

9. Воропаев, Г.В. Моделирование водохозяйственных систем аридной зоны СССР / Г.В. Воропаев, Г.Х. Исмаилов, В.М. Федоров. – М. Наука, 1984 – 313 с.
10. Косолапов, А.Е. Совершенствование процесса управления водными ресурсами бассейна реки на основе автоматизированных информационно – советующих систем: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических. – Екатеринбург: РосНИИВХ, 1996. – 34 с.
11. Пряжинская, В.Г. Компьютерное моделирование в управлении водными ресурсами / В.Г. Пряжинская, Д.М. Ярошевский, Л.К. Левит-Гуревич – М.: Физматлит. 2002. – 496 с.
12. Вода России. Экономико-правовое управление водопользованием / Под ред. А.М. Черняева. – Екатеринбург: Аква-пресс, 2000. – 408 с.
13. Черепанский, М.М. Гидрогеологические прогнозы влияния отбора подземных вод на речной сток // Природные ресурсы. – 1999. – № 3. – С. 53–69.
14. Вьетнамский национальной регламент: QCVN 04-05: 2012/BNNPTNT/ Национальный технический регламент о гидротехнических сооружениях: основные условия для проектирования. – Ханой, 2012. – 47 с.
15. Перехрест, В.С. Водохозяйственные проблемы использования и сохранения малых рек / В.С. Перехрест, В.Н. Плужников. – Минск: Наука и техника, 1986. – Книга «Проблемы использования и охраны водных ресурсов». – С. 30–43.
16. Мухавец: энциклопедия малой реки / А.А. Волчек [и др.]. – Брест: Академия, 2006. – 344 с.
17. Михневич, Э.И. Деформация русел канализованных рек Белорусского Полесья и меры по их предотвращению / Э.И. Михневич // Природная среда Полесья: особенности и перспективы развития: сб. научн. трудов. – Брест: Академия, 2006. – Том 2. – С. 479–485.
18. Фам Нгок, Киен. Критерии оптимизации параметров водохозяйственного комплекса в бассейнах малых рек предгорных районов Вьетнама // Наука и техника – 2016. – № 1. – С. 124–128.
19. Колобаев, А.Н. Рациональное использование и охрана водных ресурсов. – Минск: БНТУ, 2005 – 172 с.
20. Техника орошения и осушения для сельскохозяйственных и продовольственных культур: Стандарт TCVN 8641:2011 // Утвержден Министерством сельского хозяйства и развития сельской местности Вьетнама. – Ханой, 2011. – 41 с.

Материал поступил в редакцию 03.04.2016

**KOLOBAYEV A.N., FAM NGOK KIYEN Justification of structure and key parameters of the water management complex in basins of the small rivers of Belarus and Vietnam**

Main principles of integrated water management in small rivers of Belarus and Vietnam, which are different by the intensive development of irrigation and limited water resources.

УДК 519.216.3: 627.8

Левкевич В.Е.

**УСТОЙЧИВОСТЬ ЧАСТИЦ НАНОСОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПРОФИЛЯ РАВНОВЕСИЯ АБРАЗИОННОГО БЕРЕГА**

**Введение.** При формировании профиля равновесия, в частности, профиля динамического равновесия абразионного берега, особую значимость приобретает характер движения наносов и условия равновесия частиц грунта на поверхности береговой отмели на различных стадиях развития водохранилища. В работе показаны условия равновесия и устойчивости частиц грунта с учетом особенностей распределение волновых скоростей по профилю в береговой зоне водохранилищ Беларуси.

**В прибрежной зоне водохранилищ,** в зависимости от соотношения глубин и высот волн, выделяются ряд зон волнения: I – зона глубокой воды, II – зона трансформации волны при подходе к берегу; III – зона обрушения; IV – зона наката волны на откос [1]. При разрушении волны наибольшие скорости волнового потока на откосе профиля равновесия возникают в точке В, соответствующей зоне опрокидывания волны (рис. 1) [1–3].

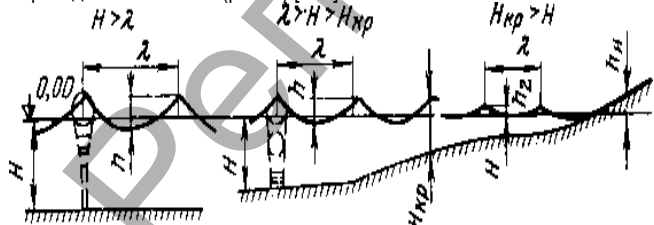
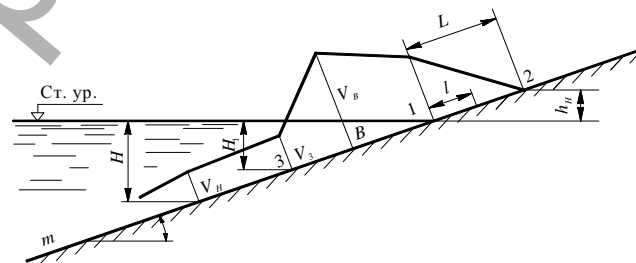


Рисунок 1 – Схема развития ветрового волнения [1]

Структура волнового потока при его разрушении на откосе (береговой отмели) отображается эпюрой распределения скоростей [3–5] (рис. 2).



$L$  – расстояние между точками 1 и 2;  $l$  – расстояние от точки 1 до расчетной точки;  $H$  – глубина до минимальной скорости волны в зоне наката;  $h_n$  – высота наката;  $B$  – точка максимального давления;  $V_n$  – скорости волны в зоне наката;  $H_1$  – глубина в точке 3;  $V_e$  – скорость в точке максимального давления;  $m$  – заложение откоса;  $\alpha$  – угол заложения откоса

Рисунок 2 – Эпюра распределение скоростей волнового потока по береговой отмели

Ширина зоны воздействия ветрового волнения на откос определяется параметрами волнения: высотой и длиной. В условиях водохранилищ Беларуси ширина зоны воздействия волнового потока на откос (подводную часть береговой отмели) ограничена зоной забурунивания, опрокидывания и наката. Ширина ее составляет от 2,5–3,5 м до 5,5–10,0 м. Высота наката волны на берег, подверженный переработке  $h_n$ , зависит от параметров волны, крутизны откоса, наличия шероховатости и непроницаемости откоса, а также угла подхода волны. Для определения высоты наката волны известно ряд эмпирических зависимостей, по-разному учитывающих перечисленные факторы. Из числа наиболее распространенных можно отметить формулы: Н.Н. Джунковского, Б.А. Пышкина, А.Г. Сидоровой,

Левкевич Виктор Евгеньевич, к.т.н., доцент, зав.сектором ГНУ «Институт экономики НАН Беларуси», e-mail: eco2014@tut.by. Беларусь, 220071, ул.Сурганова, д. 1, корп. 2.

П.А. Шанкина, а также СН 92-60 и ТКП [1–7]. Значения высоты наката волн на откосы, полученные по приведенным формулам и вычисленные при одних и тех же исходных данных, дают заметное расхождение. Расхождения в расчетной высоте наката становятся особенно заметными с увеличением высоты волны. Наибольшее расхождение дают формулы Н. Н. Джунковского, Б.А. Пышкина, и СТБ, причем во всех случаях получаются заниженные значения. Занижение составило 23–37%. Формулы – П.А. Шанкина и СН 92-60 практически дают одинаковые результаты в любом диапазоне крутизны волн, но с завышениями. Сравнение расчетных значений величины  $h_n$  с фактическими осуществлялось с данными натурных наблюдений за накатом волны, полученных на Петровицком водохранилище. Натурная проверка высот наката волны на песчаный берег показала, что формулы СН 92-60 и П.А. Шанкина дают наиболее близкое совпадение вычисленных значений  $h_n$  с наблюдаемыми величинами. Отклонение  $h_n$  от фактических, измеренных в натуральных условиях  $h_{ни}$  составляет 8–10%. Поэтому для водохранилищ Беларуси высоту наката волны рекомендуется определять по этим формулам.

При накате волны на откос скорости потока воды имеют переменное значение. Для ряда характерных точек по откосу, которыми являются точки В, 1, 2 и 3, были вычислены значения скоростей волнового потока по профилю равновесия в контрольных точках 1, 2 и 3 (рис. 2) [2]:

$$v_1 = \frac{10k_w \sqrt{g}}{2\pi + m} \sqrt[6]{h^2 \lambda}; \quad (1)$$

$$v_1 = v_1 \left( 1 - \frac{l}{h_n \sqrt{1 + m^2}} \right); \quad (2)$$

$$h_n = \frac{2k_w}{m} h \sqrt[3]{\frac{\lambda}{h}}; \quad (3)$$

$$v_3 = \frac{n\pi h}{\sqrt{\frac{\pi\lambda}{g} sh \frac{4\pi H_1}{\lambda}}}; \quad (4)$$

$$H_1 = \frac{1,22}{m^{0,8}} \sqrt{h\lambda}, \quad (5)$$

где  $k_w$  – эмпирический коэффициент шероховатости;  $g$  – сила уско-

рения свободного падения,  $m/c^2$ ;  $h_n$  – высота наката волны, м;  $m$  – коэффициент заложения откоса;  $h$  – высота расчетной 1% волны;  $\lambda$  – длина волны, м. Ниже в таблице 1 приведены значения расчетных волновых скоростей, полученных для откосов и естественных берегов, подверженных переработке по ряду водохранилищ Беларуси.

Как видно из таблицы 1, в зонах разрушения и опрокидывания волны значения волновых скоростей превышают размывающие и допускаемые размывающие скорости для песчаных несвязных грунтов, что вызывает переработку и размыв верховых откосов дамб и плотин и абразионных берегов (рис. 3).

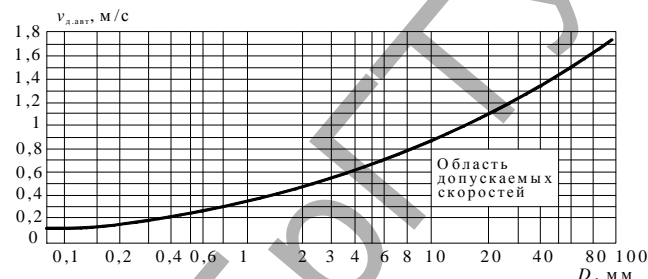


Рисунок 3 – График допустимых не размывающих донных скоростей [2–5]

Воздействие волнового потока на грунт, образующий подводную часть склона, ведет к отмели волновой сортировке материала переработки по крупности по ширине и переносу частиц грунта в виде влекочных наносов вдоль уреза (рис. 4).

При формировании профиля равновесия значительную роль играет физико-механический состав размываемых волновым потоком грунтов [4, 5]. Необходимо отметить тот факт, что наряду с вдольбереговым движением наносов на водохранилищах присутствует и поперечное перемещение материала переработки.

Таблица 1 – Значения расчетных скоростей волнового потока на профиле равновесия

Водохранилище	Берег, тип процесса, грунты	Средний диаметр частиц грунта, $d_{50}$ , мм	Волновые скорости, в контрольных точках м/с		
			$V_1$	$V_2$	$V_3$
1	2	3	4	5	6
Вилейское	Левый берег, уположенный пляжный песчаный откос. Объект: «Реабилитационный детский центр «Надежда – XXI век». Незначительная местная переработка, перемещение материала переработки вдоль уреза	0,51	5,12	5,09	0,34
Заславское	Правый берег. Склон сложен песчаным грунтом различной крупности. Разрушение берега, волновая сортировка материала переработки, вольбереговое перемещение наносов	0,51	5,07	4,82	0,34
Петровицкое	Левый берег, подверженный переработке. Размываемый грунт-песчаный. Волновая сортировка с активным вдольбереговым переносом материала переработки	0,47	5,12	4,87	0,34
Краснослободское	Активная переработка верхового уположенного откоса земляной плотины, сложенного песчаным грунтом. Перемещение материала в поперечном направлении по отмели.	0,41	4,98	4,73	0,33
Солигорское	Левый берег водохранилища. Переработка с аккумуляцией материала по профилю.	0,36	5,12	4,87	0,34
Осиповичское	Левый берег. Вторичная переработка склона. Грунты разнородного состава. Пески различной крупности, супеси.	0,35	4,43	4,21	0,28

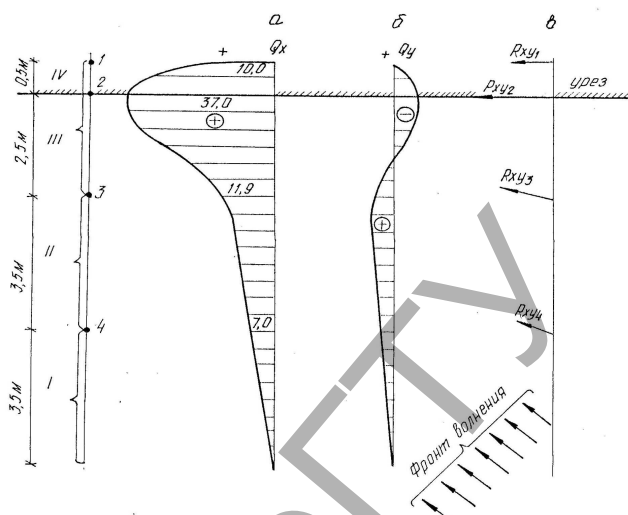


Рисунок 4 – Волновая сортировка материала переработки по крупности по отмели

Как показали натурные исследования автора на водохранилищах, находящихся в эксплуатации небольшой период времени, вдольберегового перемещения материала переработки не происходит, так как отсутствует широкая береговая отмель, а при этом доминирует поперечное перемещение, при котором наносы смещаются к основанию подводного склона [8–9]. Это подтверждается практически полным отсутствием аккумулятивных форм на молодых водохранилищах, таких как Цнянское, Дубровское, Раубичское, Гродненской ГЭС и ряде других.

Под воздействием ветрового волнения в приустьевой зоне подводной части отмели за счет взвешивания частиц происходит движение обломочного материала – наносов по профилю. Как показали натурные исследования, перемещение материала происходит во взвешенном и сальтирующем состоянии. Это происходит как за счет взвешивания и затем выноса мелкозернистых частиц, так и за счет аккумуляции более крупных. Ширина зоны взвешивания и перемещения наносов составляет для условий волнения, которое наблюдается на водохранилищах Беларуси – около 2–3 м от границы уреза. Объем взвешенных частиц в общем объеме вдольберегового потока наносов на водохранилищах незначителен (мутность волнового потока 250...450 мг/м<sup>3</sup>). Проведенные автором экспериментальные исследования с использованием разработанного комплекта наносоловителей специальной конструкции в береговой зоне Петровицкого и Заславского водохранилищ, а также Дрозды при штормовых условиях позволили получить результаты, подтвердившие наличие подвижного слоя наносов на профиле и расходы влекомых наносов в приустьевой зоне в период формирования профиля динамического равновесия.

По результатам натурных экспериментов строились эпюры распределения продольного вдольберегового  $Q_x$  и поперечного  $Q_y$  расходов наносов по отмели, (рис. 5). Величины равнодействующих значений расходов потока наносов показаны в виде векторов направления движения наносов  $R_{xy}$  в каждой зоне волнения.



а) вдольбереговая составляющая потока влекомых наносов; б) поперечная составляющая вдольберегового потока наносов; в) равнодействующие потока наносов в различных зонах волнения; 1, 2, 3, 4, 5 – точки установки наносоловителей; I, II, III, IV – зоны волнения

Рисунок 5 – Эпюры расходов наносов в береговой зоне. Заславское водохранилище. Участок 4. створ 5

Приведенное соотношение эпюр расходов наносов является характерным для водоемов страны и имеет особенности, присущие всем водохранилищам нашего региона:

- ширина зоны активного движения наносов по отмели (в подводной и надводной частях) составляет для условий водохранилищ Беларуси при ветровом волнении, характеризуемом  $h_{1\%} = 0,4 \dots 0,85 \text{ м} - 5,5 - 10,0 \text{ м}$ ;
- максимальный расход наносов  $Q_x$  приурочен зоне разрушения волны на урезе воды;
- поперечное движение наносов с расходом  $Q_y$  имеет знакопеременное направление в зоне разрушения волны и объясняется повышенной турбулентностью волнового потока с образованием потока наката на откос и обратного течения в водоеме.

Приведенные особенности распределения потока наносов при их движении по профилю сказываются на конечной форме и параметрах профиля равновесия, вырабатываемого в несвязных песчаных грунтах.

Известно, что устойчивость частиц грунта, образующего подводную часть профиля берега (оттели), формируется под действием гидродинамических нагрузок, вызванных ветровым волнением, прямыми и обратными течениями волнового потока и определяется допускаемыми скоростями. При этом, допускаемые скорости принимаются по значениям, полученным для условий русловых потоков, рядом авторов: В.Н. Гончаровым, И.И. Леви, В.С. Кнорозом, В.Л. Студеничниковым, а также Э.И. Михневичем и другими авторами. Для определения заложения волноустойчивых откосов в морских условиях и условиях крупных водохранилищ, формируемых под воздействием волновых потоков, используются зависимости Н.Н. Джунковского, Д.Путнама, Дж. Тейлора, В.П.Зенковича, В.В.Лонгинова, В.Н. Шайтана, А.Б. Пышкина, В.Л. Максимчука, Е. Цайтца, Ю.А. Сокольникова. Кроме указанных предложений в практике проектирования берегозащитных гидротехнических сооружений применялись и применяются нормативные документы – СН 92-60, СНиП, СТБ, ТКП, разработанные в различные периоды конца XX и начала XI веков [1–7].

Существующие зависимости по определению устойчивости частиц грунта на откосе различной крупности отличаются друг от друга, как по структуре, так и по способам учета силовых воздействий. Решение задачи об определении условий устойчивости частиц грунта на профиле равновесия, находящихся в пределах так называемого «активного» – подвижного слоя [8, 9], наличие которого нами под-

тверждено натурным экспериментом по изучению режима движения наносов и развитию вертикальных деформаций - имеют известную неопределенность. Кроме этого, следует также отметить, что табличные значения скоростей [1-3] и зависимости по определению донных скоростей приведены для горизонтального или слабо наклонного дна, т. е. для случая, когда на частицу не действует сдвигающая сила, являющейся составной частью силы тяжести. В случае расположения частиц на поверхности подводной части береговой отмели или грунтового откоса, подверженного переработке (на первой стадии формирования профиля равновесия) в результате увеличения роли этой составляющей в системе сил, определяющих их устойчивость, подвижка зерен происходит при скоростях потока меньших, чем расчетные или табличные. Оценка влияния этого фактора при расчете профиля равновесия в рассматриваемых условиях не нашла отражения в литературе, а вместе с тем, учет его также необходим для определения крупности частиц грунта, образующего профиль динамического равновесия. Размыв грунтов, образующих склон, является важным фактором в нарушении устойчивости откоса и берега, подверженного переработке. Основной причиной разрушения откосов, находящихся в зоне действия волнового потока, является гидродинамическое давление волнового ( $P_{B \max}$ ) и грунтового потока ( $P_{\Phi}$ ), которое создает дополнительное сдвигающее усилие и вызывает нарушение местной устойчивости, обусловленной деформациями отдельных зон откоса. Кроме того, структура волнового режима и учет величины подъемной силы, которая также присутствует, дает возможность решать две прикладные задачи: 1) по скоростям потока можно находить крупность частиц, образующих береговую отмель и ее самоотмостку или же 2) при принятом диаметре зерен грунта определять допустимую скорость, при которой они будут находиться в устойчивом состоянии, соответствующем профилю динамического равновесия.

Из существующих методов расчета устойчивости откосов земляных сооружений, применяемых в механике грунтов, наибольшее распространение нашли графо-аналитические, основанные на круглоцилиндрических поверхностях скольжения. Однако многие из них существенно различаются между собой как структурой расчетных зависимостей, так и значениями, рассчитываемых по этим зависимостям величин, дающих в ряде случаев расхождения с натурой [8, 9]. Более того, они являются статическими моделями, не отображающими динамику процесса разрушения во времени. Это обусловлено трудностью учета влияния многочисленных переменных факторов и, в частности, неполным учетом влияния действующих сил и характеристик водного потока. Исключительно сложный процесс водной эрозии отражается в теоретических схемах и расчетных зависимостях Э.И. Михневича, А.Н. Соболевского и других авторов.

Для анализа комплекса сил, действующих на частицу грунта, лежащую на откосе, воспользуемся методом определения предельного состояния откоса. Этот метод имеет свои преимущества. Метод дает возможность по распределению всех действующих сил на частицу грунта на различных стадиях размыва и формирования профиля равновесия оценить общую устойчивость профиля равновесия, а также построить динамически устойчивый поперечный профиль отмели абразионного склона. Анализ литературы по данному вопросу [2,3] показывает, что волновой и фильтрационный потоки влияют на величину подъемной силы и лобового сопротивления частиц. Это, в свою очередь, вызывает повышение или понижение интенсивности турбулентности и изменение кинематической структуры потока, что влияет на формирование формы поверхности отмели и значение допускаемых (неразмывающих) скоростей (Г.В. Васильченко, Г.А. Катамадзе, Д.В. Штеренлихт, А.С. Сокольников, В.Л. Максимчук).

Рассматривая частицу грунта, находящуюся на откосе ниже зоны разрушения волны (в подводной части отмели), по которому движется волновой поток, можно отметить, что здесь действуют следующие силы: влекущая сила, сила тяжести  $G$  частицы, погруженной в воду,  $\alpha$  – угол наклона откоса и компоненты силы тяжести  $G \cos \alpha$ , стремящиеся сдвинуть частицу вниз по откосу и компонента силы

тяжести  $G \sin \alpha$ . Сила действующей волны в момент удара струи на поверхность отмели с максимальным волновым давлением  $P_{B \max}$  находится в точке  $B$  с координатами (рис. 6).

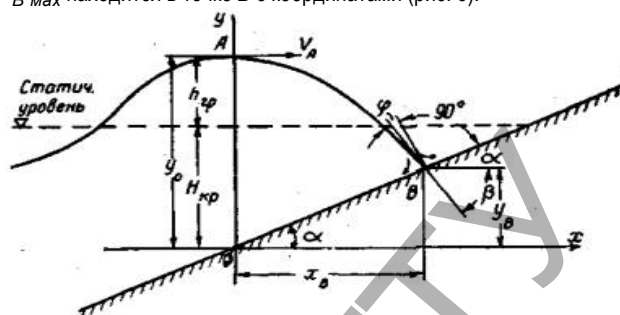


Рисунок 6 – Разрушение волны по откосу

$$y_B = \frac{x_B}{m}; \quad (6)$$

$$x_B = \frac{-v^2 A}{m} \pm v_A \sqrt{\frac{v^2 A}{m^2} - 2gy_0}, \quad (7)$$

где  $y_0$  – ордината точки  $A$ , характеризующая положение струи в начальный момент сброса ее с гребня волны;  $h_{гр}$  – возвышение точки над статическим уровнем:

$$y_0 = H_{кр} + h_{сп}; \quad (8)$$

$$h_{сп} = \left[ 0,95 - (0,84m - 0,25) \frac{h}{\lambda} \right] h, \quad (9)$$

$u_A$  – горизонтальная проекция начальной скорости струи, сбрасываемой с гребня волны

$$v_A = n \sqrt{\frac{g^3}{2\pi} th \frac{2\pi H}{\lambda}} + h \sqrt{\frac{\pi g}{2\lambda} cth \frac{2\pi H}{\lambda}}, \quad (10)$$

где  $n$  – эмпирический коэффициент, вычисляемый по формуле

$$\left[ n = \left[ 4,7 \frac{h}{\lambda} + \left( \frac{m}{\sqrt{1+m^2}} \right) - 0,85 \right] \right]. \quad (11)$$

Эпюра волнового давления, действующего на откос, строится по точкам с давлением  $P_{B \max}$  и с давлениями, вычисленными для соответствующих расстояний от точки  $B$  вверх по откосу до точек № 1, № 2 и вниз по откосу до точек № 3 и 4, имеющих соответственно значения  $0,4 P_{B \max}$  и  $0,1 P_{B \max}$  [2-7].

Для частиц, лежащих на поверхности отмели, на различных стадиях развития профиля равновесия расчетная схема имеет вид (рис. 7).

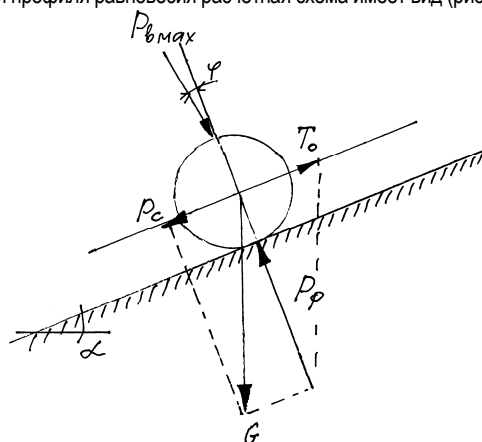


Рисунок 7 – Схема сил, действующих на частицу грунта на профиле равновесия на различных стадиях формирования

Из условия предельного равновесия сила, действующая на частицу грунта, расположенную на площадке, ориентированной углом  $\varphi$  к горизонту, будет вычисляться таким образом: к компоненте силы тяжести  $G \sin \varphi$ , действующей на частицу грунта, находящуюся на поверхности отмели, прибавляем силу максимального волнового давления  $P_{B \max}$  на откос от удара струи в точке  $B$  в момент обрушения волны:

$$P_{B \max} = 1,7\gamma \frac{v^2 B}{2g} \cos^2 \varphi, \quad (12)$$

где  $\varphi$  – угол между касательной к направлению струи в точке  $B$  и нормалью к откосу, равный (рис. 6)

$$\varphi = 90^\circ - (\alpha + \beta) \quad (13)$$

$\beta$  – абсолютное значение угла между касательной к направлению струи в точке  $B$  и горизонталью, вычисляемое

$$\operatorname{tg} \beta = -\frac{g^* B}{v^2 A}. \quad (14)$$

По аналогии с анализом воздействия сил на частицы откоса, проведенным Лейном, и принимая, что в первом приближении  $P_{B \max} = P_\phi$  фильтрационному, поровому, можно сказать, что результирующая скатывающая сила  $P_C$  равна сумме  $G = (G \sin \alpha + T_0 \sin \alpha)$  и компоненте влекущей силы  $T_0$ :

$$P_C = (G \sin \alpha + G \cos \alpha + T_0) K_\phi. \quad (15)$$

В соответствии с законом механики можно принять, что движение частицы начинается при равенстве сопротивления ее движению силе, вызывающей это движение. Сопротивление движению частицы равно силе  $G \cos \alpha$ , умноженной на коэффициент трения  $K_\phi = \operatorname{tg} \varphi$ , где  $\varphi$  – угол внутреннего трения грунта, образующего поверхность отмели.

Определим условие, при котором твердые частицы грунта на поверхности откоса будут находиться в устойчивом состоянии. Допустим, что направление гидродинамических давлений совпадает с направлением откоса. Тогда силы, сдвигающие выделенную на поверхности откоса единичную частицу грунта, будут равны:

$$T = G \sin \alpha \text{ и } G = \frac{\Delta_0 \varepsilon}{1 + \varepsilon} l = \gamma n \operatorname{tg} \alpha, \quad (16)$$

где  $n = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}$  – объем пор в единице объема грунта;  $\gamma_w$  – удельный вес воды. Силы, удерживающие рассматриваемый элемент грунта на поверхности откоса, будут равны

$$T' = G \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi. \quad (17)$$

При этом

$$G = \gamma_0 \cdot 1, \quad (18)$$

где  $\gamma_0$  – удельный вес грунта, облегченный весом вытесненной воды. Для устойчивого откоса, сдвигающие силы должны составлять некоторую долю от удерживающих сил:

$$\gamma_0 n \operatorname{tg} \alpha + \gamma_0 \sin \alpha = \frac{1}{\eta} (\gamma_0 \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi), \quad (19)$$

где  $\eta$  – коэффициент устойчивости частиц грунта. Отсюда получаем:

$$\eta = \frac{\gamma_0 \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi}{\gamma n \operatorname{tg} \alpha + \gamma_0 \sin \alpha}. \quad (20)$$

При величине  $\eta > 1$  поверхность отмели будет устойчивой. В противном случае, что наблюдается при формировании береговой отмели на начальных стадиях после заполнения водохранилища, величина  $\eta$  всегда составляет менее 1. На третьей заключительной стадии формирования профиля динамического равновесия форма профиля приобретает устойчивый контур и величина  $\eta$  более 1.

#### Заключение

1. Исследованиями установлено, что наряду с вдольбереговыми течениями, обеспечивающими движение наносов вдоль уреза на малых водохранилищах Беларуси, присутствует и поперечное перемещение материала переработки, которое вызывается волновыми течениями и гидродинамикой береговой зоны. Под воздействием ветрового волнения по ширине отмели происходит движение обломочного материала, что ведет к естественной сортировке по крупности в зависимости от зоны трансформации волнения в береговой зоне, и распределения скоростей волнового потока.
2. Волновая сортировка грунта происходит как за счет выноса мелкозернистых частиц, так и за счет аккумуляции более крупных.
3. Ширина зоны взвешивания наносов составляет 2...3 м от уреза воды. Ширина зоны наката изменяется от 2,5–3,5 м до 5,5–10,0 м в зависимости от параметров ветрового волнения.
4. Устойчивость отдельных частиц наносов определяется соотношением сил, воздействующих на поверхность подводной части склона, а коэффициент устойчивости частиц изменяется в зависимости от стадии формирования профиля равновесия и составляет значения: до 1 на начальных стадиях формирования профиля динамического равновесия и более 1 при сформировавшемся равновесном откосе.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пышкин, Б.А. Динамика берегов водохранилищ / Б.А. Пышкин. – Киев: Наукова думка, 1973. – 416 с.
2. Канарский, В.С. Устойчивость и прочность откосов земляных сооружений / В.С. Канарский. – М.: Энергоиздат, 1982. – 146 с.
3. Шайтан, В.С. Исследование ветровых волн на водохранилище / В.С. Шайтан. – Москва: Гостройиздат, 1962.
4. Цайтц, Е.С. Действие волн на откос из несвязанных грунтов: автореферат дис.... канд. техн. наук / Е.С. Цайтц. – Киев, 1958. – 21 с.
5. Максимчук, В.Л. Рациональное использование и охрана берегов водохранилищ / В.Л. Максимчук. – Киев, 1981. – 112 с.
6. Гидротехнические сооружения. Правила определения нагрузок и воздействий (волновых, ледовых и от судов): ТКП45-3.04-170-2009 // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск, НПП РУП «Стройтехнорм», 2007. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
7. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений: СНиП 2.06.08-87 // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск: НПП РУП «Стройтехнорм», 2007. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
8. Левкевич, В.Е. Динамическая устойчивость берегов водохранилищ Беларуси / В.Е. Левкевич. – Минск: Право и экономика, 2015. – 306 с.
9. Левкевич, В.Е. Динамика береговых процессов русловых, наливных и озерных водохранилищ Беларуси / В.Е. Левкевич. – Минск: Право и экономика, 2015. – 202 с.

Материал поступил в редакцию 11.05.2016

#### LEVKEVICH V.E. Stability particles are applied during the formation of equilibrium profile scarp

In the formation of the profile of the dynamic equilibrium of the reservoir scarp special significance is the nature of the movement of sediments and the equilibrium conditions of the soil particles on the surface of the coastal shallows. The paper shows the equilibrium conditions and the result of the analysis of the stability of the soil particles allowing for the distribution of the velocity of the wave in the coastal zone of Belarus reservoirs at different stages of development of the profile of dynamic equilibrium.