



## АНАЛИЗ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВИНТООБРАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ ЗА ДОННЫМ ПОРОГОМ С ЦЕЛЮ УПРАВЛЕНИЯ ЕГО МАССООБМЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ И ТРАНСПОРТОМ НАНОСОВ

А.Е. Щодро<sup>1</sup>, С.М. Сидоров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

E-mail: [ashodro@ya.ru](mailto:ashodro@ya.ru)

<sup>2</sup>Севастопольский государственный университет,  
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Работа наносоуправляющих и гидроэкологических сооружений, выполненных по типу донного порога, уступа или полузапруды, зависит от кинематической структуры пространственного винтообразного потока, возникающего за такими сооружениями. В работе описана структура такого потока, проведен анализ влияния ряда факторов, влияющих, главным образом, на распределение давлений по оси винтообразного течения: продольного уклона гребня сооружения; отверстия в начале винтообразного течения, создающего возможность свободного поступления торцевого расхода воды; наличия преграды, устанавливаемой за порогом, уступом или перед ним, на подходе к нему на эффективность работы как наносоуправляющего или экологического сооружения и некоторые другие факторы. Установлена связь вышеприведенных факторов с изменениями кинематической структуры и закономерностями массообмена между транзитным потоком и условно замкнутой областью винтообразного течения. Сделаны выводы о роли каждого из них. Основной вывод по экспериментальной части работы состоит в том, что плановые размеры отрывной зоны, скорости поступательного движения потока в вальце, скорости крутки потока в нем, а также удельные расходы втекающего внутрь зоны и вытекающего из нее потоков согласованно изменяются по длине винтообразного течения. Сделан также вывод, что их следует использовать в зависимости от назначения проектируемых сооружений данного типа.

**Ключевые слова:** перенос наносов, перемешивание сточных вод, донные пороги, буны, полузапруды, кинематика винтообразных течений.

Поступила в редакцию: 06.02.2023. После доработки: 19.03.2024. Принята к печати: 22.03.2024

**Введение.** На основе математической модели расчёта стационарных пространственных течений вязкой несжимаемой жидкости, изложенной в работе [1], произведены расчёты пространственных винтообразных течений, возникающих за косо расположенными донными порогами и уступами. Такие расчёты очень актуальны, например, для обоснования эффективности и выбора параметров для сооружений, предложенных в изобретении [2], для расчёта гидроэкологических конструкций, предложенных в работе [3], и так далее.

Плоские отрывные течения за донными уступами изучались давно: смотри, например, монографии [4–8]. Структура циркуляционного течения представлена на рис. 1, а, где чётко видно возвратное течение в придонной области. Термин «квази-плоское течение»

выбран нами в связи с тем, что в эксперименте абсолютно плоского течения создать не удалось; и в том случае, когда угол  $\alpha$  составлял  $90^\circ$ , наблюдались наложенные вторичные течения внутри основного отрывного течения, которые усложняли структуру и приводили к отличию от идеально плоской задачи.

**Данные и методы.** В работе [9], идеально с точки зрения эксперимента, исследована структура потока за косорасположенными донными грядами рек, обтекаемыми спокойным русловым потоком с числом Фруда меньше единицы. Именно такой случай нас интересует, и дальше мы его опишем подробнее. Именно винтообразные стационарные течения, возникающие за такими элементами как донные гряды, пороги или уступы, обладают рядом ценных свойств, обуславливающих их широкое

применение. В частности, эти течения помимо высокой наносотранспортирующей способности обладают хорошими перемешивающими свойствами, быстро распространяют массу потока, движущегося в них, по всему объёму транзитного течения с высокими скоростями и уровнем турбулентности.

Целью работы является обоснование мероприятий, связанных с увеличением эффективности работы сооружений, в основе которых лежит использование винтообразных течений описываемой выше структуры.



**Рис. 1.** Схема квази-плоского движения потока за донным уступом, расположенным перпендикулярно оси набегающего потока (а); фотография зеркального гидравлического лотка, в котором было проведено систематическое исследование течений за нормально и косорасположенными донными уступами (б)

**Fig. 1.** Quasi-plane flow movement scheme behind a bottom ledge located perpendicular to the oncoming flow axis (a); photograph of a mirror hydraulic flume in which a systematic study of currents behind normal and oblique bottom ledges was carried out (b)

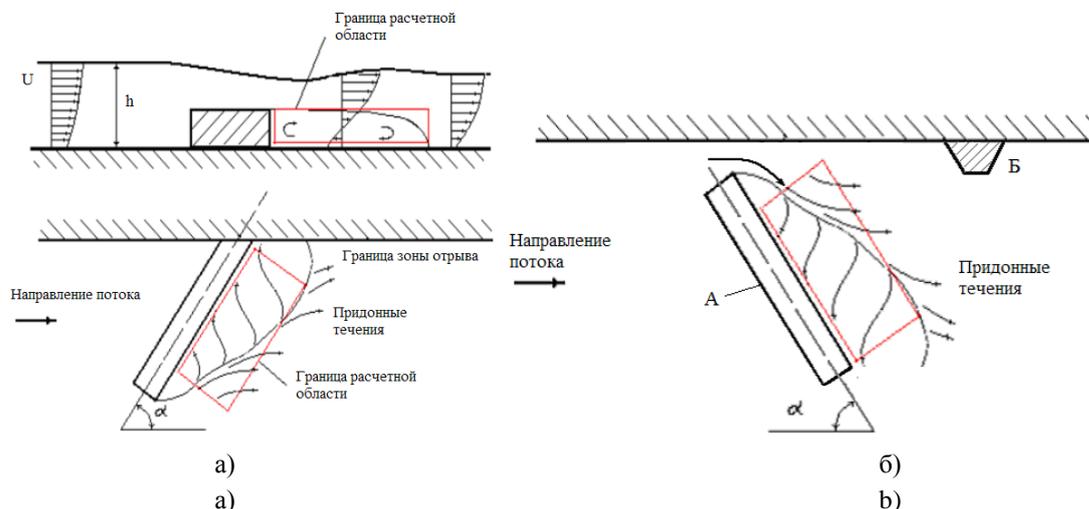
**Структура пространственного течения за косорасположенными донными уступами, порогами, бунами, полузапрудами.** При косом расположении линии уступа относительно оси транзитного потока возникает еще одно внутреннее (вторичное) течение, направленное вдоль уступа. При этом массы жидкости в вихревом вальце приобретает сложное спиралевидное движение. Косорасположенные донные уступы, как известно, вызывают циркуляцию во всей массе транзитного потока, что вызвано отклонением струи над гребнем уступа и вальцом в сторону нормали к его гребню. Скос поверхностных струй потока вызывает компенсирующее отклонение донных струй за уступом в противоположную сторону. Картина всех циркуляционных течений, вызыва-

емых уступом, представлена на схемах (рис. 2, 3). За зоной вихревого вальца начинается участок постепенного затухания циркуляции. На рис. 2–4 показана схема течения за донным уступом и донными порогами, расположенными как по течению, так и против него; показаны также траектории донных и поверхностных струй, граница зоны отрывного течения, – линия присоединения потока ко дну после его отрыва от гребня уступа или порога. На схемах, показанных на рис. 2–4, красным цветом обозначена расчётная область, внутри которой могут определяться характеристики кинематики потока (параметры осреднённого во времени течения и параметры турбулентности), а также внутреннее распределение давления. При этом могут быть определены также геометрические ха-

рактеристики области отрыва; заданным должен являться только общий перепад давлений на области, а также нулевое приближение распределения скоростей (начальные условия).

На схеме рис. 1, б показана полуза- пруда (донный порог), устраиваемая в

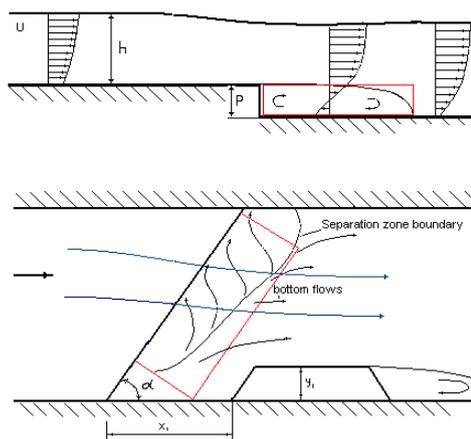
экологических целях, то есть для интен- сификации массообмена в потоке – во всей его массе, или перемешивания сточных вод, выпускаемых с низовой стороны буны, в начале вихревого валь- ца, с транзитным потоком.



**Рис. 2.** Схема течения за донным порогом, расположенным навстречу потоку (сверху разрез, снизу – план) (а) и по потоку (б); Показаны границы расчетной области (линия присоединения потока ко дну) и траектории донных струй.

На схеме б): А донный порог, Б – боковое препятствие потоку, искусственно усиливающее модули градиента давления на вихревой области (вальце)

**Fig. 2.** Flow diagram behind a bottom threshold located opposite the flow (section above, plan below) (a) and along the flow (b). The computational domain boundaries (the line where the flow joins the bottom) and the bottom jets trajectories are shown. In diagram b): A is the bottom threshold, B is a lateral obstacle to the flow, artificially enhancing the modules of the pressure gradient in the vortex region (roller)



**Рис. 3.** Схема течения за донным уступом и границы расчетной области (сверху разрез, снизу – план). Также показано боковое препятствие потоку, усиливающее отрицательный градиент давления

**Fig. 3.** Scheme of the flow behind the bottom ledge and the boundaries of the computational domain (above, section, below, plan). A lateral obstruction to flow is also shown, enhancing the negative pressure gradient

В начальной зоне вальца всегда наблюдаются относительно большие скорости поступательного движения потока и значительные скорости крутки, а также малые поперечные размеры области отрывного течения при значительных расходах втекания масс воды в валец. В средней зоне – уменьшение скоростей поступательного и вращательного движений и увеличение сечения вальца при резком уменьшении расходов, втекающих и вытекающих масс. В концевой зоне – еще большее уменьшение скоростей поступательного и вращательного движений, уменьшение сечения вальца при резком возрастании расходов вытекающих масс.

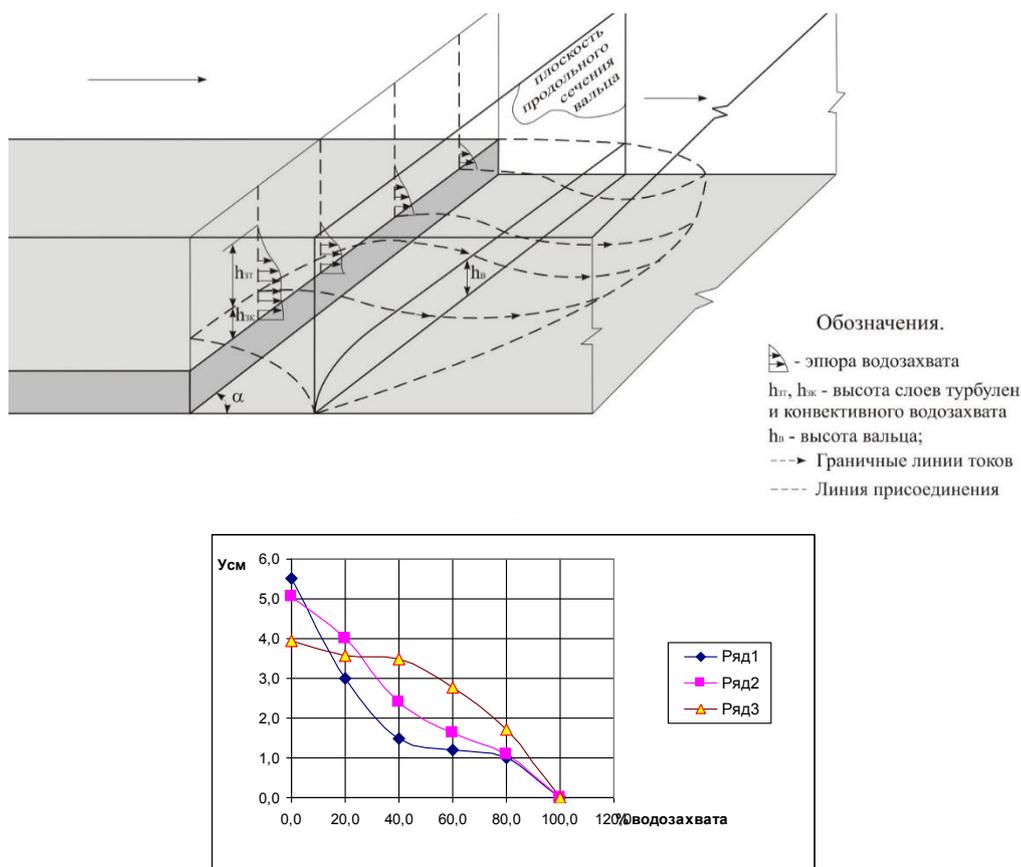
Ещё одна важная особенность пространственных отрывных течений данного типа связана с наличием массообмена между отрывной областью и транзитным потоком. Это явление в эксперименте изучалось путём пуска частиц индикаторов, имеющих удельный вес, равный удельному весу воды, и наблюдением за процентом попадания этих частиц во внутреннюю часть области отрыва. На рис. 4 показана пространственная конфигурация вихревого вальца и характер его водообмена с транзитным потоком. Поток, обтекающий косо-расположенный уступ или порог, попадает в область винтообразного течения сложным образом: во-первых, наблюдается втекание транзитного потока через боковое отверстие (если таковое имеется отверстие между боковой стенкой и ближайший к ней кромкой порога); во-вторых, наблюдается конвективный массообмен, то есть сосредоточенное втекание транзитного потока в начальную часть области вихревого вальца. Этому расходу соответствует та часть эпюра втекания потока, где процент водозахвата равняется 100. И в-третьих, присутствует турбулентный массообмен, или водообмен, связанный с обменом вихревыми молями, постоянно пересекающими жидкую границу, раздела между двумя подобластями потока. Эта компонента водообмена резко уменьшается с увеличением координаты точки, из ко-

торой производится выпуск частиц индикаторов.

Пуск индикаторов производился по методике Е.К. Трубиной [10, 11], которой получены интересные результаты по сопротивлению потоков при его резком расширении [11]. Оказалось, что численное значение коэффициента сопротивления, найденного по известной формуле Борда, равняется относительному расходу массообмена между замкнутой областью отрывного течения, в которую проникают отдельные индикаторы, и областью транзитного потока. В работах ряда исследователей [12, 13] построены схемы расчёта русло-регулирующих или водосмесительных полузапруд и подобных ему сооружений, основанных на концепции массообмена. В начальной зоне вальца поток интенсивно втекает внутрь вихревой области. Здесь, над гребнем уступа, и несколько ниже него, вертикальные составляющие скоростей направлены вниз; ширина вальца в его начале устанавливается наименьшей. В средней части длины вальца всегда происходит уменьшение поступательных скоростей, сопровождающееся, как правило, его расширением. Наиболее резко валец расширяется в зоне интенсивного поступления в него масс воды, т. е. в его начальной зоне.

В концевой части вальца происходит сосредоточенный выход масс воды в транзитный поток. При малых значениях  $\delta$  их выход происходит более сосредоточенно, при этом поперечные размеры вальца несколько уменьшаются. Ширина вальца, определяемая в центральном направлении по его длине сечения, зависит от угла  $\alpha$  и относительной высоты уступа.

Итак, основной вывод по экспериментальной части работы состоит в том, что плановые размеры отрывной зоны, скорости поступательного движения потока в вальце, скорости крутки потока в нем, а также удельные расходы втекающего внутрь зоны и вытекающего из нее потоков *согласованно* изменяются по длине винтообразного течения.



**Рис. 4.** Схема течения за донным уступом, границы отрывной области и схема водообмена. Показаны эпюры водозахвата при выпуске индикаторов водозахвата с гребня уступа.

Эпюры процента водозахвата в вихревой валец, построенные в зоне начала вальца при  $y/B = 0,15$ , угол установки уступа  $\alpha = 45^\circ$ , относительная высота уступа  $\delta = 0,33$ ;  $y$  – поперечная координата

**Fig. 4.** Flow pattern behind the bottom ledge, the separation region boundaries, and water exchange pattern. Diagrams show the water capture when releasing water capture indicators from the crest of the ledge. The percentage of water capture diagrams in a vortex roller, plotted in the roller beginning zone at  $y/B = 0,15$ , ledge installation angle  $\alpha = 45^\circ$ , ledge relative height  $\delta = 0,33$ ;  $y$  is transverse coordinate

Если обозначить скорость набегающего потока через  $U$ , угол между осью транзитного потока и гребнем уступа или донного порога через  $\alpha$ , полную глубину потока через  $H$ , высоту слоя воды над гребнем уступа или полузапруды через  $h$ , то можно сказать, что все изменения кинематической структуры потока за донным уступом связаны в наибольшей степени с такими параметрами, как относительная высота уступа  $\delta = \frac{p}{(h+p)}$ , относительная ширина боковой преграды, устанавливаемой за уступом на расстоянии 3-4 его высот;

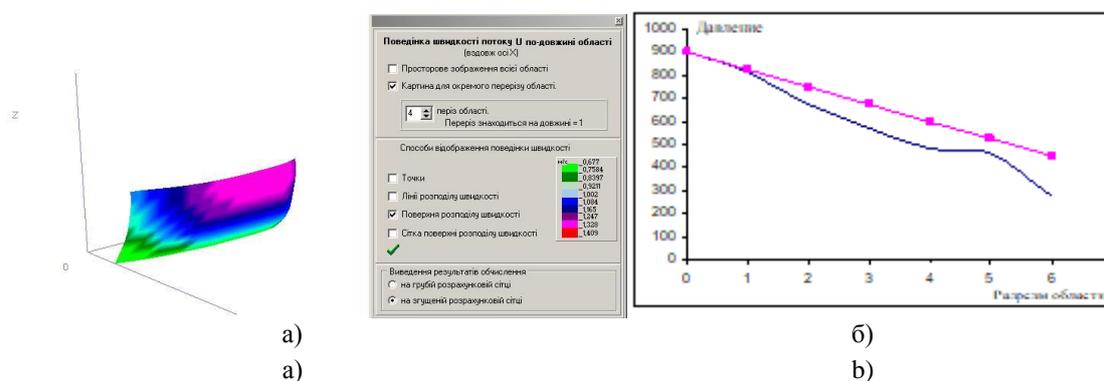
относительной шириной отверстия ( $a$ ) при входе потока в область отрывного течения за донным порогом, в начальной зоне вальца  $a/p$ . Другими факторами, определяющими геометрию вихревого вальца, является кинетичность потока, характеризуемая числом Фруда ( $Fr = U^2/gH$ ), углом  $\alpha$ , и некоторыми другими конструктивными параметрами рассматриваемых объектов.

**Теоретическая часть работы** основана на алгоритме, описанном, например, в статье [1]. Производилось решение задачи движения вязкой несжимае-

мой жидкости в области формы параллелепипеда. Основу алгоритма составляет ряд блоков, включающих расчёт осреднённых скоростей и давлений во всей области расчёта на грубой сетке, неявным методом, с помощью решения систем линейных алгебраических уравнений. То есть для приведенных уравнений гидродинамики на первом этапе применяется метод генерализации; на втором этапе проводится сгущение сеток с помощью построения пространственных сплайнов; на третьем этапе осуществля-

ется пересчёт данных по осреднённым скоростям и характеристикам турбулентности явным методом Мак Кормака с применением предикторно-корректорной схемы. Расчёт проводится до момента установления и соблюдения заданной точности и представлен на рис. 5, 6.

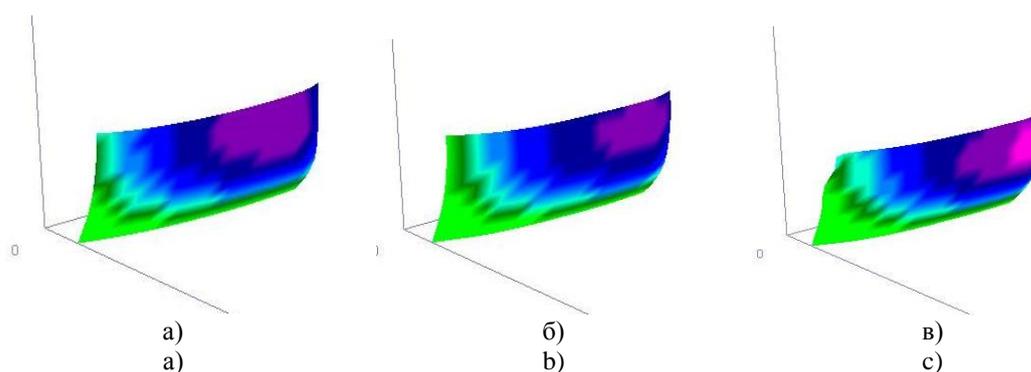
В табл. 1 приведены значения подсчитанных в работе [14] средних по сечениям вальца скоростей соответственно относительным ширинам вальца, взятым из нашего эксперимента.



**Рис. 5.** Распределение скоростей  $U$  в четвертом сечении области ( $i=4$ ) при заданном поле давлений, и усиленном поле давлений боковой преградой (а). Схема подбора давлений в сечениях вальца из условий соблюдения неразрывности:

красная линия – первоначально заданное давление; синяя – уточнённое (б)

**Fig. 5.** Distribution of velocities  $U$  in the fourth section of the region ( $i=4$ ) for a given pressure field, and an enhanced pressure field by a side barrier (а). Scheme for selecting pressures in roller sections based on the conditions of maintaining continuity: red line - initially set pressure; blue - updated (b)



**Рис. 6.** Распределение скоростей  $U$  в восьмом (а), десятом (б), одиннадцатом (в) сечениях области ( $i = 8, i = 10, i = 11$ ) при заданном поле давлений и условиях, аналогичных условиям предыдущего рисунка, но без преграды;  $i$  – номер расчётного сечения от начала вальца

**Fig. 6.** Distribution of velocities  $U$  in the eighth (а), tenth (б), eleventh (с) sections of the region ( $i = 8, i = 10, i = 11$ ) for a given pressure field and with similar conditions as on fig. 5, but without an obstacle;  $i$  – number of the calculated section from the beginning of the roller

**Методы интенсификации течений в вихревом вальце.** Рассмотрим следующие методы активизации течения за донным уступом и за донными порогами в вихревом вальце, которые следуют из теоретических соображений о возможности увеличения продольного отрицательного градиента давления вдоль оси вихревого течения.

1) Придание продольного уклона гребню сооружения (от начала вальца в сторону к транзитному потоку, как на схеме рис. 2, а, б).

Создание именно такого уклона гребня, по рекомендации авторов работы [15], донного порога или полузапруды способствует смещению динамической оси потока, обтекающего донный порог сверху, в сторону ближе к концу вальца и увеличению скоростей в нём, именно ближе к его концу. Это способствует увеличению поступательных скоростей во всём вальце за счёт дополнительной эжекции потока внутри вальца.

2) Создание отверстия в начале винтообразного течения, создающего возможность свободного поступления торцевого расхода воды (рис. 2, б).

Уменьшение гидравлического сопротивления при втекании потока в начальную зону вальца использовано нами в изобретении [2] и существенно (на 15–20%) увеличивает скорость в начальной зоне вальца и по всей его длине.

3) Наличие преграды, устанавливаемой за порогом, уступом (или перед ним, на подходе к нему) на эффектив-

ность работы как наносоуправляющего или экологического сооружения.

Перед преградой повышение уровня воды и давления в потоке связано с натеканием транзитного потока, а именно струй, проходящих у стенки, на преграду и их торможением, и переходом кинетической энергии потока в потенциальную таким образом, что повышение давления в этой зоне ожидается порядка величины скоростного напора потока; аналогичный эффект описан в работе [16].

4) Использование эффекта эжекции движущегося в вальце потока транзитной струей, обтекающей данное сооружение в плане с низовой его стороны.

В случае, показанном на рис. 2, б, струя, вытекающая непосредственно из зоны вихревого вальца, дальше отходит от выходного его сечения, перемешивая выходящий из вальца поток с большим количеством воды транзитного потока.

5) Изменение высоты порога уступа в случае изменения уклона дна за ним при горизонтальном гребне сооружения.

Известно предложение И.И. Кириенко и В.В. Вечера в случае удаления наносов из потоков в канале (по схеме, близкой той, что показана на рис. 3) состоящее в том, что уступ рекомендуется делать переменной высоты: в начале малой высоты, а в конце – приблизительно в два раза большей (при горизонтальном его гребне); то есть дно при этом за уступом имеет небольшой уклон дна в сторону, ближе к концу вальца.

**Таблица 1.** Значения относительных скоростей в вихревом вальце и относительных его ширин для случая отсутствия искусственной интенсификации течения в нём

№	Относительные ширины вальца				Относительные скорости поступательного движения $u/U_0$			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
1	2,4	3,7	4,0	4,2	0,86	0,68	0,67	0,48
2	3,0	3,5	4,6	4,8	0,63	0,55	0,49	0,39
3	2,9	4,8	4,6	5,0	0,31	0,26	0,25	0,18

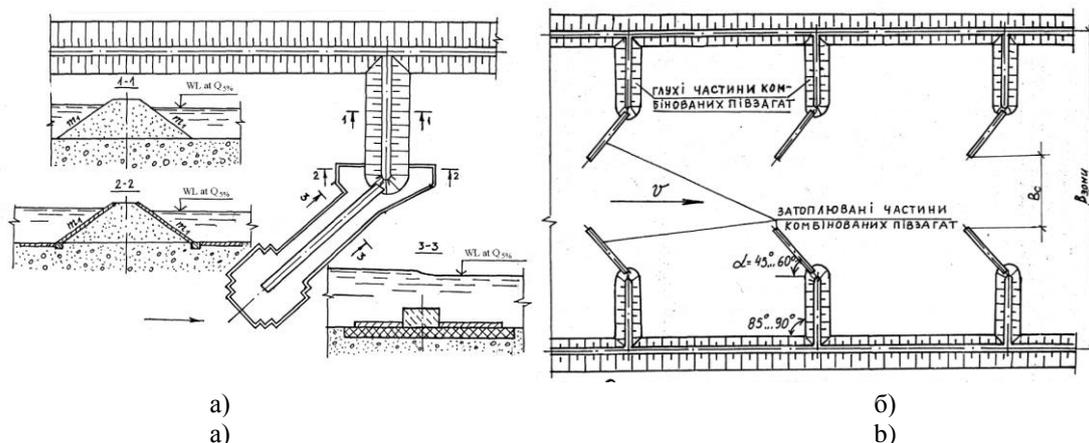
Примечание: сечения I – IV равномерно распределены по длине вихревой зоны.

Боковую преграду эти авторы рекомендовали устраивать не за уступом, а на небольшом расстоянии перед ним. Такая преграда отклоняет наносы, в особенности придонные, переносимые транзитным потоком, ближе к концу вальца, и там они легче захватываются в валец и проще транспортируются через промывное отверстие в боковой стенке.

**Другие практические аспекты увеличения эффективности донных**

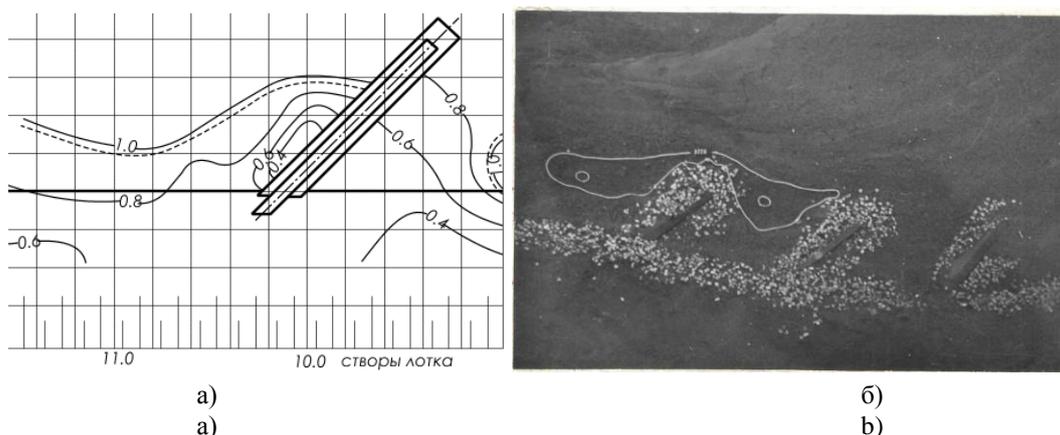
**порогов и других аналогичных сооружений.**

- Ориентация низких затопляемых полузапруд под более острыми углами навстречу потоку способствует более интенсивному занесению межполузапрудных пространств наносами, закреплению дамб и созданию устойчивого русла (рис. 7), а также уменьшению размывов у берега (рис. 8).



**Рис. 7.** Конструкция комбинированных полузапруд, состоящих из глухой части трапецидального сечения и низкой затопляемой части, расположенной под углом 35°–45° навстречу потоку (а); создание искусственного устойчивого русла между дамбами и дополнительно суженному полузапрудками (б)

**Fig. 7.** The design of combined semi-dams, consisting of a trapezoidal section blind part and a low flooded part, located at an angle of 35–45 degrees towards the flow (a); creation of an artificial stable channel between dams and additionally narrowed by semi-dams (b)

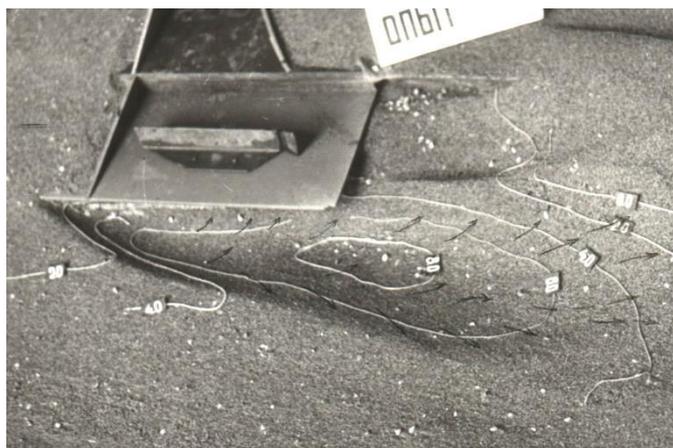


**Рис. 8.** Изолинии придонных максимальных актуальных скоростей однопроцентной обеспеченности, ответственных за размыв грунта, вблизи низкой затопляемой полузапруды, косорасположенной относительно потока (а)

Размыв дна у системы из пяти полузапруд с каменными креплениями дна (б)

**Fig. 8.** Isolines of near-bottom maximum actual velocities of one percent probability, responsible for soil erosion, near a low flooded semi-dam, obliquely located relative to the flow (a).

The bottom erosion of a five semi-dams' system with stone bottom supports (b)



**Рис. 9.** Схема сооружения, дающего минимальные размывы. Стрелками показаны траектории донных струй. Яма размыва характерна для деятельности винтообразного течения в ней [3]  
**Fig. 9.** Scheme of a structure that produces minimal erosion. Arrows show the trajectories of bottom jets. The erosion pit is characterized by the activity of a helical flow in it [3]

- Закрепление дна возле полузапруд, если оно может быть размывто потоком.
- Создание специальных устройств водовыпусков в каналы, реки или водохранилища, дающие минимальные размывы дна и берегов, способствующие устойчивости течения и сохранению экологического равновесия (рис. 9).

**Заключение.** Рассматриваемые и разработанные в работе приёмы увеличения эффективности сооружений за счёт ускорения потока в вихревой области за уступами имеют большое значение, так как существенно увеличивают эффективность предлагаемых конструкций как противоразмывного, так и экологического назначения.

В работе отмечается такое свойство лентообразных течений как согласованность изменения их геометрических параметров, скоростей поступательного движения, вращательных скоростей и параметров массообмена. Следует отметить, что наличие такой согласованности означает, что существуют некоторые инвариантные соотношения, обусловленные, с одной стороны, симметрией и простотой рассматриваемых природных явлений, а, с другой стороны, – соответствующими свойствами математических объектов – моделей этих систем, которые описывают их существенные свойства.

К задачам дальнейших исследований, помимо разработки новых конструкций и усовершенствования принципов проектирования экологических и наносуправляющих сооружений, следует отнести разработку ряда математических вопросов, касающихся их. Во-первых, это поиск наиболее простых и эффективных математических моделей, адекватно описывающих рассматриваемые системы. Во-вторых, их дальнейшее исследование и усовершенствование, описание и объяснение их симметрических и групповых свойств.

*Работа выполнена в рамках госзадания ИПТС «Фундаментальные и прикладные исследования закономерностей и механизмов формирования региональных изменений природной среды и климата под влиянием глобальных процессов в системе океан-атмосфера» (№ госрегистрации 124013000609-2).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щодро А.Е. Разработка методов расчета местных размывов несвязного грунта в зоне влияния речных и морских сооружений с учетом динамики водного потока и транспорта наносов // Экологическая безопасность прибрежн. и шельф. зон моря. 2018. Вып. 2. С. 74–87.

<https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-2-74-87>.

2. Щодро А.Е. Способ интенсификации водообмена в акватории и управления движением наносов и устройство для его осуществления. Патент № 2711810, МПК Е 02 В 15/00, Е 02 В 8/02, Заявка: 2018134728, 01.10.2018, Гос. регистрация 22.01.2020.

3. Щодро А.Е., Шоларь С.А. Современные гидроэкологические сооружения для активизации массообмена в потоке // Системы контроля окружающей среды. 2022. № 2. С. 51–60. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2022-2-51-60>.

4. Лятхер В.М. Турбулентность в гидросооружениях / В.М. Лятхер. М: Энергия, 1968. 408 с.

5. Михалев М.А. Гидравлический расчет потоков с водоворотом. М.: Энергия, 1971. 184 с.

6. Фидман Б.А. Турбулентность водных потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 237 с.

7. Чжен П. Отрывные течения. Т. 3 М.: Мир, 1973. 334 с.

8. Таунсенд А.А. Структура турбулентного потока с поперечным сдвигом. М.: Изд-во Иностранной литературы, 1959. 399 с.

9. Ярных Н.А. Структура потока над двумерными грядами // Труды гос. гидрологического ин-та. Л.: Гидрометеиздат, 1968. С. 195–205.

10. Трубина Е.К. Водообмен между транзитным потоком и водоворотом при плановом расширении спокойных установившихся безнапорных потоков однородной жидкости // Известия ВНИИГ. 1960. Т. 65. С. 91–106.

11. Кириенко И.И. и др. Водообмен в отрывных течениях за донными уступами гидротехнических сооружений. 1981. Вып. 32. С. 8–13.

12. Кириенко И.И. и др. Проектирование низких затопливаемых полузапруд // Гидромелиорация и гидротехническое строительство. Львов: Вища школа, 1981. Вып. 9. С. 59–64.

13. Мокляк М.М. Применение затопляемых водосмесительных полузапруд для интенсификации массообмена в потоке с целью улучшения экологического состояния малых рек // Вестник НУВХП: сборник науч. трудов. 2006. Вып. 4 (36). Ч. 1. Ровно, НУВХП. С. 143–148.

14. Ходневич Я.В. Математичне моделювання просторових течій з врахуванням інтегральної умови нерозривності // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво: зб. наукових праць. Рівне: НУВГП, 2007. В. 31. С. 287–292.

15. Арыкова А.И., Жулаев Р.Ж. Улучшенный тип водозабора с донной решетчатой галереей. Алма-Ата: Изд-во Акад. наук КазССР, 1961. 81 с.

16. Данелия Н.Ф. Водозаборные сооружения на реках с обильными донными наносами. М.: Колос, 1964. 336 с.

## THE HELICAL FLOW BEHIND THE BOTTOM THRESHOLD KINEMATIC STRUCTURE ANALYSIS FOR THE PURPOSE OF CONTROLLING ITS MASS TRANSFER CHARACTERISTICS AND SEDIMENT TRANSPORT

A. E. Shchodro<sup>1</sup>, S.M. Sidorov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

<sup>2</sup>Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

The operation of sediment control and hydroecological structures made as a bottom threshold, ledge or half-dam depends on the kinematic structure of the spatial helical flow that arises behind such structures. The paper describes the structure of such a flow and analyzes the influence of a number of factors affecting mainly the distribution of pressure along the axis of a helical flow: – longitudinal slope of the crest of the structure; – holes at the beginning of the helical flow, creating the possibility of free flow of water edge flow; – the presence of a barrier installed behind the threshold, ledge or in front of it, on the approach to it, on the effectiveness of work as a sediment control or environmental structure and some other

factors. Relationship between the above factors and changes in the kinematic structure and patterns of mass transfer between the transit flow and the conditionally closed region of the helical flow is established. Conclusions are drawn about the role of each of them. The main conclusion from the experimental part of the work is that the planned dimensions of the separation zone, the speed of translational movement of the flow in the roller, the speed of twist of the flow in it, as well as the specific flow rates of the flows flowing into the zone and flowing out of it change consistently along the length of the helical flow. It is also concluded that they should be used depending on the purpose of the designed structures of this type.

**Keywords:** sediment transport, wastewater mixing, bottom thresholds, buoys, half-dams, kinematics of helical flows.

### REFERENCES

1. *Shhodro A.E.* Razrabotka metodov rascheta mestnyh razmyvov nesvjaznogo grunta v zone vlijanija rechnyh i morskikh sooruzhenij s uchetom dinamiki vodnogo potoka i transporta nanosov (Preparation of methods for assimilation of local undercutting of cohesionless soil under the influence of river and marine constructions in consideration of water flow and sediment transport). *Jekol. bezop. pribrezhn. ishel'f. zonmorja*, 2018, Issue 2, pp. 74–87. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-2-74-87>.
2. *Shhodro A.E.* Sposob intensivizacii vodoobmena v akvatorii i upravlenija dvizheniem nanosov i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija. Patent № 2711810, MPK E 02 B 15/00, E 02 B 8/02, Zajavka: 2018134728, 01.10.2018, Gos. registracija 22.01.2020 g.
3. *Shhodro A.E. and Sholar' S.A.* Sovremennye gidroekologicheskie sooruzhenija dlja aktivizacii massoobmena v potoke (Modern hydroecological facilities for activation of mass transfer in aquatic environment). *Sistemy kontrolja okruzhajushhej sredy*, 2022, No. 2, pp. 51–60. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2022-2-51-60>.
4. *Ljather V.M.* Turbulentnost' v gidrosooruzhenijah (Turbulence in hydraulic structures), Moscow: Jenergija, 1968. 408 p.
5. *Mihalev M.A.* Gidravlicheskij raschet potokov s vodovorotom (Hydraulic calculation of flows with a whirlpool), Moscow: Jenergija, 1971, 184 p.
6. *Fidman B.A.* Turbulentnost' vodnyh potokov (Turbulence of water flows), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991, 237 p.
7. *Chzhen P.* Otryvnye techenija (Detached flow), Vol. 3, Moscow: Mir, 1973, 334 p.
8. *Taunsend A.A.* Struktura turbulentnogo potoka s poperechnym sdvigom (Structure of turbulent flow with transverse shear), Moscow: Izd-vo Inostrannoju literatury, 1959, 399 p.
9. *Jarnyh N.A.* Struktura potoka nad dvumernymi grjadami (Flow structure over two-dimensional bedforms). *Trudy gos. gidrologicheskogo in-ta*, 1968, pp.195-205.
10. *Trubina E.K.* Vodoobmen mezhdju tranzitnym potokom i vodovorotom pri planovom rasshirenii spokojnyh ustanovivshijsja beznapornyh potokov odnorodnoj zhidkosti (Water exchange between a transit flow and a whirlpool during the planned expansion of calm, steady-state free-flow flows of a homogeneous liquid). *Izvestija VNIIG*, 1960, Vol. 65, pp. 91–106.
11. *Kirienko I.I. i dr.* Vodoobmen v otryvnyh techenijah za donnymi ustupami gidrotekhnicheskijh sooruzhenij (Water exchange in separated flows behind bottom benches of hydraulic structures). 1981, No. 32, pp. 8–13.
12. *Kirienko I.I. i dr.* Proektirovanie nizkijh zataplivaemyh poluzaprud (Design of low floodable semi-dams). *Gidromelioracija i gidro-tekhnicheskoe stroitel'stvo*, L'vov: Vishcha shkola, 1981, No. 9, pp. 59–64.
13. *Mokljak M.M.* Primenenie zatopljaemyh vodosmesitel'nyh poluzaprud dlja intensivizacii massoobmena v potoke s cel'ju uluchshenija jekologicheskogo sostojanija malyh rek (The use of floodable water-mixing semi-dams to intensify mass transfer in the flow in order to improve the ecological condition of small rivers). *Vestnik NUVHP*, 2006, Vol. 4, No. 36, pp. 143–148.
14. *Hodnevič Ja.V.* Matematichne modeljuvanija prostorovih techij z vrahuvannjam integral'noj umovi nerozrivnosti (Mathematical modeling of spatial flows with the regulation of integral mind integrity) / *Gidromelioracija ta gidrotekhnichne budivnictvo*, 2007. Vol. 31, pp. 287–292.
15. *Arykova A.I. and Zhulaev R. Zh.* Uluchshennyj tip vodozabora s donnoj reshetchatoj galereej (Improved type of water intake with a bottom lattice gallery), Alma-Ata: Izd-vo Akad. nauk KazSSR, 1961, 81 p.
16. *Danelija N.F.* Vodozabornye sooruzhenija na rekah s obil'nymi donnymi nanosami (Water intake structures on rivers with abundant bottom sediments), Moscow: Kolos, 1964, 336 p.