



ТУРБУЛЕНТНЫЙ И АДВЕКТИВНЫЙ МАССООБМЕН НА ГРАНИЦЕ ОТРЫВНОЙ ВИХРЕВОЙ ЗОНЫ ЗА ДОННЫМИ ПОРОГАМИ И УСТУПАМИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

А.Е. Щодро¹, С.М. Сидоров², Ю.Е. Шишкин¹

¹Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

E-mail: ashodro@ya.ru

²Севастопольский государственный университет,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

В работе рассматриваются вопросы массообмена и динамики потока в области отрывного течения за косорасположенной относительно потока донной пластиной или за донным уступом. Именно винтообразные течения, возникающие за острыми кромками и гребнями специальных пластин и сооружений, благодаря массообмену в потоке, позволяют захватить из транзитного потока большое количество твёрдого и взвешенного вещества и обеспечить транспорт наносов в желаемом направлении. В дополнение к рассмотренным ранее вопросам формирования винтообразных течений за такими пластинами, обтекаемыми спокойным водным потоком, более подробно рассматриваются вопросы массообмена между транзитным потоком и обособленной областью замкнутого винтообразного течения за пластиной. Рассмотрены два основных вида составляющих массообмена между транзитным потоком и замкнутой областью отрывного течения – турбулентный и адвективный типы водообмена. Рассматриваются также вопросы обмена взвешенными наносами; предложена математическая модель формирования стационарного течения внутри области, вдоль его оси, расходы этого течения определяются как из динамических условий движения потока, так и как разность между интегральными характеристиками водозахвата внутрь области винтообразного течения и его выброса из него. Найдены условия для наиболее оптимального формирования структуры винтообразного течения, когда адвективные составляющие обмена существенно превышают турбулентные; компоненты скорости потока имеют наибольшее значение и обеспечивают все возложенные на них функции по транспорту наносов и самопромыву области винтообразного течения.

Ключевые слова: донные пороги, винтообразные течения, отрыв потока, массообмен, турбулентный и адвективный водообмен, свободная турбулентность.

Поступила в редакцию: 08.05.2024. После доработки: 14.06.2024. Принята к печати: 27.06.2024.

Введение. Данная статья, являясь продолжением работы [1], раскрывает суть происходящих на жидкой границе раздела между водоворотной областью и транзитным потоком явлений массообмена. Под массообменом понимаем обмен массой как воды (водообмен), так и наносов, – твёрдых частиц, переносимых потоком.

На рис. 1 представлена пространственная область винтообразного течения за донным уступом (или порогом). Причем для упрощения показана область винтообразного течения за донным уступом (не за донным порогом или пластиной, где характер винтообразного течения будет аналогичным). Следует отметить, что все основные особенности

этой области изучались нами именно для течения за донным уступом [1].

Основным элементом геометрического описания отрывной области является линия присоединения потока ко дну. Если линией отрыва потока условно считается гребень уступа, то линию присоединения приходится определить как линию, в каждой точке которой вектор придонной скорости осреднённого во времени потока направлен параллельно гребню уступа. Эта линия проведена пунктиром (рис. 1) на дне потока за уступом (то есть ниже гребня уступа по течению потока). В эту линию плавно «входят» осреднённые линии тока, сходящие с гребня уступа. Ближе к концу вихревого вальца они сходят именно с

гребня уступа, а ближе к началу вихревой зоны они сходят с высоты слоя сто-процентного адвективного захвата, как показано на схеме рис. 1 – пунктиром на

вертикальной плоскости, проходящей через гребень уступа. Именно эти линии представляют собой наглядное изображение верхней границы вихревой зоны.

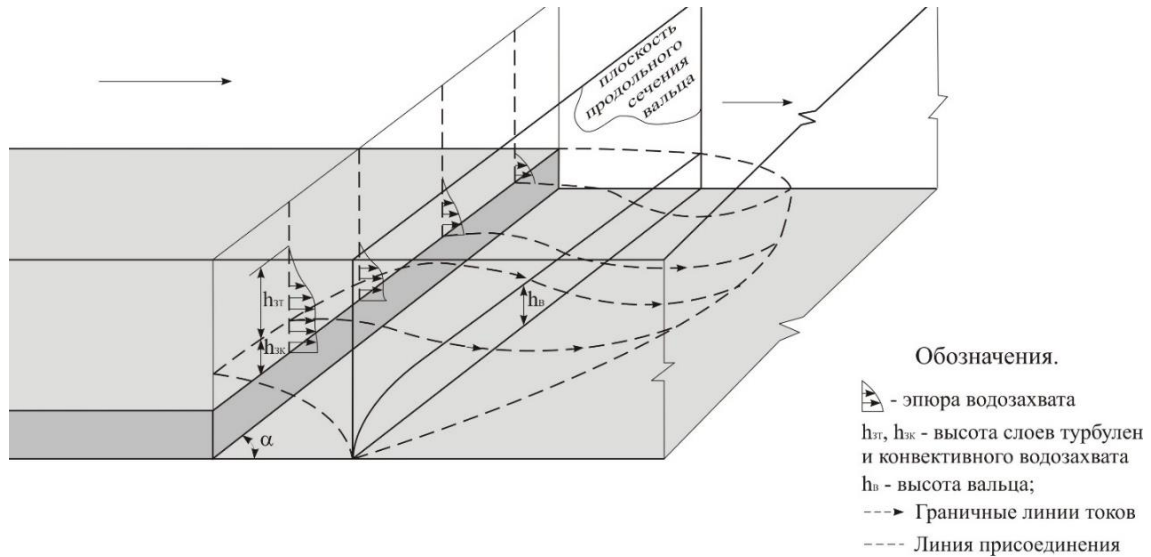


Рис. 1. Геометрические характеристики отрывной зоны за косорасположенным донным уступом. Общее направление течения слева направо; поступательное движение за уступом – от читателя вглубь рисунка; направление движения струй в вихревой зоне по часовой стрелке

Fig. 1. Separation zone geometric characteristics behind an oblique bottom ledge. The flow general direction is from left to right; forward movement behind the ledge - from the reader deeper into the drawing; the direction of movement of the jets in the vortex zone is clockwise

Описываемая граница имеет несколько условное значение. К сожалению, на данный момент нет возможности точнее ее описать, но мы будем подразумевать именно её в качестве ограничивающей поверхности зоны отрывного пространственного течения.

Если течение выше гребня представляет собой обычный турбулентный поток с не очень высоким уровнем турбулентности, то течение за донным уступом обычно представляет собой развитое турбулентное течение с интенсивным турбулентным водообменом вблизи границы раздела. Свойства течений в этой зоне поистине замечательные, – это высокая наносотранспортирующая способность; способность улавливать взвешенные наносы из транзитного потока и концентрировать их вблизи оси винтообразного течения; это в целом незначительные крутки потока в разных сечениях вальца, но, в то же время, наличие сосредоточенных винтов (стационарных

и периодически возникающих, интенсивно взмучивающих придонные или взвешенные частицы и не дающие им оседать за уступом. То есть наносы, поступающие с гребня, хорошо переносятся вдоль винтообразного потока.

На рис. 2а изображено геометрическое очертание зоны отрывного течения в плане, а на рис. 2б – показаны схемы движения придонных струй как внутри области отрыва, так и вне её, соответствующие направлениям переноса частиц вдоль этих линий.

Интенсификация течений в этой зоне осуществляется путём увеличения перепадов давления во внешнем потоке между зоной начала и зоной конца вихревого вальца. Например, для этой цели устраиваются преграды со стороны начала вальца, которые существенно увеличивают скорости поступательного движения и вращения в нём. Такие способы описаны, в частности, в изобретении [2]. В работе [1] описаны некоторые другие

свойства течений в этих зонах, как за донным уступом, так и за пластинами. Описаны устройства, которые активизируют течения в отрывной области – это

преграда, устанавливаемая за пластинами, донное отверстие на входе в пространство за пластиной и некоторые другие.

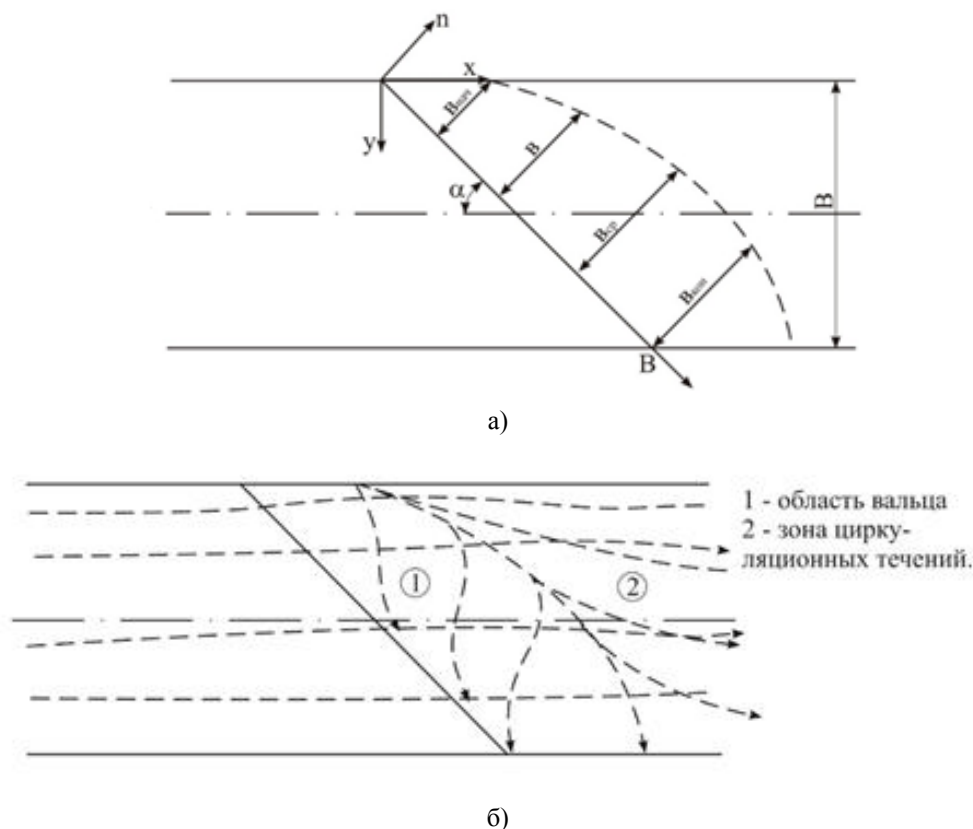


Рис. 2. Плановое очертание вихревого вальца (а) и схема движения придонных струй за уступом (б)

Fig. 2. Planned outline of the vortex roller (a) and movement diagram of bottom jets behind the ledge (b)

Экологические аспекты данной работы. В рассматриваемых отрывных зонах проявляются такие свойства течений как интенсивное перемешивание на границе раздела, повышенное содержание кислорода в вихревой зоне, повышенная наносотранспортирующая способность винтообразного течения и способность концентрации твёрдых частиц в винтообразном потоке. Именно эти свойства, особенно первые два, лежат в основе использования соответствующих сооружений, в которых они наблюдаются, в качестве экологических.

Целью данной работы является описание изменений скоростей поступательного движения в вальце в терминах закономерностей водообмена, то есть поступления масс воды в область вальца и их выхода из него, и соответствующих

расходов, – втекающего и вытекающего, относительно каждого рассматриваемого сечения вальца. Также целью работы является оценка эффективности наносоуправляющего или экологического сооружения.

Данные и методы. Подробные расчёты распределения осреднённых скоростей в области вальца, параметров турбулентности (энергии турбулентности и скорости её диссипации) могут быть проведены с помощью специальной программы, разработанной на основе численного решения системы уравнений Рейнольдса. Причём расчёты основаны на первоначальном введении нулевого приближения распределения скоростей, которое берётся на основе экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях путём измерения ско-

ростей с помощью однокомпонентного тензометрического датчика, микровертушек и трубок Пито.

Водообмен в экспериментах изучался статистически, с помощью пуска жидких частиц – индикаторов с гребня уступа из специальной трубки с отогнутым и ориентированным вдоль линий тока концом. Пусковая трубка устанавливалась на различных высотах относительно дна. Индикаторы, с помощью которых производилось изучение явления водозахвата а также и водовыброса на границе вальца, представляли собою жидкие частицы с плотностью, равной плотности воды. Массообмен по твёрдым частицам изучался с помощью визуального наблюдения за состоянием частиц – заменителей наносов, которые имели плотность примерно 1020 кг/куб.м.

Причем для точного количественного описания движения частиц твёрдой фазы (в допущении незначительных их концентраций) используются правила моделирования по критерию подвижности донных частиц (w/U_0), которые представляют собою отношения их гидравлической крупности (w) к базовой скорости потока, то есть скорости набегания потока на уступ (U_0).

Наблюдения за жидкими и твёрдыми частицами производились визуально, при этом фиксировалось их попадание внутрь области или выход из неё, а также время нахождения внутри области за донным уступом.

Роль двух видов водообмена и массообмен по твердой компоненте расхода. На границе раздела между вихревым вальцом и транзитным потоком осуществляется переход молей воды, то есть некоторых количеств через границу раздела и, ежели переход в одну сторону компенсируется переходом в противоположном направлении, то такой вид водообмена считается *турбулентным*. В начальной зоне вальца происходит сосредоточенное втекание определённой массы воды внутрь вальцевой зоны (*адвективный* водозахват). Это видно из эпюр процента захвата частиц индикаторов внутрь вальца. На рис. 1 видно, что с гребня осуществляется стопроцентный

захват из слоя толщиной h_{3a} соответствующего полному водозахвату. Выше этого слоя располагается другой слой, в котором процент захвата плавно уменьшается по направлению к верхней границе этого слоя от 100% до нуля, – это слой турбулентного захвата высотой h_{3m} .

Очевидно, что по условию баланса расходов поступательного движения потока внутри вальца, как по жидкому, так и по твёрдому расходом, расход (жидкой либо твёрдой фазы) равняется разнице между расходом, поступившим до некоторого рассматриваемого сечения вальца и расходом, вышедшим из него от его начала до того же сечения. Это условие далее записано в виде формулы (1), записанной для жидкой компоненты.

Отметим некоторые закономерности, замеченные в экспериментах по водообмену жидкой компоненты. В начале вальца функция интегрального водозахвата $q_1(x)$ имеет тенденцию к резкому нарастанию по продольной координате области X , причём её первая производная по координате X монотонно убывает; затем её монотонное нарастание становится более плавным и происходит за счёт турбулентного обмена. То есть на двух последних третях длины вальца (ближе к его концу) массообмен осуществляется в основном только за счёт турбулентности. Функция $q_2(x)$ также начинается в начальной зоне вальца, но сначала нарастает очень слабо. Первую треть длины вальца он остается практически нулевой, а затем нарастает за счёт выброса масс воды из вальца вихревыми образованиями. При этом интенсивности турбулентного водозахвата и водовыброса практически одинаковы.

Водообмен также изучался в работах Трубиной Е.К., её статья [4] посвящена исследованию водообмена при плановом расширении спокойного водного потока по методике аналогичной той, которая принята в настоящей работе. В работе [5], проведенной по той же методике, подробно описаны экспериментальные исследования водообмена как за донными уступами, косорасположенными в плане, так и за уступами, расположен-

ными перпендикулярно потоку, но на участке его поворота.

В работе [6] исследуется водообмен между отрывными зонами при плавном плановом расширении потока с помощью известного *PIV метода*. Во всех отмеченных работах установлено, что существуют как турбулентная, так и конвективная формы водообмена, отмечается роль *вихревых структур*, которые в зоне отрыва образуют иногда правильную последовательность их чередования или какую-либо структуру, которая проявляется длительное время.

Предварительный расчет распределения давлений по длине рассматриваемой области. Для предварительного расчета распределения давлений по длине рассматриваемой области и для быстрой оценки эффективности сооружений с рассматриваемыми элементами нами предлагается следующая математическая модель течения в вихревом вальце.

Рассматривается *элементарная струйка* поступательного движения потока вдоль вальца, но не в классическом гидромеханическом смысле, а в смысле её рассмотрения в работе [7], как струйки с переменными вдоль пути расходом, то есть допускаются перетекания масс воды через боковую поверхность этой струйки, что с гидромеханической точки зрения некорректно. Однако, для приближённых оценок такая модель, будучи апробированной по данным монографии [7], может подойти. Эта струйка (трубка тока) прямолинейна и ориентирована вдоль самого вальца, а через боковые поверхности её происходит втекание и вытекание масс воды. Каждая такая струйка имеет бесконечно малое сечение площадью dw . Втекающие и вытекающие массы воды перераспределяются между указанными струйками именно за счёт перетекания через их боковые поверхности. Вся площадь вальца в любом поперечном сечении представляет собой суммарную площадь рассматриваемых трубок тока.

Поступательное движение потока в вальце происходит с переменным вдоль пути расходом $q(x)$ и со скоростями $v(x)$,

изменяющимися по длине x . При этом соблюдается условия баланса расходов для вальца в целом, а также для каждой элементарной струйки

$$q(x) = q_1(x) - q_2(x), \quad (1)$$

где q_1 и q_2 – это интегральные расходы, проникшие внутрь объёма вальца от его начала до рассматриваемого сечения. Каждая частица жидкости при этом испытывает влияние следующих сил:

1. перепада давления вдоль направления поступательного движения винтообразного потока в вальце (ΔP);
2. поперечного перепада давления (поперек вальца);
3. сил трения между транзитным потоком и вихревым вальцом, передаваемых каждой частице через касательные напряжения в массе жидкости;
4. сил трения потока о дно и стену уступа.

Рассмотрим указанные силовые факторы в отдельности.

Продольный перепад давления P_x вдоль вальца определяется общим сопротивлением потока (перепадом поверхности потока при прохождении его от начала координат до точки B – рис. 2а) и местным сопротивлением, связанным с внезапным расширением и увеличением глубины потока и дополнительной турбулентностью (возникновением отрывного течения). Поперечный перепад давления не влияет на продольное движение потока, а только на вращательное движение.

Изменение силы трения по длине вальца (вдоль координаты x), обусловленное различными значениями разности $U_0 \cos(\alpha - \phi_{sp}) - \bar{v}$, в расчетах может быть учтено введением коэффициента в этом выражении.

Движение элементарной струйки с переменным вдоль пути расходом описывается нижеследующим уравнением, выведенным в работе [7]

$$\rho v dw \Delta v + \rho(v - \tilde{v}_1) \Delta q_1 - \rho(v - \tilde{v}_2) \Delta q_2 = \Delta F \dots (2)$$

где v – скорость струйки в данном сечении струйки (трубки тока), а Δv – её из-

менение между двумя соседними сечениями, находящимися друг относительно друга на расстоянии Δx (между данным и достаточно близко расположенным к нему сечением струйки); dw – бесконечно маленькая площадь живого сечения элементарной струйки; \tilde{v}_1, \tilde{v}_2 – проекции скоростей присоединяющихся и отделяющихся масс жидкости на направление оси струйки; $\Delta q_1, \Delta q_2$ – изменение компонент расхода струйки между двумя ее сечениями за счет присоединения к ней и отделения от нее масс жидкости; $d(\Delta F)$ – равнодействующая всех внешних сил, приложенных к струйке между расчетными сечениями; (далее обозначается проще как ΔF).

Структура уравнения (2) соответствует структуре основных уравнений движения жидкости с переменным вдоль пути расходом, выведенных в работах многих отечественных и зарубежных авторов.

В вихревом вальце каждая реальная элементарная струйка осредненного течения будет иметь спиралевидную форму в пространстве, а каждая виртуальная струйка, введенная нами выше, будет иметь прямолинейную форму и направлена вдоль вальца, причем изменение расхода на любом ее участке будет обусловлено только обменным расходом.

Введенное упрощение позволяет заменить величины проекций скоростей v ,

\tilde{v}_1, \tilde{v}_2 и сил ΔF на ось реальной струйки их проекциями на направление оси вальца, не меняя обозначения этих величин. Справедливость уравнения (2) для любой струйки при этом не нарушится.

Выражаем силы трения через их напряжения, пользуясь гипотезой о постоянстве коэффициента турбулентного перемешивания ε в области отрыва и обычным предположением о прямой пропорциональности между напряжением трения в горизонтальной плоскости и градиентами осредненной скорости по вертикали

$$\tau = \rho \varepsilon \frac{\partial v}{\partial z},$$

где v – проекция вектора скорости в струйке на направление оси вальца.

При этом пренебрегаем влиянием пространственности потока в вальце.

Введем обозначения $v_1 = \frac{q_1}{w}, v_2 = \frac{q_2}{w}$.

Затем проинтегрируем уравнение (2) по поперечному сечению вихревого вальца, имея в виду, что

$$\begin{aligned} \Delta q_1 &= \Delta(v_1 dw) = v_1 \Delta(dw) + dw \Delta v_1, \\ \Delta q_2 &= \Delta(v_2 dw) = v_2 \Delta(dw) + dw \Delta v_2, \end{aligned} \quad (3)$$

т.к. последние равенства (3) справедливы ввиду малости величин $\Delta v_1, \Delta v_2$, получаем выражение (4)

$$\begin{aligned} & \int_w v \Delta v dw + \int_w v v_1 \Delta(dw) + \int_w v \Delta v_1 dw - \int_w \tilde{v}_1 v_1 \Delta(dw) - \int_w \tilde{v}_1 \Delta v_1 dw - \\ & - \int_w v v_2 \Delta(dw) - \int_w v \Delta v_2 dw + \int_w \tilde{v}_2 v_2 dw + \int_w v_2 \Delta v_2 dw + \int_w \frac{\Delta P}{\rho} dw - \\ & - \int_{w_n} \varepsilon \frac{\partial v}{\partial z} dw_n = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

где W_n – площадь границы раздела между расчетными участками вальца. Присоединяющиеся к вальцу добавочные массы быстро перераспределяются по сечению вальца в результате вращения и турбулентности в нем. Поэтому

величины Δv_1 и Δv_2 , представляющие отношения вошедшего в валец и вышедшего из него расходов к величине площади рассматриваемого сечения, можно считать прямо пропорциональными местной скорости v в любой точке

сечения вальца, то есть справедливы следующие равенства

$$\frac{v}{\bar{v}} = \frac{v_1}{\bar{v}} = \frac{v_2}{\bar{v}_2} = \frac{\Delta v_1}{\Delta \bar{v}_1} = \frac{\Delta v_2}{\Delta \bar{v}_2} = \frac{\Delta v}{\Delta \bar{v}}. \quad (5)$$

Черта над символом обозначает среднее по сечению вальца значение данной величины.

Интеграл вида $\int_w v^2 dw$ можно пред-

ставить в виде $\alpha_0 \bar{v}^2 w$, где $\alpha_0 = \frac{\int_w v^2 dw}{\bar{v}^2 w}$

– коэффициент Буссинеска, характеризующий неравномерность распределения скоростей v по сечению вальца.

Из приведенных выше соотношений вытекает справедливость и следующих равенств

$$\begin{aligned} \int_w v \Delta v dw &= \int_w v^2 \frac{\Delta v}{\bar{v}} dw = \int_w v^2 \frac{\Delta \bar{v}}{\bar{v}} dw = \\ &= \frac{\Delta \bar{v}}{\bar{v}} \int_w v^2 dw = \frac{\Delta \bar{v}}{\bar{v}} \alpha_0 \bar{v}^2 dw. \end{aligned} \quad (6)$$

Аналогично можно записать:

$$\begin{aligned} \int_w v \Delta v_1 dw &= \frac{\Delta \bar{v}_1}{\bar{v}} \alpha_0 \bar{v}^2 dw; \\ \int_w v \Delta v_2 dw &= \frac{\Delta \bar{v}_2}{\bar{v}} \alpha_0 \bar{v}^2 dw; \\ \int_w \tilde{v}_1 \Delta v_1 dw &= \frac{\Delta \bar{v}_1}{\bar{v}} \int_w \tilde{v}_1 v dw; \\ \int_w \tilde{v}_2 \Delta v_2 dw &= \frac{\Delta \bar{v}_2}{\bar{v}} \int_w \tilde{v}_2 v dw. \end{aligned} \quad (7)$$

Члены уравнений (7), имеющие вид $\int_w v_i v_j \Delta(dw)$, можно преобразовать, имея в виду, что выражение $\Delta(dw)$ эквивалентно разности $dw_1 - dw_2$, где w_2 и w_1 относятся к двум сечениям вальца на расстоянии Δl одно от другого

$$\begin{aligned} \int_w v_i v_j \Delta(dw) &= \int_w v_i v_j (dw_2 - dw_1) = \\ &= \int_w v_i v_j d(\Delta w). \end{aligned}$$

В последнем интеграле величина Δw может рассматриваться как независимая переменная, по которой производится интегрирование.

Несмотря на интенсивное перемешивание масс воды в вальце, распределение скоростей втекающего и вытекающего расходов в данном сечении (v_1 и v_2) нельзя считать равномерным. В силу этого члены уравнения (4), содержащие эти скорости, могут быть выражены через среднюю скорость в сечении вальца только с учетом коэффициентов, характеризующих неравномерность их распределения.

В качестве таковых введем в рассмотрение следующие коэффициенты

$$A = 1 - \frac{\int_w \bar{v}_1 v dw}{\int_w v^2 dw}; \quad B = 1 - \frac{\int_w \bar{v}_2 v dw}{\int_w v^2 dw}.$$

С учетом этих выражений и сказанного выше уравнение (4) примет вид

$$\begin{aligned} \alpha_0 \Delta \bar{v} \bar{v} w + A \alpha_0 \bar{v}_1 \Delta w \bar{v} + A \alpha_0 \Delta \bar{v}_1 \bar{v} w - \\ - B \alpha_0 \bar{v}_2 \Delta w \bar{v} - B \alpha_0 \bar{v}_2 w \bar{v} + \\ + \frac{1}{\rho} \int_w \Delta \rho dw - \int_{wn} \varepsilon \frac{\partial w}{\partial z} dw_n = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Средний по сечению градиент скорости $\frac{\partial w}{\partial z}$, входящий в подынтегральное выражение последнего члена уравнения (8), очевидно, может быть выражен формулой $\frac{\partial w_\tau}{\partial z} = \frac{U_0}{p} \cos(\alpha - \phi_{ep}) - \bar{v}$.

В последней формуле α и ϕ_{ep} – углы расположения уступа относительно основного потока и склонения его на гребне. Принимая значение коэффици-

ента турбулентного перемешивания по упрощенной формуле И.Л. Розовского, $\varepsilon = kU_0 p$, получим

$$\int_{w_n} \varepsilon \frac{\partial v}{\partial z} dw_n = kU_0 [U_0 \cos(\alpha - \phi_{ep}) - \bar{v}]. \quad (9)$$

После некоторых математических преобразований уравнение (8) приобретает следующий вид

$$\begin{aligned} & \alpha_0 \bar{v} w \Delta \bar{v} (1 + A - B) + \\ & + \alpha_0 \bar{v} \Delta w (A \bar{v}_1 - B \bar{v}_2) - \frac{\Delta P}{\rho} + \\ & + kU_0 [U_0 \cos(\alpha - \phi_{ep}) - \bar{v}] w_n = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Уравнение (10) позволяет при наличии достаточной исходной информации, найти значение средних по сечениям вальца поступательных скоростей (\bar{v}).

Кроме того, полученная математическая модель пространственного вихревого течения за донными уступами вскрывает связи между определяющими явления факторами и может быть использована при анализе динамической структуры вихревого течения.

Рассмотренное теоретическое построение представляет собой гидравлическую теорию «жидкой трубы», описывающую движение воды с переменным вдоль пути расходом и согласованным с ним явлением изменения сечений вальца (расширениями или сжатиями).

Использованный нами подход к изучению структуры осреднённого стационарного течения за донным уступом (или донными порогами) применим также к квазистационарным течениям, таким как вихрь в зоне сосредоточенного втекания потока в область вальца, и к мгновенным структурам, представляющим собою вращающиеся массы воды в вихре. Для модификации математической модели может быть использована также идея учёта энергии вращения, которую мы в данном варианте математической модели не учитывали ввиду относительно слабого вращения осреднённого потока в вальце.

Реальная картина течения и местные структуры, существенно влияющие на эффективность сооружений.

Реальная картина течения отличается тем, что в области вальца существуют местные мощные винтообразные течения, в частности, практически стационарный вихрь возникает в зоне втекания мощной адвективной струи в зону вальца в его начале. По фотографиям на рис. 3, 4 можно оценить приблизительно скорость частиц, которые участвуют в крутке и продольном перемещении потоков внутри области такого винта. Эти скорости приблизительно в 3–3,5 раза превышают скорость U_0 . По рис. 4 и 5 можно заметить характер и скорость распространения дополнительных масс воды, попавших с гребня в область вальца с местной винтовой круткой, возникающей в этой области.

В целом можно отметить, что свойства винтообразных течений за донными уступами и порогами, отмеченные в начале статьи, обязаны, в основном, именно таким местным винтовым образованиям.

Развитие этого подхода должно дать возможность статистически изучать турбулентные структуры, аналогичные тем, которые мы рассматривали выше, с одной стороны, – с позиции Тейлора, предложенной им ещё в 1935 году, и, с другой стороны, – с использованием идей в работе [10], содержательно моделируя квази-стационарные и мгновенные структуры турбулентности.

Появляются также новые возможности в учёте динамики наносов и их влияния на основной поток. Так, например, в работе [8] подготовлена математическая основа для решения таких задач, а в работе [9] с учетом наносов. Но требуется раскрытие корреляционных связей между концентрацией частиц наносов и элементами кинематической структуры.

Результаты нашей работы могут быть также использованы для расчёта различных случаев [10–20], например, внезапного расширения русловых потоков в плане [20]. Могут быть раскрыты также дополнительные механизмы влияния ки-

нематики потока в отрывных зонах на механику руслового процесса в плане работы [21] и на общие свойства вторичных течений, описанных в монографии [22].

Применение полученных результатов к проектированию сооружений с целью улучшения его эффективности.

Были проведены расчёты по предлагаемой методике распределения давлений по длине области при заданной кинематической структуре потока, которая отличалась плавным постепенным уменьшением скоростей продольного движения вдоль вальца по его длине. Это иллюстрируется на рис. 6, где показаны

три эпюры скоростей осреднённого движения в проекции на ось вальца.

Значение скоростей при абсциссе 5 соответствует верхней границе вальца, здесь проявляется некоторое торможение потока внешним течением. Максимальное значение скоростей наблюдается при абсциссе 4. С противоположной стороны, – более существенное торможение потока значительной шероховатостью дна.

Данная методика применима и в противоположном смысле, то есть, варьируя давлениями в достижимом экспериментально и технический диапазоне, мы можем получать значения скоростей поступательного движения в вальце.



Рис. 3. Распространение красителя в потоке, набегающим на косорасположенную донную пластину
Fig. 3. Spread of dye in a flow running onto an oblique bottom plate

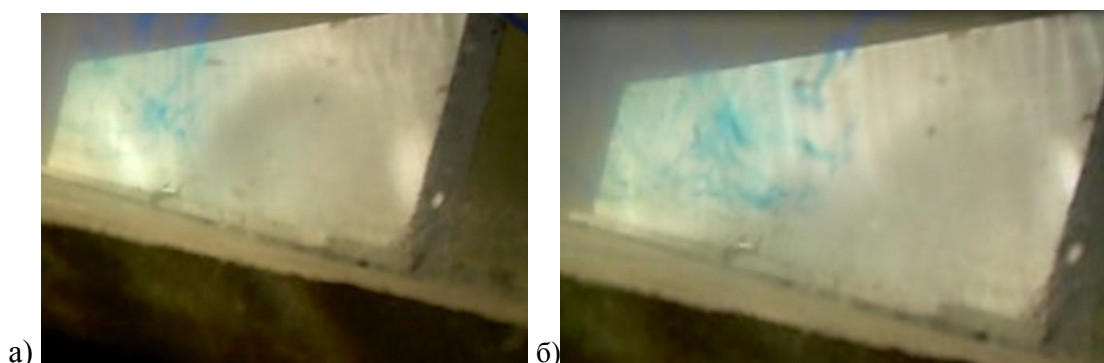


Рис. 4. Развитие стационарного винтового течения в струе, втекающей с гребня уступа в отрывную область; разница во времени 1 секунда между рис. а) и б)

Fig. 4. Development of a stationary helical flow in a jet flowing from the edge of a ledge into a separation region; the time difference between figures a) and б) is 1 second



Рис. 5. Иллюстрация реальной картины течения
Fig. 5. A real flow pattern illustration

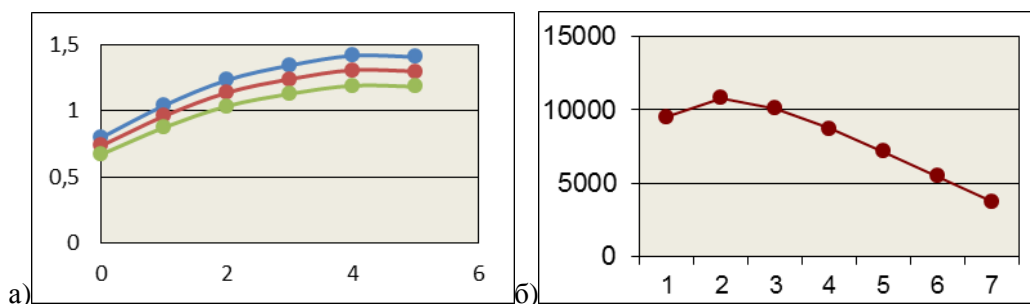


Рис. 6. а) Значения осреднённых относительных скоростей потока по вертикалям в центрах вальца (по его ширине) на разных расстояниях от его начала. Верхняя кривая – начало вальца, средняя – его середина и нижняя – конец; б) полученное распределение давления по длине вальца

Fig. 6. a) Values of averaged relative flow velocities along verticals at the centers of the roller (along its width) at different distances from its beginning. The upper curve – is the beginning of the roller, the middle one – is its middle and the lower one – is the end; б) the resulting pressure distribution along the length of the roller

В работах [11, 12] рассматриваются вопросы, связанные с дальнейшим развитием теории массообмена и гидродинамической структуры потоков в отрывных зонах, дающие возможность учёта движения твёрдой фазы с учётом обмена количеством движений между отдельными частицами при их столкновениях между собою и дном [9], усовершенствуется статистическая теория турбулентности [8, 11, 12, 18]. В работах [13, 14, 16] ведется построение расчётных алгоритмов для расчёта одно или двухфазных течений и развития теории турбулентности. В работах [13–15 и 19] решаются вопросы размыва несвязанного грунта в сложных случаях обтекания гидротехнических сооружений, где все-

гда образуются и функционируют течения, аналогичные описываемым в настоящей работе.

Заключение. Рассмотренные вопросы массо- и водообмена на границе вихревого вальца за косорасположенной пластиной или донным уступом, а также математическая модель динамики поступательного движения внутри такой области позволяет сделать заключение о том, что такие течения, возникающие в природе стихийным образом, или специально предусмотренные проектами каких-либо технических устройств, позволяют переносить значительные массы твёрдых и жидких веществ.

Применительно к изобретению [3], например, можно рассмотреть ряд кон-

структивных дополнений, улучшающих работу основного устройства, усиливающих интенсивность захвата наносов со дна колодца–завихрителя и облегчающего их подъём к поверхности волнового потока.

Анализ уравнения динамики поступательного потока внутри винтообразного течения, с переменным по длине его расходом, позволяет сделать вывод о том, что желательнее устройство для подъёма наносов проектировать так, чтобы поперечные размеры винтообразного течения в начальных его участках были минимальными с постепенным их увеличением по ходу потока.

Также следует обратить внимание на то, чтобы поступление потока в валец в зоне начала винтообразного течения было свободным, и поток не испытывал бы при этом значительных гидравлических сопротивлений.

Намечены пути дальнейших исследований. С учётом проведенных теоретических построений представляется задача дальнейшего усовершенствования методики расчета.

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., Сидоров С.М. Анализ кинематической структуры винтообразного течения за донным порогом с целью управления его массообменными характеристиками и транспортом наносов // Системы контроля окружающей среды. 2024. № 1(55). С. 92–102.

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., Черных С.Л., Сорокин А.Н., Кабалин С.В. Волногаситель и его варианты. Патент № 2814823. МПК Е 02 В 3/06. Заявка: 2023107668. 28.03.2023. Гос. регистрация 05.03.2024.

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

5. Кириенко И.И., Щодро А.Е., Климух А.С. Водообмен в отрывных течениях за донными уступами гидротехнических сооружений. В кн.: Гидравлика и гидротехника. Респ. межвед. научн.-техн. сборник. Выпуск 32. Киев. 1981. С. 8–13.

6. Unger J., Hager W.H., Shchodro A.E. Basic flow pattern in spur dykes. 29–th Convegno di idraulica e costruzioni idrauliche / Trento. 7–10 Settembre. Edit. Bios. 2004. Vol. 1. Tema A. P. 1147–1154.

7. Коновалов И.М., Маккавеев В.М. Гидравлика. М.: Госиздат. 1940. С. 683.

8. Taylor G.I. Statistical theory of turbulence // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. 1935. Vol. 151. P. 421–478.

9. Bialik R. Particle–Particle Collision for Lagrangian Modelling of Saltating Grain: Theoretical Background // Institute of Geophysics. Polish Academy of Sciences. 2008. Vol. E–10 (406).

10. Schimizu B.Y. Three-dimensional computation of flow and bed deformation / B.Y.Schimizu, H. Yamaguchi, T. Itacura // Journal of Hydraulic engineering. 1990. Vol. 116. No. 4. P. 563–1288.

11. Rotta J.C. Statistische theorie nicht-homogener turbulent / J. C. Rotta. Z.: Phys. 1951. V. 129, No. 5. P. 47–572.

12. Prandtl L. Weighardt K. Über ein neues Formelsystem für die ausgebildete Turbulenz. Nachr. Akad. Wiss. Gottingen / L. Prandtl. Math.–Phys. K1, 1945. P. 6–19.

13. Olsen, N. Three Dimensional Calculation of Scour Around Cylinders / N. Olsen, M. Melaaen // Journal of Hydraulic Engineering. 1993. 119(9). P. 1048–1054.

14. *Olsen N.* Three-dimensional numerical modelling of water flow in a river with large bed roughness / *Nils R.B. Olsen, Siri Stokseth* // *Journal of Hydraulic Research*. 1995. Vol. 33, Issue 4, P. 571–581.
15. *Les Hamill.* Bridge Hydraulics / *Les Hamill.* – London: School of Civil and Structural Engineering University of Plymouth, 2001. 210 p.
16. *Lauder B.E.* Mathematical models of turbulence / *B.E. Launder, D. B. Spalding.* Lo: Acad. press, 1972. 169 p.
17. *Daly B.J.* Transport equations in turbulence / *B.J. Daly, F.H. Harlow.* *Phys. Fluids*, 1970. 13, No. 11. P. 2634–2649.
18. *Фрост У., Моулден Т.* Турбулентность. Принципы и применения. Пер. с англ. М.: Мир. 1980. С. 535.
19. *Славінська О.С.* Теорія та методи прогнозування розмивів в зоні впливу мостових переходів: автореф. дис. на соискание научной степени докт. техн. наук. К.: 2009. С. 40.
20. *Слаутина А.В.* Внезапное расширение потока в условиях размываемого русла // *Русловые процессы и методы их моделирования.* Л.: Энергия. 1977. С. 38–48.
21. *Снищенко Б.Ф.* О влиянии взвешенных наносов на турбулентные характеристики руслового потока. Труды ГГИ. 1990. Вып. 337. С. 80–104.
22. *Офицеров А.С.* Вторичные течения. М.: Госиздат. 1959. С. 336.

TURBULENT AND ADVECTIVE MASS TRANSFER AT THE BORDER SEPARATION VORTEX ZONE BEHIND THE BOTTOM THRESHOLDS AND BENCHES OF HYDRAULIC STRUCTURES

A.E. Shchodro¹, S.M. Sidorov², Yu.E. Shishkin¹

¹Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28
E-mail: ashodro@ya.ru

²Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

The paper examines the issues of mass transfer and flow dynamics in the region of separated flow behind a bottom plate oblique relative to the flow or behind a bottom step. It is the helical flows that arise behind the sharp edges and ridges of special plates and structures due to mass transfer in the flow, that make it possible to capture a large amount of solid and suspended matter from the transit flow and ensure the transport of sediment in the desired direction. In addition to the previously discussed issues of the helical flow formation behind such plates flown around by a calm water flow, the issues of mass transfer between the transit flow and a separate region of a closed helical flow behind the plate are considered in more detail. Two main types of components of mass exchange between the transit flow and the closed region of the helical separated flow are considered: turbulent and convective types of water exchange. Issues of exchange of suspended sediments are also considered. We propose a mathematical model for the formation of a stationary flow within a region, along its axis; the flow rates of this flow are determined both from the dynamic conditions of the flow movement and as the difference between the integral characteristics of water capture into the region of the helical flow and its release from it. Then we find conditions for the most optimal formation of the structure of the helical flow, when the convective components of the exchange significantly exceed the turbulent ones; the flow velocity components are of greatest importance and provide all the functions assigned to them for sediment transport and self-flushing of the helical flow region.

Keywords: bottom thresholds, helical currents, flow separation, mass transfer, turbulent and convective water exchange, free turbulence.

REFERENCES

1. *Shhodro A.E. and Sidorov S.M.* Analiz kinematičeskoj struktury vintooobraznogo tečeniya za donnym porogom s cel'ju upravlenija ego massoobmennymi harakteristikami i transportom nanosov (The helical flow behind the bottom threshold kinematic structure analysis for the purpose of controlling its

mass transfer characteristics and sediment transport). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2024, No. 1 (55), pp. 92–102. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2024-1-92-102>.

2. *Shhodro A.E.* Sposob intensivizatsii vodoobmena v akvatorii i upravleniya dvizheniem nanosov i ustrojstvo dlya ego osushhestvleniya (A method for intensifying water exchange in a water area and controlling the movement of sediments and a device for its implementation). Patent No. 2711810, MPK E 02 B 15/00, E 02 B 8/02, Zayavka: 2018134728, 01.10.2018, Gos. registracija 22.01.2020 g.

3. *Shchodro A.E., Chernykh S.L., Sorokin A.N., and Kabalin S.V.* Volnogasitel' i ego variant (Wave damper and its variants). Patent No. 2814823, MPK E 02 B 3/06, Zayavka: 2023107668, 28.03.2023, Gos. registracija 05.03.2024.

4. *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 M-L*, 1960, Vol. 65, pp. 91–106.

5. *Kirienko I.I., Shchodro A.E., and Klimuk A.S.* Vodoobmen v otryvnyh techeniyah za donnymi ustupami gidrotehnicheskikh sooruzhenij (Water exchange in separated flows behind these benches of hydraulic structures). *Gidravlika i gidrotehnika*, Kiev, 1981, Vol. 32, pp. 8–13.

6. *Unger J., Hager W.H., and Shchodro A.E.* Basic flow pattern in spur dykes. 29–th Convegno di idraulica e costruzioni idrauliche, Trento, 7–10 September, Edit. Bios. 2004, Vol. 1, Tema A, pp. 1147–1154.

7. *Konovalov I.M. and Makkaveev V.M.* *Gidravlika (Hydraulics)*. Moscow: Gosizdat, 1940, 683 p.

8. *Taylor O.I.* Statistical theory of turbulence. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1935, Vol. 151, pp. 421–478.

9. *Bialik R.* Particle–Particle Collision for Lagrangian Modelling of Saltating Grain: Theoretical Background. *Institute of Geophysicis. Polish Academy of Sciences*. 2008, Vol. E–10 (406).

10. *Schimizu B.Y.* Three-dimensional computation of flow and bed deformation / B.Y.Schimizu, H. Yamaguchi, T. Itamura // *Journal of Hydraulic engineering*. 1990, Vol. 116, No. 4, pp. 563–1288.

11. *Rotta J.C.* Statistische theorie nichthomogener turbulent / J.C. Rotta. *Z.: Phys.* 1951. Vol. 129, No. 5, pp. 547–572.

12. *Prandtl L. and Weighardt K.* Über ein neues Formelsystem für die ausgebildete Turbulenz. *Nachr. Akad. Wiss. Göttingen / L. Prandtl. Math.–Phys. Kl.*, 1945, pp. 6–19.

13. *Olsen, N.* Three Dimensional Calculation of Scour Around Cylinders / N. Olsen, M. Melaaen // *Journal of Hydraulic Engineering*. 1993, 119(9), pp. 1048–1054.

14. *Olsen N.* Three-dimensional numerical modelling of water flow in a river with large bed roughness / Nils R.B. Olsen, Siri Stokseth // *Journal of Hydraulic Research*. 1995. Vol. 33, Issue 4, pp. 571–581.

15. *Les Hamill.* *Bridge Hydraulics / Les Hamill*. London: School of Civil and Structural Engineering University of Plymouth, 2001, 210 p.

16. *Lauder B.E.* *Mathematical models of turbulence / B.E. Launder, D.B. Spalding*. Lo:Acad. press, 1972, 169 p.

17. *Daly B.J.* Transport equations in turbulence / B.J. Daly, F.H. Harlow. *Phys. Fluids*, 1970. 13, No. 11, pp. 2634–2649.

18. *Frost W. and Moulden T.* *Turbulentnost'. Principy i primenenija (Turbulence. Principles and applications)*. Moscow: Mir, 1980, 535 p.

19. *Slavins'ka O.S.* Teorija ta metodi prognozuvannja rozmyviv v zoni vplivu mostovih perehodiv (Theory and methods for predicting flooding in the flood zone of bridge crossings). *Doct. eng. sci. thesis*, Kiev, 2009, 40 p.

20. *Slautina A.V.* Vnezapnoe rasshirenie potoka v uslovijah razmyvaemogo rusla (Sudden expansion of flow in eroded channel conditions). *Leningrad.: Energiya*, 1977, pp. 38–48.

21. *Snishhenko B.F.* O vlijanii vzveshennyh nanosov na turbulentnye harakteristiki ruslovogo potoka (On the influence of suspended sediment on the turbulent characteristics of channel flow). *Proc. GGI*, 1990, Vol. 337, pp. 80–104.

22. *Oficerov A.S.* *Vtorichnye techenija (Secondary currents)*. Moscow: Gosizdat, 1959, 336 p.