Эта схема, составлена автором на основе материалов природных исследований, наглядно показывает особенности динамики береговой линии водохранилищ Беларуси в плане.

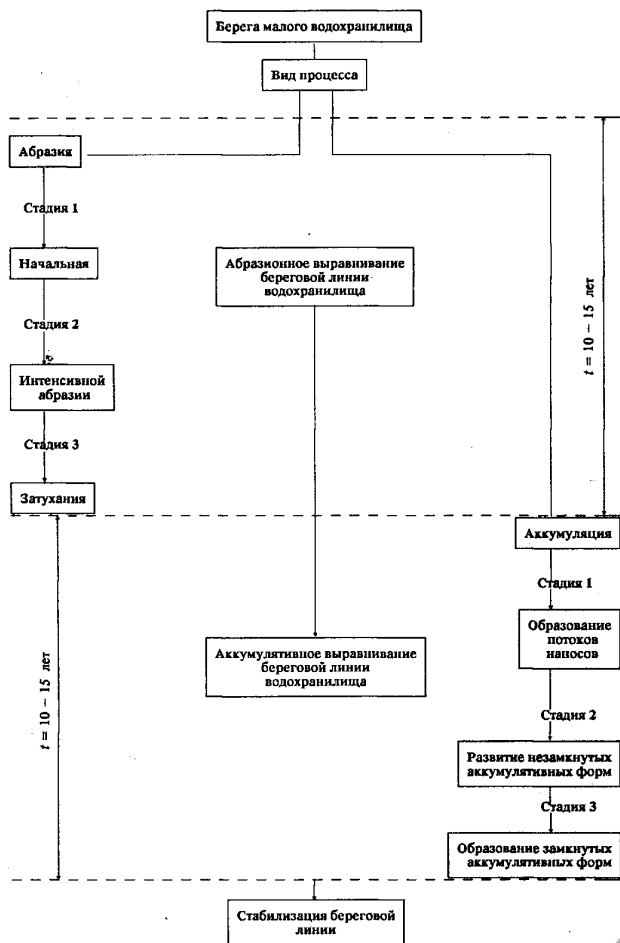


Рисунок 4 – Схема формирования динамически устойчивой береговой линии водохранилищ Беларуси

Представим i -й участок береговой линии в виде определенной совокупности мысов и заливов [11, 12]. В первые 10–15 лет существования водохранилища происходит абразионное выравнивание склонов за счет активной переработки, т. е. в период эксплуатации водоема наблюдается переход береговой линии от криволинейного очертания к прямолинейному за счет уменьшения длины прогиба (*занесения наносами*) и соответствующей линейной переработки мыса. Соответственно с возрастанием времени существования водоема с увеличением протяженности абразионных берегов $L_{абр}$ растет и протяженность аккумулятивных $L_{ак}$. В идеальных условиях это должно происходить синхронно. Однако в природе, как показали исследования [8], в этом процессе наблюдается значительная асинхронность в связи с тем, что на ранней стадии формирования равновесного профиля (первые 3–5 лет) часть материала переработки берегового склона $\Delta Q_{абр}$, поступающего в приустьевую зону водохранилища, идет на образование подводной части береговой отмели, при этом некоторая доля материала выносится в акваторию водоема и способствует формированию вторичных донных отложений. На поздних стадиях, соответствующих аккумулятивному выравниванию склона, при сформировавшейся береговой отмели происходит развитие вдольбереговых потоков наносов. Перемещаясь вдоль уреза под действием ветрового волнения и течений, материал переработки в виде наносов аккумулируется и образует в береговой зоне различные формы – косы, пересыпи, фестоны, что определяет общую тенденцию выравнивания береговой линии водохранилищ (рис. 5).



Рисунок 5 – Вдольбереговое перемещение продуктов абразии в виде аккумулятивных кос. Петровичское водохранилище (съемка 2014 г.)

3. Математическая модель формирования профиля динамического равновесия. Наряду с плановым равновесием береговой линии существует, и оно является основополагающим, профильное равновесие разрушаемого, подвергающегося переработке берегового склона, характеризуемое профилем динамического равновесия. Сущность профильного равновесия состоит в том, что размыв надводной части берега S_t или объемом размыва Q_t связаны с ростом и образованием подводной части профиля – береговой отмелью. При этом соотношение элементов профиля выражается зависимостью вида

$$Q_t / S_t = f(B_{нт} / B_{нт}), \quad (6)$$

где $B_{нт}$, $B_{нт}$ – соответственно ширина подводной и надводной частей береговой отмели. Отношение S_t к $B_{нт}$ в условиях равнинных водохранилищ страны находится в пределах 0,80–0,96, в отличие от крупных водохранилищ, где оно составляет 0,48–0,77. Наличие данного факта говорит об особенностях профиля равновесия, формируемого на водохранилищах Беларуси. В частности, профиль равновесия в условиях водных объектов Беларуси имеет малую аккумулятивную призму, что объясняется особенностями режима движения наносов в береговой зоне.

В этой связи приведенное выше соотношение косвенно определяет степень аккумуляции материала переработки берега, которая характеризуется величиной коэффициента аккумуляции – ξ , физический смысл которой определен Н.Б. Кондратьевым, Е.Г. Качугиным, Б.А. Пышкиным, В.Л. Максимчуком и другими.

Существенным в процессе формирования равновесного профиля берега следует считать связь между процессами переработки надводной части берегового склона и аккумуляции материала абразии в береговой зоне. Физическая сущность этого явления состоит в том, что в результате разрушения надводной части берегового склона происходит формирование подводной составляющей профиля равновесия; при этом отношение объема грунта в надводной части $Q_{абр}$ к объему в подводной $Q_{ак}$ характеризуется величиной коэффициента аккумуляции, о котором говорилось выше [2, 6]. Построение математической модели основывалось на законе сохранения [1, 2] с учетом стадийного развития профиля переработки берегового склона [3, 4].

Процесс стадийности развития берега определяется различным режимом движения наносов и наличием как вдольберегового Q_x , так и поперечного Q_y потока наносов в береговой зоне. Для первой стадии характерно соотношение вида: $Q_x = 0, Q_y > 0$; для второй стадии: $Q_x \neq 0, Q_y > 0$; для третьей: $Q_x > 0, Q_y \neq 0$.

Рассмотрим схему формирования абразионного берегового склона водохранилища, изображенную на рисунке 6.

Была принята следующая система координат: начало координат – точка уреза на начальной стадии; ось y – поверхность воды на отметках наиболее повторяющихся в течение года; ось X – вдоль уреза воды; ось Z – перпендикулярно водной поверхности. Принимаем, что на 1-й стадии развития берега отсутствует вдольбереговой перенос материала размыва и преобладает процесс переработки, т. е. $Q_x = 0, Q_y > 0$. Тогда, обращаясь к уравнению баланса наносов в береговой зоне [7], имеем

$$Q_{ак} = grad Q_x + Q_{абр}. \quad (7)$$

Учитывая, что для 1-й стадии $grad Q_x = 0$; имеем $Q_{ак} = Q_{абр} \xi_i$, где ξ_i – коэффициент аккумуляции $\xi_i = 1$. Величина аккумуляции зависит от скорректированного объема размыва, при этом объем размыва надводной части берега соответственно равен сумме элементарных блоков размыва (рис. 6):

$$Q_{абр} = \int_{t_1}^{t_0} F(y) dy, \quad (8)$$

где $F(y)$ – высота размываемого элементарного блока, dy – величина линейной переработки на 1-й стадии, t_0, t_1 – начало и окончание 1-й стадии. На 2-й стадии формирования профиля равновесия величина ξ_2 принимается равной $\xi_2 = \xi_1$. Тогда имеем:

$$Q_{абр} = \int_{t_2}^{t_1} F(y) dy. \quad (9)$$

На 3-й стадии формирования равновесного профиля, т. е. на стадии затухания и формирования профиля динамического равновесия, когда преобладает вдольбереговой перенос наносов ($Q_x > 0, Q_y \neq 0; \xi_1 < 1$), уравнение баланса наносов в береговой зоне и форма склона оцениваются выражением вида

$$Q_{ак} = grad Q_x + \xi_1 \int_{t_k}^{t_2} F(y) dy, \quad (10)$$

где $t_3 = t_k$ – конечное время переработки склона.

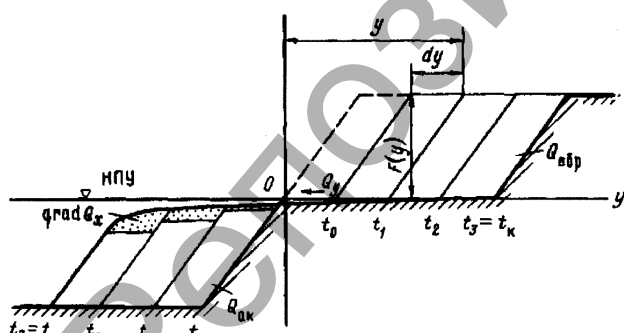


Рисунок 6 – Расчетная схема формирования абразионного берегового склона

Форма подводной части берегового склона может определяться также на основе известного дифференциального уравнения деформации берега, предложенного В.Л. Максимчуком [7].

Полученная математическая модель может использоваться с учетом следующих граничных условий:

- в соответствии с классификацией по уровенному режиму водохранилища 1-й и 2-й групп;
- водохранилища руслового, озерного и наливного типов;
- исходный береговой склон, имеющий обрывистую форму (высота обрыва от 0,5 до 15,0 м) либо пологую форму с уклоном поверхности от 0,1 до 0,33, а также грунтовые откосы дамб и плотин с верховыми откосами, имеющими заложения $m_2 = 2,5-15$;
- грунтовые условия, характеризующиеся наличием песков различной крупности с включением гравелистых частиц с коэффициентом неоднородности размываемого грунта (η) от 2,5 до 11,5.

Заключение

Таким образом, в результате анализа данных многолетних наблюдений за процессом берегоформирования:

- разработан показатель динамической устойчивости береговой линии;
- разработаны и сформулированы основные теоретические положения развития абразионных береговых склонов водохранилищ страны;
- разработана математическая модель, описывающая процесс формирования профиля динамического равновесия берега водохранилища, подверженного переработке в условиях Беларуси и сопредельных территориях европейских государств со сходными геологическим, морфологическими и гидрометеорологическими условиями.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Левкевич, В.Е. Закономерности развития деформаций грунтовых откосов дамб и плотин и естественных береговых склонов в условиях водных объектов Беларуси / В.Е. Левкевич, Э.И. Михневич // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания: сборник докладов IV Международной научно-практической конференции. – Брест: БрГТУ, 2013 – С. 122–125.
2. Левкевич, В.Е. Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси. – Минск: Право и экономика, 2015. – 306 с.
3. Рагозин, А.Л. Общие закономерности формирования и количественная оценка природных рисков на территории России // Проблемы анализа риска. – М.: Деловой экспресс, 2008. – Вып. 4. – С. 74–104.
4. Широков, В.М. Формирование берегов малых водохранилищ лесной зоны / В.М. Широков, П.С. Лопух, В.Е. Левкевич // С.-Пб.: Гидрометеиздат, 1992. – 160 с.
5. Левкевич, В.Е. Основы теории развития берегов малых водохранилищ и ее приложения к водным объектам Полесья // Проблемы Полесья. – Минск, 1990. – Вып. 13. – С. 143–152.
6. Левкевич, В.Е. Некоторые аспекты теории процесса берегоформирования в условиях малых равнинных водохранилищ // Водные ресурсы. РАН. – М. – № 3. – 1992. – С. 119–126.
7. Максимчук, В.Л. Рациональное использование и охрана берегов водохранилищ. – Киев, 1981 – 112 с.

Материал поступил в редакцию 12.05.2016

LEVKEVICH V.E. Fundamentals of the dynamic stability shore of the reservoir Belarus

The indexes of dynamic stability shores vodohranilish Belarus, formulated the basic provisions of the theory of development banks and the mathematical model of scarp, built on the basis of conservation laws.