

В. В. Гололобов¹, Н. Н. Завалишин¹✉

Аппроксимация расходов воды кусочно-квадратической функцией от уровня воды по постам Верхней Оби

¹ФГБУ «Сибирский научно-исследовательский гидрометеорологический институт»,
г. Новосибирск, Российская Федерация,
e-mail: znn@sibnigmi.ru

Аннотация. Расход воды через створ реки зависит от многих факторов: конфигурации сечения реки, шероховатости дна и берегов, уклона реки, средней скорости течения, зависимость скорости от глубины реки. С учетом всех этих факторов составляются таблицы зависимости расхода воды от глубины реки в сечении. Целью исследований является аппроксимация расходов воды кусочно-квадратической функцией от отметок глубины реки.

Ключевые слова: таблица расходов, аппроксимация, кусочно-квадратическая, уровень воды

V. V. Gololobov¹, N. N. Zavalishin¹✉

Approximation of water flow rates by a piecewise quadratic function of water level at the Upper Ob stations

¹Siberian Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk, Russian Federation,
e-mail: znn@sibnigmi.ru

Abstract. The flow rate of water through a river gate depends on many factors: the configuration of the river cross-section, the roughness of the riverbed and banks, the slope of the river, the average flow rate, and the dependence of the flow rate on the depth of the river. Taking all these factors into account, tables are compiled that show the dependence of the flow rate of water on the depth of the river in the cross-section. The purpose of these studies is to approximate the flow rates of water using a piecewise quadratic function based on the depth of the river.

Keywords: flow rate table, approximation, piecewise quadratic, water level

Введение

Как, зная отметки по глубине реки, найти соответствующие расходы реки в данном створе? Наибольшего успеха в решении поставленного вопроса добились для рукотворных открытых каналов. Что естественно: все параметры каналов спроектированы и построены человеком. Введен государственный стандарт вычисления расходов воды в каналах [1]. Выдано свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [2] с целью вычисления расхода воды в открытых каналах по методу "уклон - площадь". Отметим ещё две статьи с сечением канала треугольного вида [3] и, что особенно важно для нашего исследования, с сечением в виде трапеции [4]. В последнем случае расход пропорционален квадратической функции от глубины реки.

Модель

Расход воды Q , протекающей через створ, определяется произведением площади сечения створа S на среднюю скорость воды в створе V . Площадь створа, рис. 1, состоит из прямоугольника и двух треугольников по бокам. Иначе говоря, площадь сечения есть многочлен второй степени относительно параметра h .

Тогда расход воды через створ равен

$$Q(h) = V \left(\frac{(\operatorname{ctg}(v) + \operatorname{ctg}(w))}{2} h^2 + dh \right) + q = ah^2 + bh + q \quad (1)$$

Коэффициент q задает расход воды ниже трапеции,

$$a = \frac{V(\operatorname{ctg}(v) + \operatorname{ctg}(w))}{2}, \quad b = Vd$$

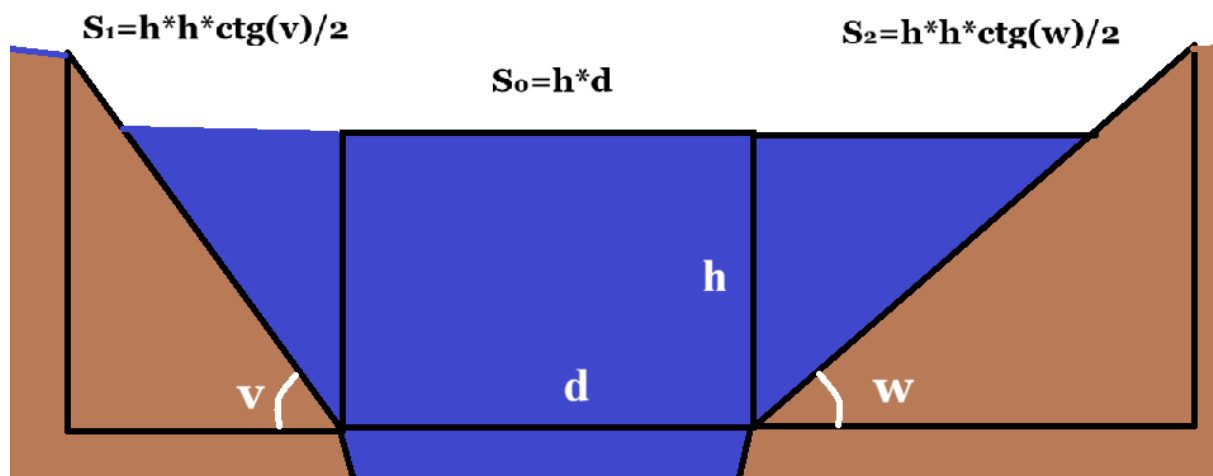


Рис. 1. Схема участка створа реки глубиной h , углом наклона берегов v , w и дном d .

Анализ начнем со створа «Бердь-Старый Искитим». В нашем распоряжении есть таблица расходов воды Q от глубины h , с шагом $h=1$ см, представленная специалистами Гидрометцентра Западно-Сибирского УГМС (табл. 1).

Подберем коэффициенты a , b , q уравнения (1) методом минимальных квадратов, рассматривая только нулевой столбец табл. 1. Перенумеруем отметки глубины, начиная с 1 для отметки 60 см, 2 для отметки 70 см и так далее до 31 для отметки 320 см.

Таблица 1. Фрагмент таблицы зависимости расхода воды от отметок уровня воды по створу Бердь-Старый Искитим

Н, см	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
60	15,2	15,8	16,4	17,1	17,8	18,4	19,1	19,8	20,5	21,2
70	21,9	22,6	23,3	24,1	24,8	25,6	26,3	27,1	27,9	28,7
80	29,5	30,3	31,1	31,9	32,7	33,6	34,4	35,3	36,1	37,0
90	37,9	38,7	39,6	40,5	41,4	42,3	43,2	44,2	45,1	46,0
100	47,0	47,9	48,9	49,8	50,8	51,8	52,8	53,8	54,8	55,8

Значения коэффициентов: $a=0,339$ $b=4,90$ $q=12,8$

Например, для глубины номер 5 (отметка 100 см) расход по таблице равен 47 м³/сек, а по оценке параболической моделью равен 46 м³/сек; для глубины номер 15 (отметка 200 см) расход по таблице равен 172 м³/с, а по модели равен 163 м³/сек.

В предположении, что найденная связь сохранится с ростом глубины, продолжили модель на несколько точек вперед (рис. 2).

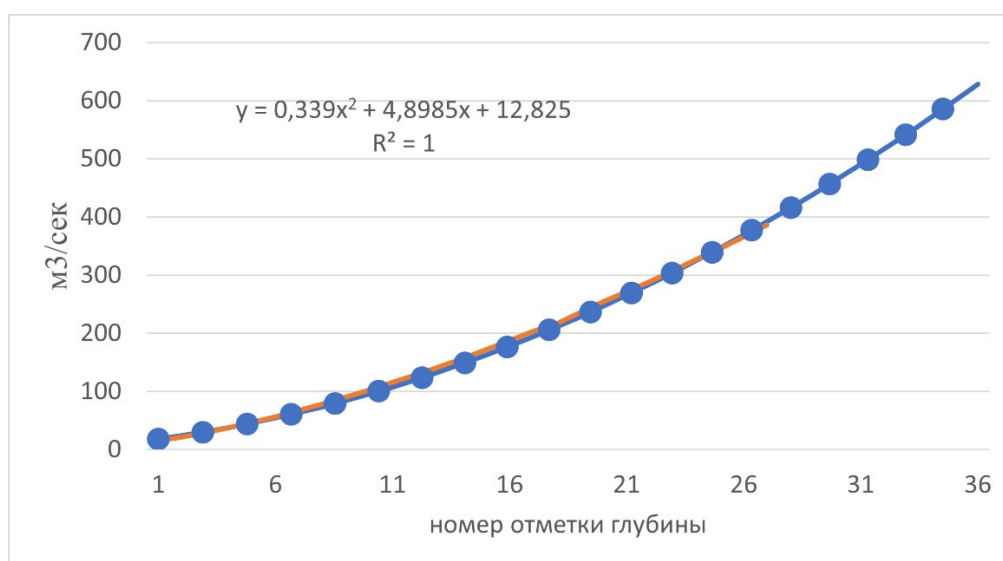


Рис. 2. Расход воды через створ Бердь-Старый Искитим (красный) и его аппроксимация с прогнозом параболической функцией (синий).

Среднеквадратическое отклонение разницы между табличным значением и модельным составляет 4,52 м³/сек. При среднем потоке в 172 м³/сек два СКО составляют около 5%, что вполне приемлемо.

Следующий вопрос: изменения наклона берега. Тогда изменятся коэффициенты уравнения (1) и наша задача уловить эти изменения. Рассмотрим более сложный вариант: створ «Обь-Барнаул». На рис. 3 приведена разность между

фактом и моделью (1), где модель построена для всего ряда данных. Полученные коэффициенты:

$$a=0,503 \quad b=35,8 \quad q=611$$

Из рис. 3 видно, что есть три точки в которых модель начинает вести себя «по-другому». На интервале $-30 \div 100$ см разница между фактом и моделью почти не меняется, но она начинает расти на интервале $110 \div 260$ см, потом падает на интервале $270 \div 440$ см и, наконец, снова растет на интервале $450 \div 570$ см. Итак, нам предстоит построить четыре модели на указанных интервалах.



Рис. 3. Разница между табличными значениями расхода воды в створе Обь-Барнаул и модельными значениями в зависимости от отметок глубины реки.

В табл. 2 представлены коэффициенты параболических моделей.

Таблица 2. Коэффициенты параболических моделей расходов воды по створу Обь-Барнаул и СКО между табличным и модельным значением расхода воды

Интервал отметок глубины (см)	a (м/сек)	b (м ² /сек)	q (м ³ /сек)	СКО (м ³ /сек)
-30 ÷ 570	0,503	35,8	611	28,3
-30 ÷ 100	0,436	36,5	603	1,72
110 ÷ 260	0,515	52,4	1204	4,76
270 ÷ 440	0,421	61,8	2178	2,65
450 ÷ 570	0,944	88,8	3431	2,80

В последующих таблицах под номерами 3-5 представлены результаты для створов: Бия-Бийск, Катунь-Сростки и Чумыш- Тальменка.

Таблица 3. Коэффициенты параболических моделей расходов воды по створу Бия-Бийск и СКО между табличным и модельным значением расхода воды

Интервал отметок глубины (см)	a (м/сек)	b (м ² /сек)	q (м ³ /сек)	СКО (м ³ /сек)
50 ÷ 350	0,950	32,2	175	13,8
50 ÷ 110	2,06	14,9	224	1,02
120 ÷ 270	0,972	47,7	427	2,12
280 ÷ 350	0,488	74,6	1434	1,06

Таблица 4. Коэффициенты параболических моделей расходов воды по створу Катунь-Сростки и СКО между табличным и модельным значением расхода воды

Интервал отметок глубины (см)	a (м/сек)	b (м ² /сек)	q (м ³ /сек)	СКО (м ³ /сек)
210 ÷ 570	0,951	47,0	144	44,5
210 ÷ 300	0,992	31,6	236	1,10
310 ÷ 360	1,25	65,1	654	0,65
370 ÷ 480	0,0	97,0	1070	4,83
490 ÷ 570	0,0	100,0	2260	0,0

Таблица 5. Коэффициенты параболических моделей расходов воды по створу Чумыш-Тальменка и СКО между табличным и модельным значением расхода воды

Интервал отметок глубины (см)	a (м/сек)	b (м ² /сек)	q (м ³ /сек)	СКО м ³ /сек)
-30 ÷ 570	0,503	35,8	611	28,3
-30 ÷ 100	0,436	36,5	603	1,72
110 ÷ 260	0,515	52,4	1204	4,76
270 ÷ 440	0,421	61,8	2178	2,65
450 ÷ 570	0,944	88,8	3431	2,80

Сравнение точностей аппроксимации общей для всего ряда с моделями с кусочно-квадратической аппроксимацией этого ряда, показывает улучшение качества на порядок, с максимальной ошибкой по СКО не превышающей 5 м³/сек.

Отдельный вариант – выход воды на пойму, что делает пренебрежимо малым влияние квадратичного члена в (1). Отметим особенность поведения модели «Катунь-Сростки» на интервалах 370÷480 см и 490÷570 см. В обоих случаях отсутствует квадратичный член. Это свидетельствует о том, что на этих участках вода выходит на пойму.

Заключение

Мерой синхронности изменений факта и модели является квадрат коэффициента корреляции между ними, который для моделей всех типов практически равен единице.

Для тех исследований, в которых допускаются ошибки, грубо говоря, до двух СКО, то есть порядка 50-100 м³/сек, можно пользоваться общей моделью, а для более тонких исследований, с ошибками 5-10 м³/сек, нужно применять кусочно-квадратическую модель.

Предложена кусочно-квадратическая аппроксимация таблиц расходов воды в зависимости от глубины для створов Верхней Оби, заменяющая массивы из сотен чисел аналитическим выражением, содержащим 3-12 коэффициентов. Модель улавливает изменения наклона берегов.

Благодарность

Авторы выражают признательность специалистам Гидрометцентра ЗапСиб УГМС за совместную работу по созданию метода прогноза притока воды в Новосибирское водохранилище и предоставление таблиц расходов воды по створам Верхней Оби.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. Государственная система обеспечения единства измерений. Расход воды на реках и каналах. Методика выполнения измерений методом "скорость - площадь": МИ 1759-87: утв. ФГУП ВНИИФ 11.06.86: введ. в действие с 01.01.88. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 19 с.
2. Определение расхода воды в открытых каналах по методу "уклон - площадь": свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № 2019662079 / Вайнберг М. В., Чураев А. А.; правообладатель Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. Заявка № 2019660924; заявл. 05.09.19; опубли. 16.09.19, Бюл. № 9. 1 с. EDN: AOCHGD
3. Чураев А. А., Юченко Л. В. К вопросу об использовании гидрометрического сооружения типа «фиксированное русло» в качестве средства измерения в открытом канале // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2022. – № 2 (86). – С. 74-83.
4. Чураев А. А., Юченко Л. В., Шепелев А. Е. Принципы подхода к расчету основных параметров трапецеидального водослива при оснащении его современным прибором измерения уровня // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета [Электронный ресурс]. – 2023. – № 192(08). – С. 158-168. URL: <http://ej.kubagro.ru/2023/08/pdf/13.pdf> (дата обращения: 24.04.2024). DOI: 10.21515/1990-4665-192-013 EDN: GHFU

© В. В. Гололобов, Н. Н. Завалишин, 2026