

## Моделирование Поля Скоростей Потока На Участке Русла Реки Стесненном Перемычкой

*Худайкулов С. И.<sup>1</sup>, Журахонова Ш. М.<sup>2</sup>, Рахманова Д.<sup>3</sup>, Омонов F.<sup>4</sup>,  
Хушвақтов. И. X.<sup>5</sup>, Халилов Н.<sup>6</sup>, Тошмуродов С. X.<sup>7</sup>*

**Аннотация:** В статье на основе экспериментальных и теоретических исследований предложен новый способ расчета скоростного поля потока в стесненной перемычкой части русла реки, позволяющий рассчитать с допустимой степенью точности поле скоростей не только в области слабо возмущенного ядра, но также и в областях потока, примыкающих к верховому ребру перемычки и ее продольной грани, наиболее опасных в отношении размывов.

**Ключевые слова:** слабо возмущенное ядро, продольный водоворот, пограничный слой, участка сжатия, минимальная скорость, выравнивание скоростей.

**Введение.** Рождается Сырдарья в восточной части Ферганской долины из слияния двух рек – бегущего с ледников Тянь-Шаня Нарына и Карадарьи. Ее путь лежит через территории трех государств: Казахстана, Таджикистана и Узбекистана. Длина этой реки составляет 2 212 км. Сырдарья – река хоть и широкая, но неглубокая, поэтому судоходна она только в районе Кызыл-Орды и Казахстана.

На состояние реки оказывает большое влияние ирригационная система, так как воду из нее издавна использовали для орошения засушливых регионов. И в настоящее время насчитывается порядка 700 каналов, выводящих воду Сырдарьи в поля и промышленные районы. В своем среднем течении река образует многочисленные протоки, поэтому ее пойма низменная, местами заболоченная и заросшая камышом, тростником и тугайными лесами.



Рис.1. Река Сырдарья



**Постановка вопроса.** Скоростной режим потока Сырдарьи в стесненной перемычкой части русла определяет возможности судоходства, лесосплава, пропуска льда, а также условия последующего перекрытия реки; при размываемом русле он же определяет и возможные максимальные размывы русла.

Существующие способы расчета скоростного потока основаны либо на использовании схемы потенциального потока (метод В. В. Баланина [1]), либо на результатах экспериментальных исследований (метод Г. Л. Рубинштейна [2]).

Расчет скоростного поля и глубины потока на подходе к перемычке участке и в стеснении, основаны на результатах многочисленных измерений давления потока на дно и стенки. Этот способ представляет практический и теоретический интерес, он позволяет определить глубину и скорость в любой интересующей точке потока в районе перемычки. Однако его использование ограничено условиями экспериментов, в которых были получены необходимые для расчетов данные.

Выполненные Г. Л. Рубинштейном сравнения опытных и расчетных величин скоростей показали хорошую сходимость результатов в области потока выше начального створа стеснения и в области слабо возмущенного ядра на участке стеснения. Однако вблизи продольной грани перемычки и особенно в пределах турбулентного пограничного слоя этот метод дает значительные расхождения с результатами опыта.

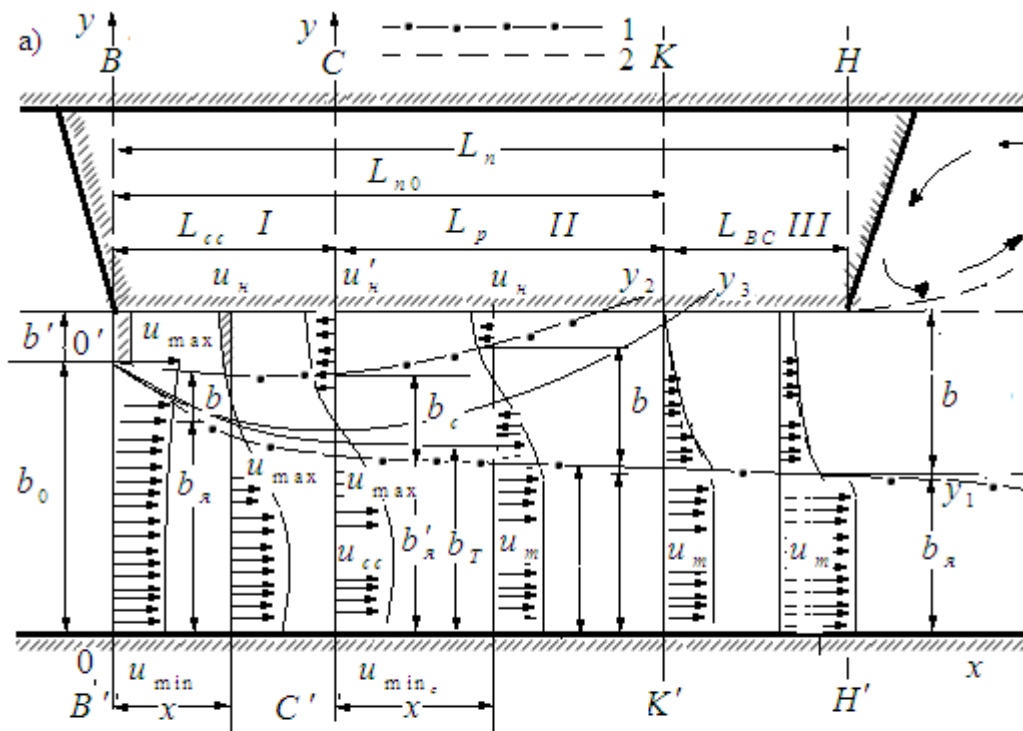


Рис. 2. Схема потока р.Сырдарья, стесненного перемычкой  
а)-на участках сжатия и растекания при отсутствии связи между продольным и низовым водоворотами; 1- границы турбулентного пограничного слоя, 2- граница водоворотов; I-участок сжатия; II -участок растекания; III- участок выравнивания скоростей.

Поэтому в районе стеснения реки от створа верхового ребра перемычки и до створа ее низовой грани могут быть выделены два участка: участок сжатия и участок расширения. В качестве разделяющей их границы был принят створ, совпадающий с максимально сжатым в плане сечением потока  $C - C'$  (рис. 2, а, 3б).



В задачу исследований входило разработать способ расчета поля скоростей в стесненной части русла: на участке сжатия от створа верхового ребра перемычки  $B-B'$  до сжатого сечения  $C-C'$  и на участке расширения от сжатого сечения  $C-C'$  до створа, проходящего через низовое ребро перемычки  $H-H'$ . Анализ данных экспериментов показал, что характер течения жидкости в районе стеснения потока перемычкой близок к тому, который имеет место при струйных течениях, распространяющихся в ограниченном пространстве. В соответствии с этим стесненный поток можно рассматривать состоящим из слабо возмущенного ядра, зоны обратных токов с малыми градиентами скоростей и пограничного турбулентного слоя.

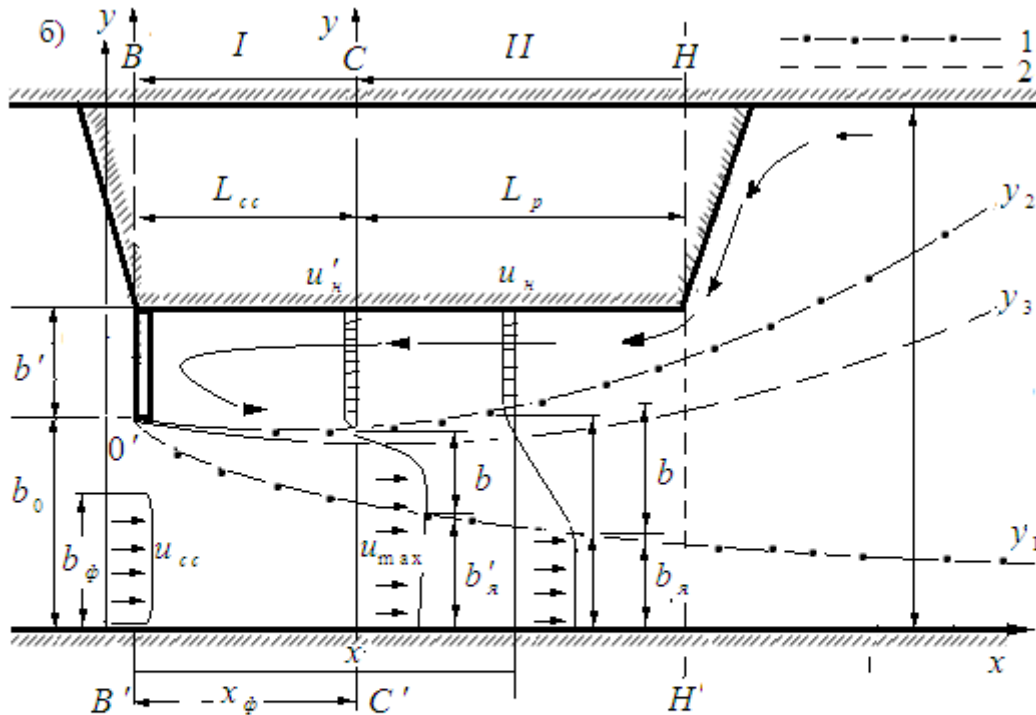


Рис. 3. Схема потока р.Сырдарья, стесненного перемычкой  
б) — на участке растекания при сопряжении продольного и низового водоворотов; 1 — границы турбулентного пограничного слоя, 2 — граница водоворотов; I — участок сжатия; II — участок растекания; III — участок выравнивания скоростей.

На рис.2,а,3.б. лучи  $O-y_1$  и  $O-y_2$  являются границами зоны интенсивного турбулентного перемешивания, имеющей ширину  $b$  и характеризующейся наибольшими величинами градиентов скоростей. Луч  $O'-y_2$ , обозначающий внешнюю границу зоны смешения, отделяет область потока, жидкость, в которой движется в обратном направлении со скоростью  $u_n$ , принимаемой нами постоянной в каждом поперечном сечении, но изменяющейся по длине потока. Внутренняя граница зоны смешения — луч  $O'-y_1$  отделяет эту область от области слабо возмущенного ядра. Отметим, что решаемая здесь задача рассматривается нами как плановая. Распределение средних по глубине потока скоростей в стесненной части русла может быть представлено в общем виде эпюрами, изображенными на рис. 1,а,б. Рассмотрим решение поставленной задачи последовательно для каждого участка в отдельности.

**Участок сжатия.** Большие трудности возникли при теоретическом решении задачи о построении поля скоростей на участке сжатия. Они обусловлены; необходимостью учета продольного и поперечного уклона свободной поверхности, величины которых соизмеримы



между собой, а также центробежных сил, возникающих в потоке вследствие значительной кривизны струй вблизи верхового ребра перемычки.

Это обстоятельство вызвало необходимость экспериментального рассмотрения поставленной задачи: установления границы слабо возмущенного ядра и пограничного слоя, а также закономерностей изменения скоростного поля потока в пределах этих зон.

Условия проведения опытов освещены в [3]. Слабо возмущенное ядро на рассматриваемом участке потока выделялось как область малых поперечных градиентов скорости по сравнению с градиентами в пограничном слое. Тем не менее, как показали эксперименты, в ядре потока существует некоторая неравномерность распределения скоростей по его ширине, обусловленная возникающими здесь поперечными перепадами уровней воды. Кривая, отвечающая очертанию границы ядра, согласно нашим опытам может быть описана уравнением вида:

$$\bar{b}_n = 1 - (1 - k\varepsilon) \left( \frac{x}{L_{cc}} \right)^{0,5} \quad (1)$$

где  $\bar{b}_n = \frac{b_n}{b_0}$ ;  $k$  - относительная ширина ядра в сжатом сечении  $C - C'$ , равная:

$\varepsilon$  - коэффициент планового сжатия, равный  $\frac{b_T}{b_0}$ ;  $b_T, b_0$  - соответственно ширина транзитного

потока в створах сжатого сечения  $C - C'$  и верхового ребра;  $x, L_{cc}$  - соответственно расстояние от данного створа и от сжатого сечения  $C - C'$  до створа верхового ребра. Максимальные скорости в ядре потока наблюдаются на границе ядра потока и пограничного слоя. Они направлены по касательной к граничной линии, описываемой зависимостью (1), и сохраняют вдоль нее постоянное численное значение, равное максимальной скорости в ядре сжатого сечения  $u_{\max}$ .

Минимальная скорость в ядре  $u_{\min}$  наблюдается у берега, противоположного перемычке. Опыты показали, что эпюра скоростей по ширине ядра потока в любом створе рассматриваемого участка описывается параболической зависимостью вида:

$$u = \sqrt{u_{\min}^2 + \frac{y^2}{b_n^2} (u_{\max}^2 - u_{\min}^2)} \quad (2)$$

в которой  $u$  - средняя скорость на произвольной вертикали в данном створе;  $y$  — ордината этой вертикали. Изменение границы между областью интенсивного перемешивания и областью обратных токов подчиняется зависимости

$$\bar{y}_2 = 1 - 0,2 \cdot (1 - k\varepsilon) \left( \frac{x}{L_{cc}} \right)^{0,5} \quad (3)$$

Где  $\bar{y}_2 = \frac{y_2}{b_0}$ . Экспериментами установлено, что в области пограничного слоя эпюры распределения скоростей в поперечных сечениях подчиняются универсальному закону, описываемому зависимостью Шлихтинга - Абрамовича

$$\frac{u - u_n}{u_{\max} - u_n} = \left( 1 - \eta^2 \right)^2 \quad (4)$$



в которой  $\eta = \frac{(y - b_y)}{(y_2 - b_y)}$ ;  $u$  - скорость в данной точке пограничного слоя;  $y$  - ордината этой точки.

Полученные по результатам наших опытов значения относительных экстремальных скоростей в сжатом сечении  $\frac{u_{\max_c}}{g_{cp}}$ ,  $\frac{u_{\min_c}}{g_{cp}}$  также коэффициентов  $\varepsilon$ ,  $k$  приведены в таблице 1.

**Значения относительных экстремальных скоростей в сжатом сечении 1.таблица.**

Степень стеснение $n = 1 - b_0/B$	$\alpha^\circ$	$R/b_0$	$L_{cc}/b_0$	$\varepsilon$	$k$	$u_{\max_c}/g_{cp}$	$u_{\min_c}/g_{cp}$
0,75	90	0	0,82	0,76	0,79	1,08	1,0
0,60	90	0	0,76	0,78	0,81	1,08	0,995
0,50	90	0	0,71	0,80	0,83	1,08	0,98
0,40	90	0	0,67	0,82	0,85	1,09	0,97
0,25	90	0	0,59	0,88	0,87	1,09	0,94
0,75	45	0	0,66	0,86	0,84	1,09	0,97
0,60	45	0	0,60	0,88	0,86	1,10	0,95
0,50	45	0	0,55	0,90	0,88	1,10	0,93
0,40	45	0	0,50	0,91	0,90	1,10	0,935
0,25	45	0	0,38	0,95	0,91	1,11	0,91
0,75	90	0,13	0,75	0,90	0,78	1,08	1,0
0,60	90	0,13	0,61	0,92	0,83	1,10	0,95
0,50	90	0,13	0,50	0,94	0,86	1,13	0,92
0,40	90	0,13	0,38	0,96	0,92	1,15	0,89
0,25	90	0,13	0,20	1,00	0,93	1,18	0,87
0,50	90	0	0,71	0,80	0,83	1,08	0,98
0,50	60	0	0,60	0,85	0,87	1,10	0,96
0,50	45	0	0,52	0,90	0,88	1,10	0,93
0,50	30	0	0,20	0,97	0,91	1,15	0,915
0,50	90	0	0,71	0,80	0,83	1,08	0,98
0,50	90	0,13	0,50	0,94	0,86	1,13	0,92
0,50	90	0,26	0,42	1,00	0,93	1,15	0,90

примечание,  $\alpha^\circ$  - угол наклона верховой грани перемычки к оси потока;  $B$  - ширина бытового русла;  $\frac{R}{b_0}$  - относительный радиус скругления верхового ребра перемычки.

Средняя скорость транзитного потока в сжатом сечении  $C-C'$  определяется по формуле  $g_{cp} = \frac{Q}{h_{сж} \varepsilon b_0}$ , в которой  $h_{сж}$  - глубина в сжатом сечении  $C-C'$  вычисляется по способу И. В. Лебедева [4].

Величину минимальной скорости в ядре потока  $u_{\min}$  следует находить по эмпирическим

графикам на рис.3.  $\frac{u_{\min}}{u_{\min_c}} = f\left(\frac{x}{b_0}\right)$



Значение скорости в обратном токе  $u_n$  определяется линейной зависимостью  $u_n = u'_n \frac{x}{L_{cc}}$  в которой  $u'_n$  - скорость в обратном токе в створе сжатого сечения  $C - C'$ , по результатам опытов равная  $0,2u_{oc}$ . Средняя скорость в ядре сжатого сечения  $C - C'$  :

$$u_{oc} = 0,5(u_{макс} + u_{мин}).$$

*Участок расширения потока за сжатым сечением.* Гидравлические характеристики потока в стесненной части русла за сжатым сечением получены теоретическим путем с использованием некоторых положений теории турбулентных струй. Экспериментальные исследования показали, что растекание потока за сжатым сечением существенно зависит от длины водоворота, образуемого у продольной грани перемычки. Если водоворот выходит за её пределы и оказывается соединенным с водоворотом нижнего бьефа за низовой гранью (рис.1,6), то расширение потока за сжатым сечением сопровождается сравнительно малыми изменениями глубины потока по длине его и ими можно пренебречь при выполнении гидравлических расчетов. Если же водоворот не выходит за пределы продольной грани перемычки и не связан непосредственно с водоворотом нижнего бьефа (рис.2.), то за сжатым сечением, в стесненной части русла расширение потока сопровождается интенсивным восстановлением энергии с быстрым ростом уровня воды и уменьшением скоростей потока. Задача решена с учетом неравномерности распределения скоростей в начальном створе расширения (сжатом сечении  $C - C'$ ) и с учетом характера изменения потенциальной энергии потока по длине его (для второго случая растекания). В основу расчетной схемы положено деление потока на гидравлически однородные зоны. Принято, что давление в сечениях потока распределяется по гидростатическому закону, а глубина постоянна по ширине потока. В решении не учитывалось действие сил трения на стенках в виду небольшой протяженности рассматриваемого участка. Распределение скоростей в пограничном слое принято подчиняющимся универсальной зависимости Шлихтинга - Абрамовича. Задача сводилась к установлению величины скоростей в ядре  $u_m$ , у продольной грани перемычки  $u_n$  и глубины потока  $h$  в зависимости от продольной координаты  $x$ . Рассмотрим решение поставленной задачи для каждого случая растекания потока в отдельности.

а) Продольный и низовой водоворот гидравлически связаны между собой (рис.3.). В основу метода расчета скоростного поля положены решения, полученные для начального створа растекания.

Неравномерность распределения скоростей течения в начальном створе растекания (сжатом сечении) учитывается нами по способу Г. Н. Абрамовича, суть которого заключается в том, что истечение из действительного сечения заменяется истечением из фиктивного сечения  $\Phi - \Phi'$ , расположенного выше по течению и обладающего равномерным распределением скоростей [6,9,10].

Расходы воды через это сечение, глубина и количество движения в нем принимаются равными этим же величинам в действительном начальном сечении - сжатом сечении  $C - C'$  (рис.1,6). Посредством совместного решения уравнений сохранения расхода и количества движения, составленных для фиктивного отсека жидкости, ограниченного фиктивным и сжатым  $C - C'$  сечениями, получены зависимости, определяющие ширину фиктивного сечения  $b_\phi$  и его расстояние до сжатого сечения  $x_\phi$  [3,6]:

$$\bar{b}_\phi = 0,76\bar{b}'_a + 0,24(1 + \bar{b}');$$

$$\bar{x}_\phi = 2,4[(1 + \bar{b}') - \bar{b}'_a], \quad (6)$$



где  $\bar{b}_\phi = \frac{b_\phi}{b_0}$ ;  $\bar{b}' = \frac{b'}{b_0}$ ;  $\bar{x}_\phi = \frac{x_\phi}{b_0}$ ;  $b'$  - ширина верхового оголовка. Гидравлический расчет потока на участке растекания выполняется по способу М. А. Михалева [5,7]; за начальный створ растекания принимается фиктивное сечение. Согласно этому способу величина в ядре потока  $u_m$  определяется по формуле

$$u_m = u_{oc} k' e^{-\frac{a\zeta}{4\gamma}} \quad (7)$$

где  $\gamma$  - степень расширения, равная  $b_0 + \frac{b'}{b_\phi}$ ;  $\zeta = \frac{x}{b_\phi}$  - расстояние от фиктивного сечения до рассматриваемого створа,

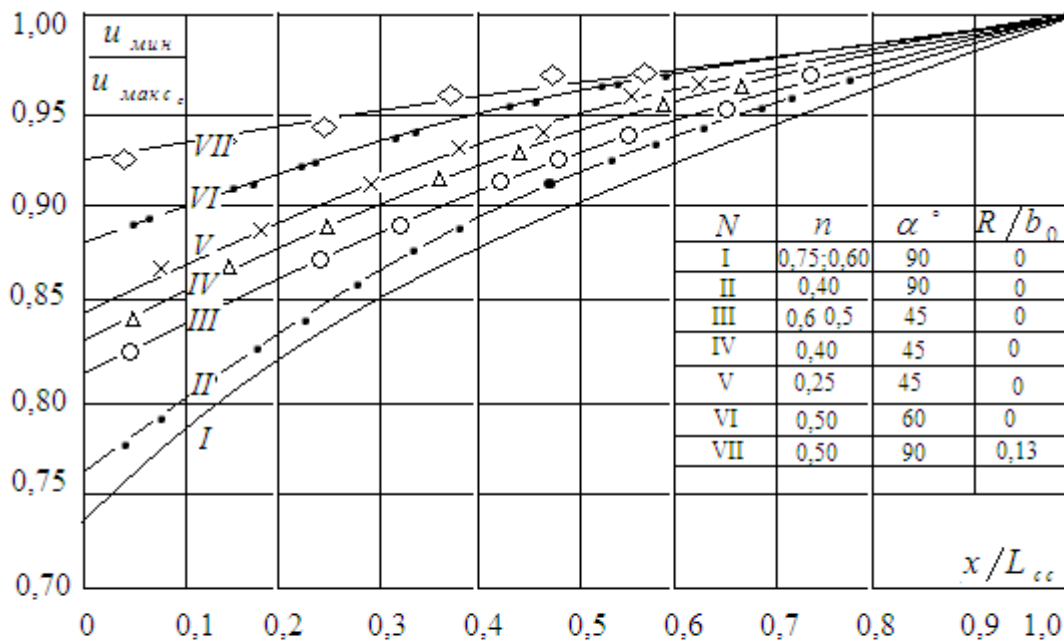


Рис. 4. График зависимости  $\frac{u_{\min}}{u_{\max}} = f(x/b_0)$

$n$  - степень стеснения потока перемычкой, равная  $1 - B_0/B_1$

удовлетворяющее неравенству  $x_\phi \leq x \leq L_n - x_\phi$  - длина продольной грани перемычки);  $a$  - параметр, равный  $\frac{\lambda_g(b_0 + b')}{h_{сж}}$ ;  $h_{сж}$  - глубина в сжатом сечении;  $\lambda_g$  - коэффициент гидравлического трения дна;

$$k'^2 = 1 + \frac{1}{\gamma} \left( 1 - 2 \frac{i_g}{\lambda_g} - 0,2 \frac{1}{a} \right) \left( e^{\frac{a\zeta}{2\gamma}} - 1 \right) \frac{1}{\left( 1 - \frac{u_{0c}^2}{gh_{сж}\gamma^2} \right)}$$

Граничная линия ядра потока  $y_1$  вычисляется по зависимости:



$$\bar{y}_1 = 0,55\bar{b} - \frac{m}{m-1}(\gamma-1) + \frac{e^{\frac{a\zeta}{4\gamma}} - k'}{(m-1)k'} \quad (8)$$

где  $\bar{y}_1 = \frac{y_1}{b_\phi}$ ,  $\bar{b} = \frac{b}{b_\phi}$ . Величина относительной скорости в обратном токе

$m = \frac{u_n}{u_m}$  устанавливается из уравнения:

$$m^2 + \left[ \frac{(\gamma-1) - 0,102\zeta}{0,036\zeta} - \frac{e^{\frac{a\zeta}{4\gamma}} + k'}{0,036\zeta k'} \right] m + \left[ 1,072 - \frac{e^{\frac{a\zeta}{4\gamma}} - k'}{0,036\zeta k'} \right] = 0 \quad (9)$$

Распределение скоростей в пограничном слое рассчитывается по зависимости Шлихтинга - Абрамовича:

$$\frac{u_m - u}{u_m - u_n} = \left( 1 - \eta^2 \right)^2, \quad \eta = \frac{y_2 - y}{b}, \quad y_2 = y_1 + b \quad (10)$$

где  $b$  - ширина пограничного слоя определяется по формуле:

$$b = 0,27x \quad (11)$$

Протяженность водоворота, образующегося в стесненной части русла, находится из выражения:

$$\bar{L}_{nb} = 8,0\bar{b}_\phi(\gamma-1) - \bar{x}_\phi + \bar{L}_{cc} \quad (12)$$

$$\bar{L}_{nb} = \frac{L_{nb}}{b_0}$$

б) В случае, если продольный и низовой водовороты гидравлически не связаны между собой, в стесненной части русла за сжатым сечением следует выделить два участка:

участок расширения и участок выравнивания скоростей по ширине русла, простирающийся от створа, совпадающего с концом продольного водоворота  $K - K'$ , и до створа низового ребра перемычки  $H - H'$  (рис.1,а).

Гидравлический расчет потока на указанных участках выполнен с учетом изменения потенциальной энергии потока по длине этих участков. Задача определения скоростей в ядре потока  $u_m$  и у продольной грани перемычки  $u_n$ , глубины потока  $h$ , в зависимости от продольной координаты  $x$  сводилась к совместному решению трех уравнений, имеющих для участка растекания следующий вид:

уравнения изменения количества движения:

$$u_m^2 b_\phi h + h \int_{y_1}^{y_2} u^2 dy + g(b_o + b') \left( \frac{h^2}{2} - \frac{h_{сж}^2}{2} \right) = h_{сж} \int_{y_1}^{y_2} u^2 dy + u_{oc}^2 b_\phi h'_{сж}$$

уравнения сохранения расхода:





$$u_m b_{\text{я}} h + h \int_{y_1}^{y_2} u dy + u_n (b_o - b_{\text{я}} - b) h = u_{oc} b'_{\text{я}} h_{\text{сж}} + h_{\text{сж}} \int_{y_1}^{y_2} u dy + u'_n (b_0 - b'_{\text{я}} - b_c) h_{\text{сж}}$$

дифференциального уравнения движения в слабо возмущенном ядре:

$$-\frac{dh}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \frac{u_m^2}{2g} \right) \quad (13)$$

Выражения для определения скорости  $u_m$  в ядре потока, на участках расширения и выравнивания скоростей установлены решением уравнений изменения количества движения потока и имеют вид:

на участке расширения:

$$u_m^2 = \frac{g(1 + \bar{b}') (a_1^2 - h^2)}{2(\bar{b}_{\text{я}} + 0,316\bar{b}') h} \quad (14)$$

Где

$$a = h_{\text{сж}} \sqrt{\frac{2(b'_{\text{я}} + 0,316\bar{b}_c) Fr_0}{(1 + \bar{b}')} + 1}$$

$Fr_0 = \frac{u_{oc}^2}{gh_{\text{сж}}}$  - число Фруда подсчитанное для сжатого сечения;

$b_c$  - ширина пограничного слоя в сжатом сечении;

на участке выравнивания:

$$u_m^2 = \frac{g(1 + \bar{b}') (a_1^2 - h^2)}{2[\bar{b}_{\text{я}} + (1 + \bar{b}' - \bar{b}_{\text{я}})(0,416 + 0,268m + 0,316m^2)] h} \quad (15)$$

Закон изменения глубины воды вдоль участка растекания потока установлен решением дифференциального уравнения движения (13), преобразованного к виду:

$$\frac{g(1 + \bar{b}') (a_1^2 - h^2)}{2h^2 [(\bar{b}_{\text{я}} + 0,316\bar{b}_c) + 0,0537x]} \frac{dh}{dx} + \frac{(b_0 + b') (a_1^2 - h^2) 0,0537}{2h[(b'_{\text{я}} + 0,316\bar{b}_c) + 0,0537x]^2} = 2 \frac{dh}{dx} \quad (16)$$

Точное аналитическое решение нелинейного уравнения (16) представляет некоторые математические трудности. Для приближенного определения глубины потока на участке расширения может быть использована следующая зависимость:

$$0,5 \ln \left( \frac{h}{h_{\text{сж}}} \right)^2 - (1 - 2\bar{\varphi}) \ln \frac{\frac{a_i^2}{h_{\text{сж}}^2} - \frac{h^2}{h_{\text{сж}}^2}}{\left( \frac{a_1^2}{h_{\text{сж}}^2} - 1 \right)} = -\frac{0,0537}{\bar{\varphi}} \frac{x}{b_0 + b'} \quad (17)$$

где  $x$  - расстояние от сжатого сечения;  $\bar{\varphi} = \bar{b}'_{\text{я}} + 0,316(1 + \bar{b}') (1 - b'_{\text{я}})$ . Кроме того, может быть получено численное решение уравнения (16) по методу Рунге -Кутты. Результаты вычислений приведены в [7,8,11].



Выражения для скорости у продольной грани перемычки  $u_n$  полученные из решения уравнения сохранения расхода, имеют вид:

на участке растекания

$$m = \frac{u_n}{u_m} = \frac{\frac{u_{oc}}{u_m} \frac{\bar{\theta}}{h} - (\bar{b}'_я + 0,45\bar{b}')}{(1 + b') - (\bar{b}'_я + 0,45\bar{b}')} \frac{h_{сж}}{h} \quad (18)$$

где  $\bar{\theta} = (1 - m')(b'_я + 0,45\bar{b}'_c) + (1 + b')m'$ ,  $m' = \frac{u'_n}{u'_{oc}}$ ;  $u'_n$  - скорость в сжатом сечении;

на участке выравнивания скоростей

$$m = \frac{\frac{u_{oc}}{u_m} - (\bar{b}'_я + 0,55\bar{b}') \frac{h}{h_{сж}}}{0,45 \frac{\bar{b}'_я h}{h_{сж}}} \quad (19)$$

Изменения ширины ядра и пограничного слоя в пределах рассматриваемых участков подчиняются следующим зависимостям:

на участке растекания:

$$\bar{b}'_я = k\varepsilon \quad (20)$$

$$\bar{b}' = 0,8(1 - k\varepsilon) + 0,17\bar{x} \quad (21)$$

на участке выравнивания

$$\bar{b}'_я = k\varepsilon - 0,1(\bar{x} - \bar{L}_p) \quad (22)$$

где

$$\bar{L}_p = 3,68(1 + \bar{b}' - \bar{b}'_я) \quad (23)$$

$$\bar{b}' = (1 + \bar{b}' - \bar{b}'_я) \quad (24)$$

Таким образом, при вычислении гидравлических характеристик потока в стесненной части целесообразно расчленить эту область на участки: сжатия, расширения и выравнивания скоростей.



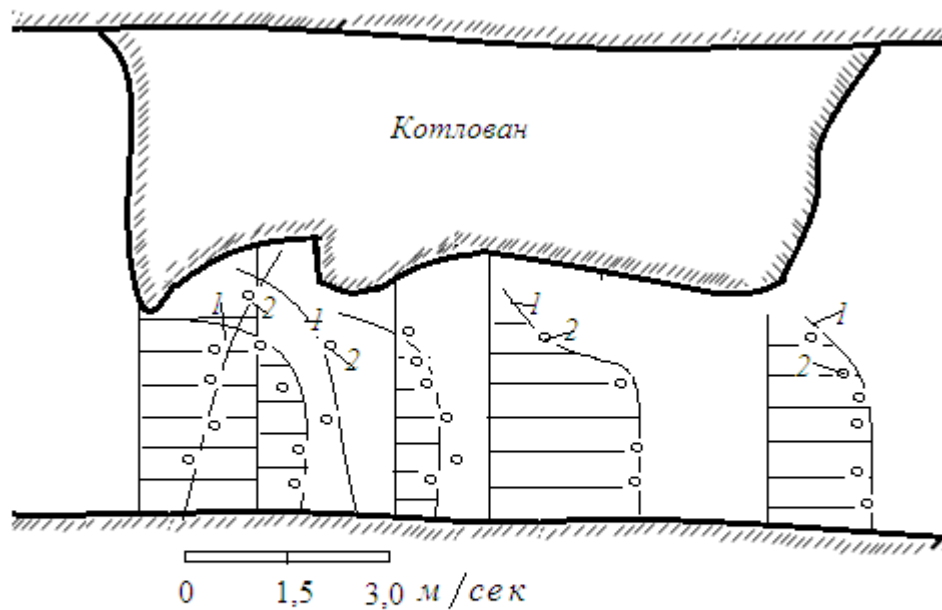


Рис. 5. Сравнение результатов расчета поля скоростей на участке русла р. Сырдарья, стесненного перемычками ГЭС, с натурными измерениями. 1- расчетная эпюра скоростей; 2- натурные данные.

Выполненные исследования позволяют предложить следующий способ и порядок расчета гидравлических характеристик потоков, стесняемых перемычками. Для установления протяженности участка сжатия следует пользоваться таблицей. Распределение скоростей по ширине ядра в любом створе находится по формуле (2). Для расчетного створа устанавливается ширина ядра  $b_j$  согласно (1) и величине экстремальных скоростей. Максимальную скорость в любом створе следует принимать равной максимальной скорости в сжатом сечении  $u_{макс}$ , а величину минимальной скорости  $u_{мин}$  графиками на рис.2.

Ширина пограничного слоя устанавливается с использованием зависимостей (1) и (3), распределение скоростей в этом слое - согласно (4).

Протяженность участка растекания за сжатым сечением вычисляется согласно (23). В случае, когда  $L_p > L_n - L_{cc}$  расчет гидравлических характеристик выполняется с использованием зависимостей (7) и (10) соответственно для установления поля скоростей по ширине ядра и пограничного слоя; (9) - для вычисления скорости в обратном токе. Ширина ядра и пограничного слоя определяются соответственно по формулам (8) и (11).

Для случая, когда  $L_p < L_n - L_{cc}$  т. е. когда продольный водоворот заканчивается в пределах участка стеснения, средняя по сечению глубина вычисляется по уравнению (17). Для установления поля скоростей следует пользоваться формулой (14), по которой вычисляется скорость в ядре потока, и (18) - для вычисления скорости в обратном токе. Распределение скоростей в пограничном слое устанавливается зависимостью (4), в которой  $u_{макс} = u_m$ .

Ширина ядра и пограничного, слоя находится соответственно по формуле (20) и (21). Зависимостью (17) следует пользоваться для установления глубины потока на участке его, где происходит выравнивание скоростей. При этом скорость в ядре и у продольной грани перемычки должны находиться из совместного рассмотрения формул (13) и (17). На этом участке внешняя граница пограничного слоя совпадает с продольной гранью перемычки, а



внутренняя должна вычисляться по зависимости (22). Для построения эпюры скоростей в пределах этого слоя дается формула (10).

Согласно изложенному способу был выполнен расчет поля скоростей р. Сырдарья на участке стеснения русла перемычками ГЭС.

Сравнение результатов расчета с натурными данными, выполненное на рис.5., свидетельствует об удовлетворительности рассмотренного метода.

### Использованные литературы

1. Баланин В. В. Построение поля скоростей в плоской турбулентной струе при неравномерном начальном распределении скоростей по сечению. Труды ЛИИВТ., вып. XIX, 1952.
2. Рубинштейн Г. Л. Расчет режима потока в районе перемычки и крепления у верхового ее угла. Госэнергоиздат, 1960.
3. Аврова Т. Ф. Некоторые гидравлические характеристики потока области сжатия при стеснении русла перемычками. Известия вузов, Энергетика. № 8, 1969.
4. Лебедев И. В. Определение глубины в сжатом сечении спокойного потока при стеснении его русла сооружениями. Труды МЭИ, вып. 36,-. 1961.
5. Михалев М. А. К вопросу о распространении струй капельной жидкости вдоль шероховатой поверхности. Известия ВНИИГ. т. 77, 1965.
6. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. Физматгиз, 1960.
7. Аврова Т. Ф. О растекании потока, стесненного перемычкой за сжатым сечением. Труды ЛПИ, вып. 312, 1971.
8. У.И. Бегимов,Н.А. Усмонова, Х.М. Якубова, С.И. Худайкулов «Моделирование ударного импульса в водовыпускном трубопроводе»каркидонского водохранилища. Журнал «Проблемы механики». – Ташкент, 2020. - №4. – С.45-48.
9. Begimov U. I., Khudaykulov S.I., Narmanov O. A. «Formations of Ventilated Caves and Their Influence on the Safety of Engineering Structures» International Journal of Academic Information Systems Research (IAISR) ISSN: 2643-9026 Vol. 5 Issue 1, January - 2021, Pages: 105-109. 1,05 импакт фактор.Impact Factor.
10. N.A. Usmonova, Prof. S.I. Khudaykulov. Spatial caverns in flows with their perturbations impact on the safety of the karkidon reservoir. 3rd Global Congress on Contemporary Science and Advancements Hosted From New York USA www.econferenceglobe.com. TECHMIND-2021, 126-130.
11. Худайкулов С.И., Жовлиев Ў.Т., Усмонова Н.А. Схемы кавитационных течений многофазной жидкости. Ўзбекистон республикаси олий ва ўрта махсус таълим вазирлиги Фаргона политехника институти «Замонавий бино – иншоотларни ва уларнинг конструкциялари ни лойихалаш, барпо этиш, реконструкция ва модернизация қилишнинг долзарб муаммолари» Республика онлайн илмий – амалий конференция материалларитўплами. 21 – 22 апрель. Фаргона 2021.С: 277-280.

