Секция 1

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

УДК 629.735

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССОВ ЗАИЛЕНИЯ И ЗАНЕСЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩА

В. Н. АНУФРИЕВ[1], Г. А. ВОЛКОВА[2]
[1]Белорусский национальный технический университет, г. Минск, vladimir.anufriev@bntu.by
[2]Брестский государственный технический университет, Республика Беларусь, vvit@bstu.by

Актуальность. Водохранилища Республики Беларусь, используемые для энергетики, орошения, рыбного хозяйства, водоснабжения, регулирования стока, подвержены процессам заиления и занесения, которые снижают объем водоема. Поступление твердых примесей в водохранилища связаны с переносом наносов, абразии береговой линии под воздействием волн, водной и ветровой эрозии склонов, непосредственно прилегающих к водной поверхности водохранилища, с биологическими процессами, такими как зарастание макрофитами, а также эвтрофикации в результате отмирания сине-зеленых водорослей. Седиментационный баланс водохранилища позволяет получить данные для разработки стратегии эксплуатации водного объекта для оптимизации затрат.

Цель работы. Анализ основных факторов, определяющих интенсивность и характер отложений наносов в водохранилищах.

Основные результаты. Заиление водохранилищ представляет детерминированный динамический процесс, который в большинстве случаев рассматривается как однонаправленный, без учета возникающих размывов, переноса и переотложения наносов. Интенсивность и характер отложения наносов в водохранилищах определяются различными факторами: протяженностью, глубиной водохранилища, его плановой конфигурацией и проточностью, количеством и гранулометрическим составом наносов, переносимых водотоками, питающими водохранилище, устойчивостью берегов к волновому воздействию, интенсивностью процессов эвтрофикации.

Седиментационный баланс водохранилища включает наносы различного генезиса, которые влияют на интенсивность заиления. Наибольшей изменчивостью обладают так называемые аллохтонные наносы, поступающие в водохранилище извне, которые преимущественно обуславливают заиление подпорного бьефа. Однако в отдельные периоды эксплуатации преобладающую часть отложений в водохранилище могут вызвать формирующиеся внутри водоема автохтонные образования, в частности, при переработке берегов.

В общем виде уравнение седиментационного баланса водохранилища представлено в следующем виде:

$$V_R + V_{\text{вл}} + V_{\text{бер}} + V_{\text{ж}} + V_{\text{с}} + V_{\text{ст}} + V_{\text{п}} = V_{\text{з}} + V_{\text{н.б}}, \quad (1)$$

где V_R – объем взвешенных наносов, поступающих с водосборного бассейна, включая водную эрозию с площадей склонов, непосредственно прилегающих к водной поверхности водохранилища, м^3/год; $V_{\text{вл}}$ – объем влекомых наносов, поступающих в водохранилище, м^3/год; $V_{\text{бер}}$ – объем наносов, поступающих в водохранилище в результате процесса переработки берегов водохранилища, м^3/год; $V_{\text{ж}}$ – наносы, формирующиеся в процессе жизнедеятельности и в результате отмирания растительных и животных организмов, м^3/год; $V_{\text{с}}$ – объем наносов, получаемый в результате образования нерастворимых и малорастворимых химических соединений в воде водохранилища, м^3/год; $V_{\text{ст}}$ – объем наносов, образующихся при сбросе в водохранилище сточных вод, м^3/год; $V_{\text{п}}$ – поступление твердых частиц из атмосферы, при выпадении осадков и осаждении на зеркало водохранилища пылевых частиц, в том числе образующихся в результате ветровой эрозии, м^3/год; $V_{\text{з}}$ – суммарный объем наносов, отложившихся в водохранилище, м^3/год; $V_{\text{н.б.}}$ – объем взвешенных наносов, сбрасываемых в нижний бьеф, м^3/год.

Как показывает уравнение (1), интенсивность деформации чаши водохранилища зависит не только от взвешенных наносов, поступающих с речными водами, но и от других источников поступления твердых веществ в подпорный бьеф. Значительное количество отложений может образовываться в результате переработки берегов водохранилища (объем наносов $V_{\text{бер}}$).

В публикациях, связанных с изучением абразивных процессов на водохранилищах, указывается на относительно незначительный объем такого рода отложений для малых равнинных водохранилищ. С другой стороны, по мере увеличения площади зеркала водохранилища возрастают и объемы отложений за счет переформирования берегов, которые в отдельные периоды времени могут превышать объем наносов, поступающих с водосборного бассейна [1, 3]. Как известно, процесс переработки берегов водохранилищ

носит затухающий характер, и поэтому средний годовой объем отложений от обрушения берегов $V_{\text{ср.бер}}$, м^3/год, может определяться по формуле:

$$V_{\text{ср.бер}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_{\text{бер}i}}{n}, \qquad (2)$$

где $\sum_{i=1}^{n} V_{\text{бер}i}$ – суммарный объем наносов в результате переработки берегов водохранилищ за время полного затухания абразионных явлений, м^3; n – длительность периода от начала эксплуатации водохранилища до практически полного затухания абразионных явлений, лет.

Установлено, что на русловых водохранилищах (Осиповичское, Чигиринское, Чижовское, Витебской и Гродненской ГЭС и др.) переработка берегов составляет 25–40 % длины береговой линии и наблюдается в приплотинной части водоема. На водохранилищах озерного типа (Езерищенское, Селявское, Лепельское) переработке подвержено до 70 % берегов и верховых грунтовых откосов дамб и плотин [2]. Продолжительность периода интенсивных абразивных процессов при переработке берегов оценивается для водохранилищ небольших ГЭС периодом от 5 до 7 лет, после чего интенсивность переработки берегов водохранилищ резко снижается, а в течение последующих 10–15 лет практически полностью прекращается [1]. За это время в водохранилищах формируется полоса полупогруженных и надводных растений, которые снижают волновое воздействие на берега. Результаты наблюдений за процессом переработки берегов водохранилищ для небольших ГЭС на территории Республики Беларусь показывают, что активное обрушение происходило преимущественно в гидродинамически активной зоне с длиной разгона волны до 6 км и глубинами около 6 м. Объемы обрушения пород за счет переформирования приведены в таблице 1 [1].

Таблица 1 – **Параметры переформирования берегов и поступления абразионного грунта в водохранилища**

Водохранилище	Удельный объем обрушения на 1 м длины абразионного берега, м^3/м	Общий объем обрушений, тыс. м^3
Тетеринское	1,87–4,41	3,92
Осиповичское	3,62–18,6	29,3
Чигиринское	3,18–31,05	154,2

Кратковременность стадии переформирования и дальнейшей стабилизации берегов водохранилищ в течение 10–15 лет объясняется относительно невысокими высотами волн, устойчивыми уровнями и ускоренным формированием аккумулятивной отмели. По мере затухания процесса переработки берегов происходило выравнивание береговой линии за счет заполнения

наносами небольших заливов. Пополнение аккумулятивных отмелей шло за счет отложения песчаных фракций, с выносом глинистых частиц в открытую часть водохранилища. В связи с чем береговая отмель у берегов, сложенных суглинками, образовывалась практически за счет врезки в берег с образованием песчаных или завалуненных отмелей, так как аккумулятивная часть от объема обрушений была незначительной. Формирование отмелей у песчаных берегов происходило как за счет врезки в берег, так и за счет аккумуляции продуктов разрушения. Оценка объемов обрушения берегов при прогнозировании может быть произведена при определении параметров переформирования берегов с учетом выноса части абразионного материала.

Отложения веществ биологического происхождения могут составлять в балансе значительную долю. Прогнозирование и количественное определение данных по отложениям такого рода весьма сложно в связи с многообразием трофических процессов в экосистеме водохранилища. В ряде источников приводятся данные о суммарных отложениях, продуцируемых фитопланктоном и высшей водной растительностью, которые составляют от 1 до 5,5 % от общего объема заиления [3].

При этом можно выделить два процесса, приводящих к продуцированию биологических отложений в водохранилище:

– зарастание макрофитами;

– продуцирование отложений за счет интенсификации процессов размножения фитопланктона, в основном сине-зеленых водорослей.

Поступление в водохранилище биогенных элементов, в том числе соединений азота и фосфора в условиях скоростей движения воды, ведет к интенсификации процессов эвтрофикации за счет массового развития водорослей. Прирост биомассы водорослей оценивается пропорционально содержанию питательных веществ. Так, при потреблении 1 г фосфора и 7,2 г азота продуцируется до 115 г биомассы водорослей [4]. При дальнейшем отмирании часть указанной массы минерализуется и откладывается в виде отложений.

Учитывая незначительную гидравлическую крупность данных биообразований, их значительная часть будет выноситься с водой и сбрасываться в нижний бьеф, другая часть осаждается на дно водоема при их отмирании и последующей минерализации.

Считается, что вероятность эвтрофикации становится существенной при концентрациях фосфора выше 0,01 и азота 0,3 мг/дм^3. Влияние процесса на заиление может быть оценено по критической фосфорной нагрузке, аналогично при прогнозировании интенсивности эвтрофикации [5] по формуле

$$L_{\text{кр}} = 0,25 \frac{H_{\text{ср}}}{t_W} (1 + \sqrt{t_W}), \qquad (3)$$

где $L_{кр}$ – критическая фосфорная нагрузка, г/(м^2·год); $H_{ср}$ – средняя глубина водохранилища, м; t_W – время полного водообмена, год.

Таким образом, величина критической фосфорной нагрузки может указывать на существенность биологической продукции сине-зеленых водорослей, их возможное влияние на процессы заиления, которое должно рассматриваться более детально.

Интенсивность зарастания макрофитами варьируется в широких пределах. В районах фрагментарного зарастания продуктивность фитоценозов составляет от 0,5 до 2,0 кг/м^2 во влажном виде и от 0,2 до 0,8 кг/м^2 – в высушенном. Урожайность фитоценозов в районах сплошного зарастания достигает до 5–6 кг/м^2 при средней урожайности 2,8 кг/м^2 в сыром виде и 0,8 кг/м^2 – в высушенном. Следует учесть, что фитоценозы макрофитов и сине-зеленых водорослей в водохранилищах, как правило, являются конкурирующими биологическими сообществами, и интенсивное совместное протекание двух данных процессов практически не наблюдается.

Учитывается также объем наносов, получаемый в результате образования нерастворимых и малорастворимых химических соединений в воде водохранилища. Ионный сток (количество истинно растворенных веществ в тоннах), достигая в ряде случаев внушительных размеров, как правило, имеет транзитный характер, так как в нерастворимые химические соединения переходит относительно небольшая часть веществ. В частности, может происходить осаждение солей кальция, железа и ряда других за счет изменения гидрохимического состава воды вследствие поступления речного стока из разных речных систем и характеризующихся различным химическим составом, отведения сточных вод и т. д. Количественные параметры, характеризующие данный процесс, могут быть получены при оценке гидрохимического баланса поступления растворенных веществ в водохранилище и сброса из него.

Взвешенные вещества, поступающие со сточными водами, отводимыми в водохранилище (объем наносов $V_{ст}$), могут рассматриваться как существенные при сбросе сточных вод, включающих значительное количество нерастворимых примесей (например, неочищенные поверхностные сточные воды с большими концентрациями минеральных примесей). При отведении очищенных сточных вод после очистных сооружений биологической очистки содержание взвешенных веществ в отводимых сточных водах в большинстве случаев ниже или сопоставимо с мутностью речной воды.

Поступление твердых частиц из атмосферы при выпадении осадков и осаждении на зеркало водохранилища пылевых частиц, в том числе образующихся в результате ветровой эрозии, представляет значимую величину в регионах, где периодически возникают пыльные бури. В остальных случаях данная составляющая баланса в расчетах не учитывается.

Основной объем седиментации водохранилища обусловлен поступлением взвешенных и влекомых наносов, которые поступают в водохранилище с речными, дождевыми и талыми водами с площади боковой приточности. Кроме того, наносы образуются и в самом водохранилище при воздействии волн на склоны ложа в процессе переформирования берегов. Преимущественно наносы осаждаются в зоне выклинивания подпора вследствие уменьшения кинетической энергии потока. В верхней части водохранилища осаждаются более крупные, по акватории – более мелкие наносы [6].

Выводы. Среднюю продолжительность службы водохранилища, прогноз его заиления и занесения производят на основании анализа седиментационного баланса водохранилища. Основными составляющими приходной части баланса являются: приток наносов, поступающих с водосборного бассейна и с прилегающих склонов (V_R), наносов, поступающих в водохранилище в результате процесса переработки берегов водохранилища ($V_{бер}$), отложения веществ биологического происхождения (наносы, формирующиеся в процессе жизнедеятельности и в результате отмирания растительных и животных организмов $V_ж$), а расходной части баланса – накопление осадка и объем взвешенных наносов, сбрасываемых в нижний бьеф ($V_{н.б.}$). Для прогноза срока заиления и занесения водохранилища необходимо количественно оценить все составляющие, входящие в уравнение (1).

Список литературы

1 **Широков, В. М.** Формирование малых водохранилищ гидроэлектростанций / В. М. Широков, П. С. Лопух. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.

2 **Левкевич, В. Е.** Закономерности развития береговых процессов на водохранилищах гидроэлектростанций Беларуси / В. Е. Левкевич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2018. – Т. 61, № 5. – С. 463–478.

3 **Молдованов, А. И.** Заиление прудов и водохранилищ в степных районах / А. И. Молдованов. – Л. : Гидрометеоиздат, 1978. – 128 с.

4 **Лукиных, Н. А.** Методы доочистки сточных вод / Н. А. Лукиных, Б. Л. Липман, В. П. Криштул. – М. : Стройиздат, 1978. – 156 с.

5 **Фащевский, Б. В.** Основы экологической гидрологии / Б. В. Фащевский. – Минск : ЭКОИНВЕСТ, 1996. – 239 с.

6 **Мишон, В. М.** Прогноз заиления и занесения воронежского водохранилища продуктами разрушения берегов, фитопланктона и высшей водной растительности / В. М. Мишон // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. – 2010. – № 1. – С. 92–97.