

Левкевич В.Е., Кобяк В.В., Бузук А.В.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА СТОКОВЫХ И ВДОЛЬБЕРЕГОВЫХ ТЕЧЕНИЙ В РУСЛОВЫХ ВОДОХРАНИЛИЩАХ БЕЛАРУСИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**Введение.** В Республике Беларусь насчитывается около 150 водохранилищ с протяженностью береговой линии более 1500 км и суммарной площадью водного зеркала около 800 км<sup>2</sup> [1]. Большая их часть – это водоемы руслового типа, предназначенные для различных целей: водоснабжения, мелиорации, орошения, рекреации и т.д.

Несмотря на множество положительных моментов, возникающих при эксплуатации водохранилищ, в их береговой зоне происходит ряд негативных процессов, которые оказывают определенное отрицательное влияние на природную среду и нарушают условия жизнедеятельности населения (подтопление и заболачивание территорий, переработка берегов, развитие эрозионных процессов и т.д.).

Стационарные натурные исследования береговых процессов, а также берегообразующих факторов, проведенные авторами в период с 1978 по 2013 год, позволили выявить определенное влияние внутриводоемных и вдольбереговых течений – одного из активных факторов берегоформирования на состояние береговой зоны и берегозащитных сооружений [1–4]. По результатам исследований было установлено, что общая протяженность незащищенных береговых склонов, подверженная интенсивной переработке (рисунок 1а), составляет около 25 км [5]. Анализ состояния защищенных берегов указывает на то, что деформации берегоукрепительных сооружений, проявляющиеся в виде просадок, трещин, разломов, в ряде случаев зависят от режима распределения скоростей водного потока в приустьевой зоне. Характерными повреждениями берегоукрепительных сооружений является разрушение швов (рисунок 1б), что сопряжено с выносом грунта, просадкой плит, крепления, появлением трещин и разломов и, как следствие, разрушением этих сооружений [5–6]. Зачастую мероприятия по ремонту и восстановлению протекают очень медленно, что повышает вероятность повторных аварий на данных объектах.



**Рис. 1.** Разрушение берегового склона на Вилейском водохранилище и бетонного крепления берега на Лепельском водохранилище

В целях оценки влияния стокowych течений на динамику развития, интенсивность и масштабы абразионных процессов, а также устойчивость берегоукрепительных сооружений, были проведены измерения скоростей стокowych течений в натуральных условиях на ряде водохранилищ каскада Вилейско-Минской водной системы (далее – ВМВС), относящихся к русловым водоемам (рисунок 2) [1, 2].

Затем в лаборатории был смоделирован рассматриваемый каскад водохранилищ, на которых проводились измерения скоростей течения и расходов в контрольных створах и точках, что было в дальнейшем использовано при подготовке и проведении численного эксперимента по моделированию распределения скоростей.

При решении задач моделирования в водных объектах, в частности русловых водохранилищ важную роль играет определение соответствующих расчетных схем (алгоритмов), по которым в последующем будет выполняться расчет режима распределения скоростей и оценка устойчивости сооружений и береговых склонов.

Проведение натурных исследований и моделирование стокowych течений на водохранилищах в лабораторных условиях

Задачей исследований являлось изучение характера распределения скоростей течений, как по акватории русловых водохранилищ, так и вдоль берега.

В общем случае в водохранилищах выделяют поверхностные (дрейфовые) течения, возникающие под воздействием ветра и стокowe – в результате действия водосброса, насосных станций и т.д. Возможно также наличие градиентных, стратификационных вдольбереговых ветровых, волновых и прочих течений [1, 2]. В русловых водохранилищах распределение максимальных скоростей осуществляется в рамках полей течения, приуроченных старому руслу реки. В водохранилищах, имеющих расширенные плановые очертания, распределение скоростей осуществляется более равномерно по всему сечению. Это связано с тем, что при построении полей скоростей участвуют как стокowe течения, так и течения, возникающие в результате развития ветро-волновых и конвективных процессов.

Ниже в таблице 1 приводятся морфометрические характеристики водохранилищ ВМВС на которых проводились исследования развития внутриводоемных течений.

Изучение режима течений выполнялось в безледные периоды и состояло в съемке, картировании акватории водохранилищ и проведении стационарных наблюдений за вдольбереговыми течениями. Наблюдения включали: регистрацию скоростей и направлений течений и факторов, оказывающих влияние на их развитие – величины расходов ( $Q$ ), сбрасываемых в нижний бьеф водохранилищ, скорости и направления ветра на высоте 2 м над поверхностью воды, высоты и направления движения волны, уровня верхнего бьефа, топографических характеристик берега. Величины расходов, сбрасываемых в нижний бьеф, а также отметки уровня верхнего бьефа принимались на основании данных службы эксплуатации ВМВС. Для регистрации параметров ветра использовались автоматическая метеостанция М-47 и ручной анемометр МС-3, а также данные наблюдений ближайшей метеостанции. Характеристики ветрового волнения определялись по максимально-минимальной вехе. Скорости течений регистрировались при помощи измерителя течений ГР-42 и привязных поверхностных и глубинных поплавков по стандартной методике [7].

**Левкевич Виктор Евгеньевич**, к.т.н., доцент, зав. сектором Государственного научного учреждения «Институт экономики Национальной академии наук», e-mail: eco2014@tut.by

Беларусь, 220071, г. Минск, ул. Сурганова, 1, кор. 2.

**Кобяк Валерий Викторович**, к.т.н., зам. начальника отдела Научно-исследовательский института пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций МЧС Республики Беларусь.

Беларусь, 220046, г. Минск, ул. Солтыса, 183а.

**Бузук Александр Вячеславович**, преподаватель кафедры пожарной и промышленной безопасности Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь.

Беларусь, 220118, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25.

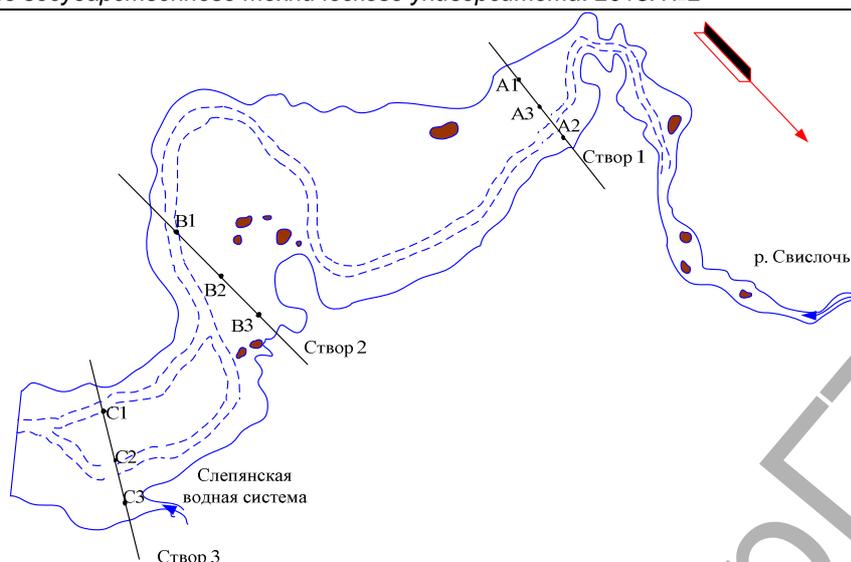
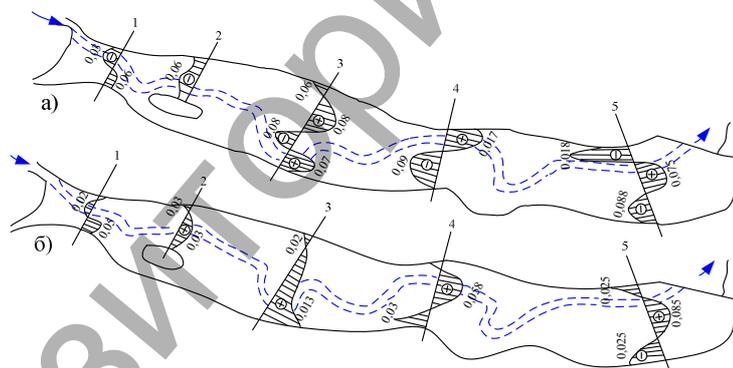


Рис. 2. Места расположения контрольных вертикалей и точек замеров. Водохранилище «Чижовское»

Таблица 1. Морфометрические характеристики водохранилищ ВМВС

Водохранилище	Площадь при НПУ, км <sup>2</sup>	Полный объем, млн.м <sup>3</sup>	Глубина средняя, м	Ширина, км	Длина, км
Заславское	31,1	105,5	3,50	4,50	10,0
Криницы	1,15	3,0	2,60	0,40	3,20
Дрозды	2,38	6,38	2,70	0,50	5,10
Чижовское	2,80	5,60	2,0	0,50	6,10
Волковичи	0,85	2,80	3,30	0,20	3,0
Вяча	1,68	5,10	2,0	0,61	5,33



а) поверхностные; б) донные

Рис. 3. Эпюры распределения скоростей течений по акватории водохранилища «Криницы» [4]

Число промерных вертикалей в створе изменялось в зависимости от ширины водоема в створе измерений от 4 до 9. На каждой вертикали число точек измерений составляло 3–5. По материалам съемок были построены поперечные разрезы водохранилищ с нанесенными эпюрами скоростей и направлений течений, продольные разрезы, а также линии распространения наибольших скоростей и планы течений по акватории водоемов.

Анализ эпюр и планов течений при скоростях ветра до 5 м/с показал, что на акватории малых водохранилищ можно выделить два вида течений: поверхностное и донное. При этом параметры их зависят от конкретных морфологических особенностей чаши, берегов и дна водоемов, гидрометеорологических характеристик и сбрасываемых расходов. Поверхностные течения, развивающиеся в результате воздействия ветра на поверхность водохранилища и турбулентного перемешивания верхних слоев потока, в зависимости от направления ветра могут совпадать или не совпадать со стоковыми, направленными всегда в сторону водосброса (рисунок 3). Развитие поверхностного течения определяется как скоростью ветра и интенсивностью ветрового волнения, так и их длительностью.

Результаты, приведенные в таблице 2, а также анализ эпюр скоростей течений указывает, что в наблюдаемых условиях (скорость

ветра 1–5 м/с, высота волны 0,1–0,3 м, глубины – до 8 м) поверхностные течения охватывают 0,5 площади сечения водохранилища, а их значения достигают 0,28 м/с.

В ряде случаев наблюдалось по оси водохранилища увеличение значений скоростей поверхностных течений в конце разгона.

Рассматривая стоковые течения, следует отметить, что под ними понимается перенос жидкости, происходящий в придонной области и приуроченный затопленному руслу водотока. При этом однонаправленное движение жидкости в сторону водосброса зависит лишь от величины сбрасываемого в нижний бьеф расхода и типа водосброса.

Изменения направления ветра не оказывают влияния на стоковые течения. Значение скоростей стоковых течений, в силу возникающих поперечных и продольных циркуляций по живому сечению водохранилища и его длине, могут изменяться и достигать 0,14 м/с (таблица 3).

Было установлено, что поверхностные течения, развивающиеся на акватории водохранилища воздействуют на береговой склон в виде вдольбереговых ветровых течений, развивающихся по всей ширине береговой отмели, в приузловой зоне, складываясь с другими видами течений, в частности волновыми, которые и доминируют.

Таблица 2. Значение скоростей поверхностных течений [1]

Водохранилище	Номер створа	Скорость поверхностного течения (м/с) при следующих вертикалях				
		I	II	III	IV	V
Криницы	III	0,04	0,03	0,08	0,07	0,03
Дрозды	IV	0,03	0,12	0,17	0,13	–
Чижовское	II	0,05	0,05	0,07	0,2	–
Волковичи	IV	0,03	0,07	0,02	0,13	–
Вяча	I	0,04	0,04	0,04	0,05	–

Таблица 3. Значения средних скоростей стоковых течений по длине водохранилища

Водохранилище	Величина расхода, м <sup>3</sup> /с	Скорость стоковых течений по зонам водохранилища, м/с		
		верховая	средняя	приплотинная
Криницы	13,9	0,04	0,10	0,3
Дрозды	14,0	0,10	0,10	0,05
Чижовское	14,0	0,04	0,04	0,05
Вяча	0,27	0,04	0,10	0,05

Что касается стоковых течений, то они даже в случае приближения к одному из береговых склонов, как правило, проходят гораздо ниже береговой отмели и тяготеют к старому затопленному руслу водотока.

В дальнейшем были проведены наблюдения за вдольбереговыми ветровыми течениями. Для исследования параметров вдольбереговых ветровых течений в приустьевой зоне были выполнены специальные измерения, включающие регистрацию скорости ветра ( $W_2$ ), высоту  $h_{1\%}$  волны и скорость вдольберегового течения ( $V_{в.б.}$ ). Наблюдения осуществлялись с эстакад длиной до 30 м на закрепленных вертикалях и охватывали всю ширину береговой отмели до глубины 1,5 м. Принятая методика измерений позволила регистрировать параметры скоростей течений лишь до зоны обрушения волны. Величины средних скоростей вдольбереговых течений в условиях наблюдений изменялись в пределах 0,02-0,07 м/с. Поток в зоне береговой отмели имел чаще однородное строение; при этом наибольшие значения скоростей наблюдались у поверхности. По ширине отмели величина скоростей изменялась от 0,06 м/с на свале до 0,1 м/с и более в приустьевой зоне и зоне разрушения волны.

Стационарные наблюдения, выполненные на вышеуказанных водохранилищах ВМВС, позволили выявить зависимость между параметрами  $V_{в.б.}$ ,  $W_2$ ,  $h_{1\%}$  [1, 2]:

$$V_{в.б.} = W_2; \quad (1)$$

$$V_{в.б.} = (h_{1\%}). \quad (2)$$

Обработка информации дала возможность установить коррелятивные соотношения и тесноту связей между параметрами ветрового режима и скоростью вдольберегового течения в водохранилищах руслового типа [1, 2]:

$$V_{в.б.} = 1,614 + 0,498 W_2, \quad R = 0,60; \quad (3)$$

$$V_{в.б.} = 2,909 + 5,472 h_{1\%}, \quad R = 0,40, \quad (4)$$

где  $R$  – коэффициент корреляции.

По результатам натурных исследований в Белорусском национальном техническом университете в гидротехнической лаборатории была построена не размываемая масштабная модель каскада, состоящая из пяти водохранилищ ВМВС. Масштаб моделей был принят: горизонтальный – 1:1000, вертикальный – 1:100 с соблюдением соответствующих критериев гидравлического подобия.



Рис. 3. Общий вид модели водохранилищ ВМВС. На переднем плане «Чижовское» водохранилище и р. Свислочь

Методика измерения состояла в регистрации расстояний, пройденных цветным маркером – красителем, вводимым в русловой поток, и проходящим через контрольные створы. По результатам лабораторных исследований были построены кривые переноса маркера и распределения скоростей течений по поверхности акватории водохранилищ. Кроме поверхностных скоростей, регистрировалось в контрольных точках распределение скоростей по глубине. Для этого использовался микрокомпьютерный измеритель скоростей расходомер-скоростемер МКРС с микровертушкой [1].

В последующем для численного моделирования распределения скоростей стоковых течений по акватории русловых водохранилищ была разработана компьютерная программа, позволяющая выполнять расчет скоростей и напоров потока, причем в основу модели были положены уравнения Лапласа (Буссинеска) и Сен-Венана (Буссинеска) [5, 6, 8–10].

В трёхмерном пространстве уравнение Лапласа в частных производных имеет вид

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

и является частным случаем уравнения Гельмгольца. Для упрощения решения задачи распределения скоростей, представленное уравнение может рассматриваться также в двумерном и одномерном пространстве. Для двумерного пространства уравнение Лапласа записывается:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0. \quad (6)$$

Так же и в  $n$ -мерном пространстве. В этом случае нулю приравнивается сумма  $n$ -вторых производных. С помощью дифференциального оператора:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \dots \quad (7)$$

(оператора Лапласа) – это уравнение записывается (для любой размерности) одинаково как  $\Delta = 0$ .

Тестовым водоемом, использованным для численного моделирования, было выбрано водохранилище «Криницы», входящее в каскад ВМВС. По сетке, разбитой по акватории водохранилища, задавались координаты контура берегов, островов, распределения глубин водоема и контрольные створы. Результаты расчета скоростной структуры потока и его распределения по акватории приведены ниже на рисунке 4.

Схема движения маркера по акватории водохранилища «Криницы», полученная в лабораторных условиях, показана на рисунке 5.

