

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА ГИДРОМЕТРИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ

А.М. Кушер

ГНУ ВНИИГиМ Россельхозакадемии, г. Москва, Россия

Расход воды в гидрометрическом сооружении вычисляется методом "скорость-площадь" на основе расчетного поля скоростей, найденного решением полной системы уравнений Навье-Стокса и уравнения неразрывности [1]. Для расчета свободной поверхности применяется метод VOF [2]. Уравнения записаны в декартовой системе координат и решаются на сетке фиксированных прямоугольных ячеек. Геометрия русла задается указанием ячеек (относительная площадь граней и относительный объем), открытых для потока жидкости. Расход вычисляется в поперечном сечении потока (в верхнем бьефе) как сумма произведений площади грани на скорость в её центре.

Обычно процедура гидродинамического расчета включает следующие этапы:

- геометрическое представление расчетной области;
- создание расчетной сетки, в ячейках которой реализуется конечно-разностная модель дифференциальных уравнений;
- наложение граничных условий;
- собственно, гидравлический расчет;
- анализ результатов.

Проблема достоверности расчета тесно связана с формой расчетной сетки. Сетки бывают регулярные (структурированные) и нерегулярные, ортогональные (гексаэдрические) и тетраэдрические, иногда, с включением призматических элементов. Достоинством нерегулярных сеток является сравнительная гибкость передачи сложной геометрии, а существенным недостатком – трудность задания граничных условий и дополнительные погрешности, связанные с расчетом потоков через грани ячеек и мерами преодоления неустойчивости решений. Недостатком ортогональной прямоугольной сетки является несвязанность сетки с формой твердых границ расчетной области, а важными достоинствами - простота реализации и низкие требования к вычислительным ресурсам. Применение многоблочной и локально измельченной сетки частично решает проблемы точной передачи геометрии, но требует существенных дополнительных затрат машинного времени.

В данной работе рассмотрен алгоритм обработки данных, обеспечивающий снижение погрешности расчета гидрометрических сооружений за счет адаптации прямоугольной расчетной сетки к геометрии сооружения путем совмещения операций геометрического представления твердых стенок и создания расчетной сетки с учетом заданной погрешности расчета.

Для оценки влияния дискретизации расчетной области на точность вычисления расхода проведены расчеты лотка с длинной горловиной в канале с продольным уклоном $i = 0.001$ на регулярной сетке в диапазоне 50-150 шагов дискретизации вдоль потока по оси X ($n_x = 50-150$) при фиксированных значениях n_y и n_z . Узлы XZ сетки привязаны к входу в расчетную область, начало отсчета по

Y - на оси сооружения. Границы YZ сетки совмещены с боковыми стенками канала. Оценка влияния дискретизации по Y выполнена расчетом расхода при $n_y=1-10$. Величина дискретизации по Z $n_z=15$ принята из условия необходимости контроля динамики изменения скоростной структуры потока вдоль сооружения. Для оценки влияния величины дискретизации n_z проведен расчет при $n_x=50$, $n_y=1$, $n_z=40$. Во всех случаях использовалось разработанное входное граничное условие профиль относительных скоростей- парабола (1/7), на выходе- свободное истечение. Погрешность расчета расхода в прямоугольном лотке изменялась в пределах $2 \div 4\%$. Анализ результатов расчетов показал, что систематический тренд в зависимостях погрешности определения расхода от величины шага дискретизации и прямая зависимость точности определения расхода от дискретизации области моделирования в расчетах на регулярной сетке $\delta Q=f(n_x)$, $\delta Q=f(n_y)$ и $\delta Q=f(n_z)$ отсутствует.

С учетом полученных данных был сделан вывод о необходимости разработки способа расчета на трехмерной сетке, согласованной с геометрией сооружения и обеспечивающей заданную точность расчета площади живых сечений. В качестве основных приняты следующие требования к алгоритму расчета:

- минимальное время гидравлического расчета поля скоростей, откуда следует требование минимального числа ячеек дискретизации расчетной области;
- минимальное число шагов дискретизации по вертикальной (Z) оси в интервале от верхней точки дна до уровня верхнего бьефа. Для обеспечения анализа динамики трансформации эпюры скоростей не менее $10 \div 15$;
- число шагов дискретизации каждой секции сооружения в продольном направлении (по X) должно быть достаточным для обеспечения анализа режима течения в сооружении (докритический, сверхкритический или переходный) по зависимости $Fr=f(x)$. С учетом предыдущих исследований минимальное число поперечных сечений каждой секции сооружения $n_x \min=5 \div 10$ с максимальным значением в выходной секции, где в большинстве случаев происходит смена режима течения;
- дискретизация расчетной области по X и Y должна выполняться с учетом геометрии сооружения, так чтобы погрешность расчета объема открытых для потока частей ячеек и площади их граней, нормальных продольной оси X , не превышала заданной погрешности расчета.

Для этого в рассматриваемом методе расчета, в отличие от ранее разработанного, расчетная сетка привязана к уровню воды в верхнем бьефе и стенкам всех секций сооружения. Точки пересечения плоскостей YOZ и XOZ (узлы сетки) совпадают с поверхностью сооружения.

Для реализации указанных требований выполняются следующие операции:

- расчет регулярной X -сетки с привязкой к границам секций и числом шагов дискретизации, достаточным для анализа режима течения при постобработке;
- расчет регулярной Z -сетки с привязкой узлов к входному уровню воды и максимальному уровню дна (на пороге или на входе расчетной области). Шаг сетки задается исходя из выше приведенных требований. Сетка дополняется значениями уровня дна на концах секций сооружения;

- вычисление погрешности расчета объема ячеек и площади поперечных сечений на заданной Z -сетке в X -сечениях расчетной области;

- при отсутствии или малой в сравнении с шагом Z -дискретизации высоте порога Z -сетка корректируется в сторону измельчения, исходя из заданной точности расчета, и расчет повторяется до получения заданной точности;

- при наличии порога (водослив с широким порогом или лоток с вертикальным сжатием) вычисляются точки пересечения Z -сетки с дном сооружения, служащие для коррекции X -сетки на участках сопряжения контрольной секции с каналами. Z -сетка корректируется в интервале уровень порога- минимальный уровень дна до получения заданной точности расчета;

- если число X -сечений в сопрягающих секциях оказывается больше, чем на исходной регулярной X -сетке, то корректируется высота ячеек, исходя из вычисленного распределения погрешностей на регулярной сетке или по закону геометрической прогрессии с переменным числом членов. Далее производится коррекция X -сетки и вычисляются погрешности расчета объема и площади граней ячеек в X -сечениях. Процедура повторяется до получения заданной точности расчета.

Геометрия сооружения образуется совокупностью плоскостей между узлами трехмерной сетки на поверхности твердых стенок. Элементы поверхностей далее заменяются треугольными плоскостями, для каждой из которых вычисляется внешняя нормаль для ориентации в пространстве. Координаты (x,y,z) узлов связаны соотношениями (рис. 1):

$$y = Y1 + (Y2 - Y1) \frac{x - X1}{X2 - X1}$$
$$z = Z1 + (Z2 - Z1) \frac{x - X1}{X2 - X1},$$

где x, y, z - координаты узла на поверхности;

$X1, X2$ - координаты концов секции;

$Y1, Y2$ - профиль сечения на концах секций

$Y1 = f_1(Z1 - Z1_{min}), Y2 = f_2(Z2 - Z2_{min})$;

Z_{min}, Z_{max} – диапазон допустимых значений по вертикали

$$Z_{min} = Z1_{min} + (Z2_{min} - Z1_{min}) \frac{x - X1}{X2 - X1},$$

$$Z_{max} = Z1_{max} + (Z2_{max} - Z1_{max}) \frac{x - X1}{X2 - X1}.$$

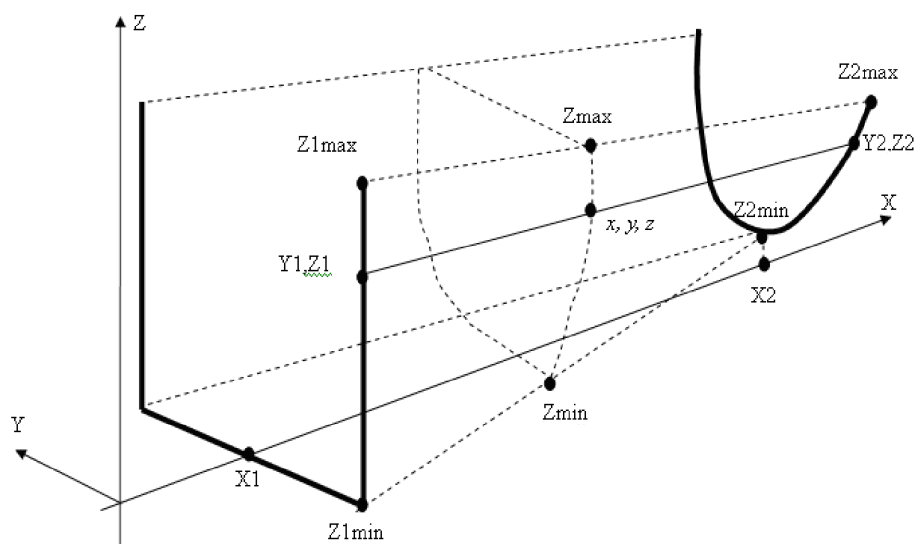
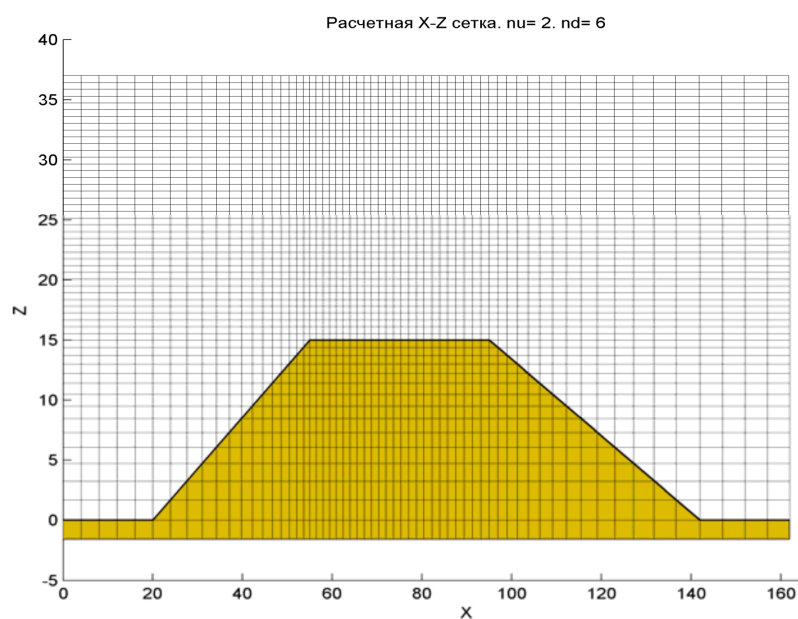


Рисунок 1 - Схема расчета поверхности стенок сооружения

Результаты расчета XZ и YZ сеток рабочей области и соответствующие графики погрешности дискретизации для лотка критической глубины параболической формы в трапециевидальном канале ($\delta S_{\max} = 0.5\%$) приведены на рисунке 2.



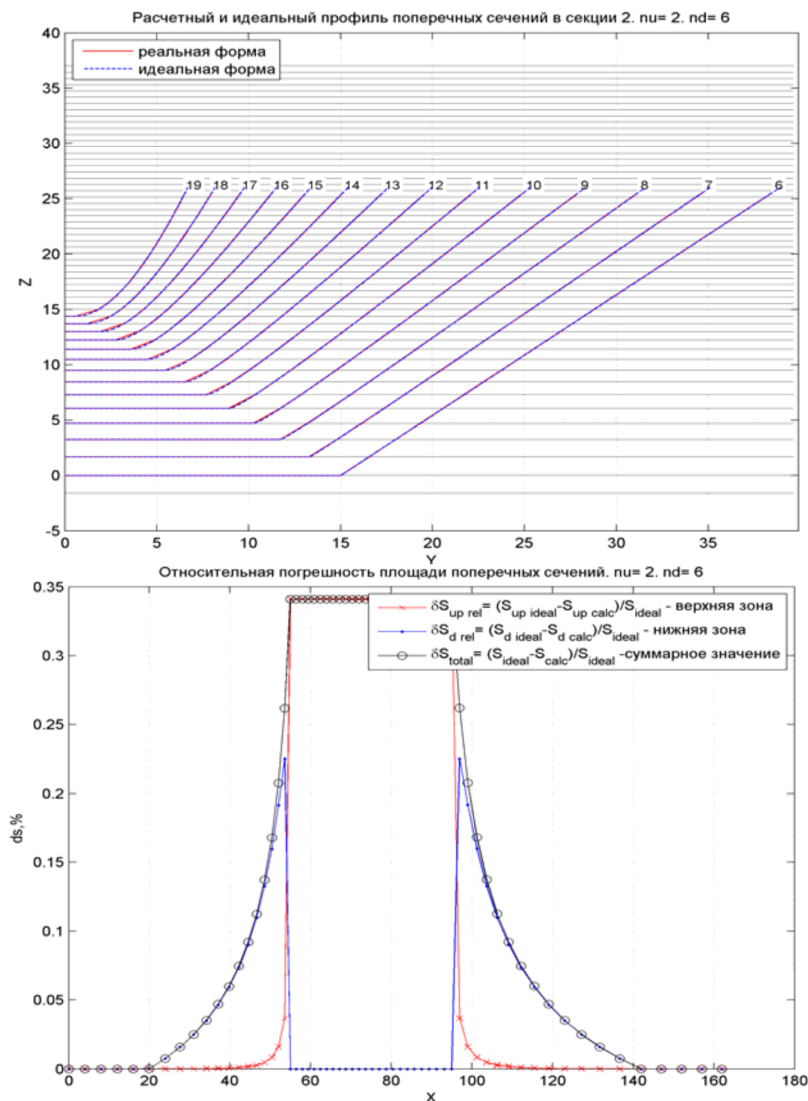


Рисунок 2 - Расчетные XZ и YZ сетки рабочей области и погрешность дискретизации геометрии лотка критической глубины параболической формы в трапецидальном канале

Проверка разработанного метода расчета выполнена по данным экспериментальных исследований прямоугольного и параболического лотков в режиме свободного истечения [3,4]. Для обеспечения максимальной точности измерений были модернизированы средства измерения уровня воды в гидроканале лабораторной гидравлической установки. Электроконтактный уровнемер АПУ-250 с точностью измерений 0,3 мм, служивший для измерения уровня верхнего и нижнего бьефов непосредственно в водном потоке, был заменен на установленные в двух успокоительных колодцах шпитцен-масштабы с точностью измерений 0,1 мм. Точность задания расхода воды (0,5%) обеспечивается мерным водосливом с тонкой стенкой 60°, протарированным объемным способом, а стабильность водоподачи- системой переливных стенок.

Параметры прямоугольного лотка: ширина контрольной секции- 0,143 м, длина контрольной секции- 0,4 м, длина подводящей секции- 0,35 м, длина отводящей секции- 0,472 м. Величина порога $p=0$. Лоток установлен в прямоугольном канале шириной $B=0,3$ м. Параболический лоток установлен в трапецидальный канал с шириной по дну 0,1 м и коэффициентом откоса $m=1$.

Фокальный параметр лотка 0,01406 м, порог $p=0$, длина контрольной секции- 0,35 м, длина подводящей секции- 0,29 м, длина отводящей секции - 0,94 м. Отводящий канал прямоугольной формы шириной $B=0,3$ м [4].

В расчетах прямоугольного лотка различие экспериментальных и расчетных значений расхода не превышала 1% (табл. 1), параболического- 2,7% (табл. 2). Графики экспериментальной расходной зависимости прямоугольного и параболического лотков и вычисленные значения расхода приведены на рисунке 3.

Таблица 1 - Экспериментальный и расчетный расходы прямоугольного гидрометрического лотка

N	Экспериментальный расход, л/сек	Расчетный расход, л/сек	Относительная погрешность, %
1	3,704	3,734192	0,802
2	5,733	5,762148	0,505
3	7,908	7,829857	0,990

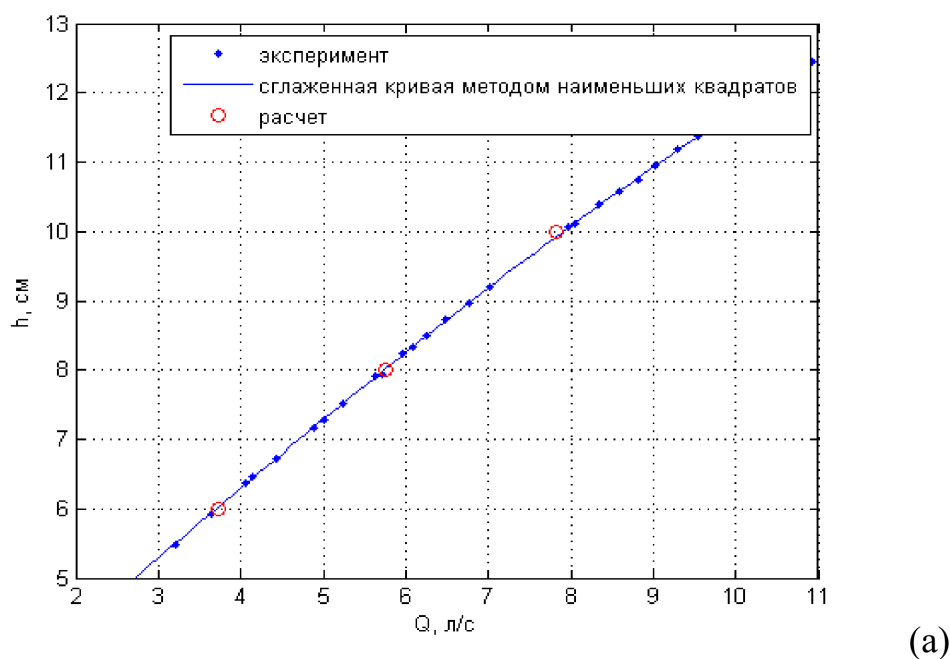
Таблица 2 - Экспериментальный и расчетный расходы параболического гидрометрического лотка

Напор, м	8,20	10,51	12,78	14,21	15,38	17,23
Q_e , см ³ /с	2150	3500	5150	6400	7520	9580
Q_p , см ³ /с	2124,37	3538,89	5273,97	6555,75	7726,53	9793,68
δQ , %	1,20	1,10	2,38	2,40	2,71	2,20

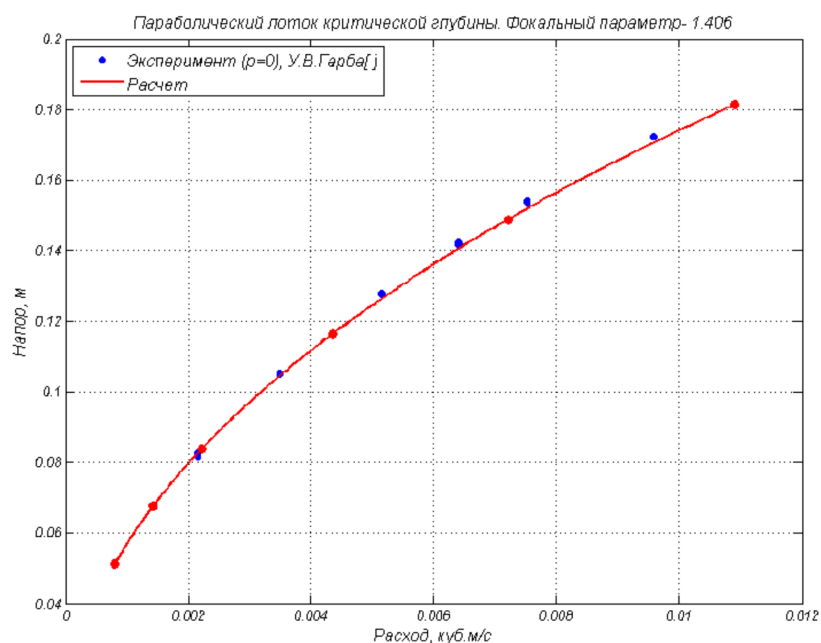
Заключение

Разработанный метод расчета на основе гидромеханического подхода обеспечивает повышение точности определения расходной зависимости гидрометрических лотков за счет уменьшения погрешности дискретизации расчетной области путем автоматической адаптации расчетной сетки к геометрии сооружения.

Разработанная на основе гидромеханического подхода компьютерная технология обеспечивает расчет гидрометрических лотков с точностью, превышающей существующие рекомендации к технологическому и коммерческому водоучету на каналах водохозяйственных систем [5].



(a)



(б)

Рисунок 3 - Экспериментальная и расчетная расходная зависимость прямоугольного (а) и параболического (б) гидрометрического лотка

Литература

1. Кушер А.М. Компьютерная технология расчета гидрометрических сооружений // "Мелиорация и водное хозяйство", №5, 2004.
2. Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, J.Comp.Phys, 39, 201, 1981.
3. НТО «Разработать способы расчета гидрометрических лотков критической глубины», РАСХН, ГНУ ВНИИГиМ, М., 2010г.
4. Вали У.Г. Разработка методов определения пропускной способности гидрометрических лотков в малых трапецидальных каналах. Дисс.на соиск. уч. степ. к.т.н., М., 2002.
5. Кизяев Б.М., Погодаев А.Е., Филиппов Е.Г. Водопользование и водоучет на водохозяйственных и мелиоративных системах агропромышленного комплекса страны.

ВНИИГ и М, М.: