



УДК 551. 018

## Определение расходов воды речных потоков при минимуме полевых измерений

Г. С. Мазур

**Аннотация.** Анализируются коэффициенты перехода от максимальных поверхностных скоростей к средним по сечению потока в створах рек Ангары, Лены, Витима, Енисея и их притоков. Получена зависимость расходов воды от максимальной скорости, максимальной глубины, ширины потока и коэффициента формы русла для четырёх групп рек в зависимости от условий движения. Расчётные зависимости могут использоваться при гидрологических изысканиях гидротехнических сооружений и работниками гидрологических станций.

**Ключевые слова:** расход воды, коэффициенты скорости, детальный расход, параметр Шези, уклон, шероховатость, гидроствор, параметр формы русла, стрежень, устойчивость русла, извилистость, гидроморфологические параметры, группы рек, максимальная скорость, средняя скорость в сечении.

### Введение

Измерения расходов воды на ряде рек России начались в 20-е гг. прошлого столетия. Через 50 лет число створов измерений достигло максимального количества. Затем начался период стабилизации и незначительного уменьшения их числа. После 90-х гг. происходило сокращение сети станций и постов. К настоящему времени в Иркутской области почти в два раза уменьшилось число гидростворов для измерения расходов воды, уменьшилась частота измерений расходов в течение года, перестали измеряться уклоны водной поверхности. Причины сложившейся ситуации известны: недостаточный уровень финансирования, ухудшение материальной базы станций, разрушение действовавших ранее установок дистанционного измерения расходов воды ГР-70, отсутствие средств на приобретение современных приборов и оборудования.

Необходимость уменьшения объёма полевых измерений вызвана невозможностью выполнения измерений вертушкой в период ледохода, требованиями сокращения сроков измерения срочных расходов в период подъёма паводковой волны, при интенсивных сбросах воды в нижнем бьефе ГЭС. Поплавки применяют при большом содержании в потоке взвешенных наносов, при большом количестве плывущих водорослей, при малых скоростях течения, которые не улавливаются вертушкой, при сбойном течении на горных реках.

Задачей данного исследования является разработка методов расчёта расходов воды при измерении или расчёте только трех характеристик потока: наибольшей поверхностной скорости течения на стрежне, ширины потока, наибольшей глубины – эхолотом, лотом или гидрометрической штангой. В измерениях вертушка не используется.

### **Методы определения расходов воды в стационарных створах гидрологических станций**

Основным способом определения расходов воды в стационарных створах гидрометеослужбы России является метод «скорость – площадь» [1, 6]. До 70-х гг. измерение расходов выполнялось детальным способом. На скоростных вертикалях скорости измерялись в 5 точках на следующих глубинах: у поверхности, на глубине  $0,2 h$ ,  $0,6 h$ ,  $0,8 h$  и у дна. В последние 30 лет число измеренных скоростей каждого расхода сократилось примерно в 5 раз из-за уменьшения точек на вертикалях и числа вертикалей. Скорости измерялись и продолжают измеряться сейчас в двух точках глубины:  $0,2 h$  и  $0,8 h$ . Сейчас этот метод считается основным методом измерения расходов. Есть и сокращённый метод измерения скорости – в одной точке глубины вертикали ( $0,6 h$ ). В период ледохода скорости рассчитываются по времени движения льдин.

Расходы воды, определённые по скоростям течения на поверхности потока, являются завышенными (фиктивными). Для перехода от фиктивных расходов к действительным вводятся коэффициенты  $K_1$  или  $K_2$  в зависимости от измерения поверхностных скоростей по всей ширине потока или только в его стрежневой части [6].

В первом случае определяется продолжительность движения поплавка и место пересечения им центрального створа. На малой реке местоположение поплавка фиксируется по размеченному тросу, на большой широкой реке – засечками теодолитом. Работы на большой реке довольно трудоёмкие и продолжительные.

Во втором случае измеряется скорость движения 5 поплавков на стрежне без определения координат движения поплавков. Для расчёта используется средняя скорость трёх самых быстрых поплавков.

Измерения скоростей сочетаются с измерениями глубин по ширине потока.

Расход воды при измерении только поверхностных скоростей поплавками рассчитывается по формуле

$$Q = KV_{\text{пог}}\omega,$$

где  $\omega$  – площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ ;  $K$  – коэффициент перехода от фиктивного расхода к действительному расходу. При измерении поверхностных скоростей по ширине потока вводится коэффициент  $K = K_1$ , при измерении скорости на стрежне  $K = K_2$ .

Коэффициенты перехода от фиктивных расходов к действительным рассчитываются по скоростям детальных расходов воды

$$K_1 = \frac{V_{нов}}{V_{cp}}; K_2 = \frac{V_{max}}{V_{cp}},$$

где  $V_{нов}$  – средняя поверхностная скорость по ширине потока, м/с;  $V_{max}$  – наибольшая на поверхности скорость течения, м/с;  $V_{cp}$  – средняя скорость в поперечном сечении, м/с.

При отсутствии детальных расходов коэффициенты принимаются по таблице [6] или рассчитываются по гидравлическим зависимостям [3, 4].

В дальнейшем рассматриваются только коэффициенты  $K_2$  и равные им  $K_v$ .

### Предложения по определению $K_2$

Таблица значений  $K_2$ , полученная в конце 50-х гг., предполагает изменение  $K_2$  в пределах от 0,43 до 0,79 при изменении средней глубины потока от менее 1 до 5 и более метров [6]. Коэффициенты  $K_2$  получены обобщением натуральных измерений на реках с различными условиями протекания (табл. 1).

После 1957 г., когда была опубликована эта таблица, разработана ещё одна таблица коэффициентов  $K_2$ , в которой, наряду с описанием русел, даётся описание пойм [5]. Изменение значений  $K_2$  для русел в 4 раза меньше, чем в табл. 1. В табл. 2 появилась отдельная строка для лесных пойм.

Таблица 1

Значения коэффициента  $K_2$  [6]

| Условия протекания  | Средняя глубина, м |           |           |
|---|--------------------|-----------|-----------|
|   | менее 1 м          | 1–5 м     | более 5 м |
| Благоприятные<br>(реки большие и средние)   | 0,55–0,67          | 0,68–0,77 | 0,78–0,79 |
| Менее благоприятные<br>(реки значительно засорённые, заросшие,<br>извилистые, каменистые) | 0,43–0,54          | 0,55–0,65 | 0,66–0,70 |
| Ухудшенные<br>(заросли, кочки, местами стоячая вода; гор-<br>ные реки с бурным течением)  | –                  | 0,43–0,60 | 0,61–0,66 |

Таблица 2

Значения  $K_2$  [5]

| Характеристика русла (поймы)  | Средняя глубина, м |       |           |
|---|--------------------|-------|-----------|
|   | менее 1 м          | 1–5 м | более 5 м |
| Русла прямые, чистые, земляные  | 0,64               | 0,66  | 0,67      |
| Русла извилистые, каменистые.<br>Поймы с травой, редким кустарником                               | 0,60               | 0,63  | 0,65      |
| Русла и поймы, значительно заросшие с глу-<br>бокими промоинами                                   | 0,55               | 0,59  | 0,62      |
| Русла извилистые, сложенные из крупных<br>валунов. Поймы со сложными косоструйны-<br>ми течениями |                    |       |           |
| Поймы сплошь лесные, таёжного типа  | 0,46               | 0,56  | 0,60      |

Недостатком обеих таблиц является объединение в одну категорию равнинных и горных рек при малых глубинах наполнения.

В 60–70-х гг. были разработаны формулы, которые предлагают рассчитывать  $K_2$  при отсутствии измерений поверхностных скоростей [3]. Формулы основаны на зависимости  $K_2$  от коэффициента Шези. Наиболее простой является эмпирическая зависимость И. И. Херхеулидзе [3]

$$K_2 = 0,44(C)^{0,11}, \quad (1)$$

где  $C$  – параметр Шези

$$C = \frac{1}{n} h_{cp}^{\frac{1}{6}},$$

который зависит от гидравлической шероховатости  $n$  и средней глубины потока  $h_{cp}$ , м.

Для сравнения с данными табл. 1 выполнены расчёты  $K_2$  по формуле (1) при значениях  $n$  равных 0,020 (благоприятные условия) и 0,100 (ухудшенные условия) при глубинах 5 и 1 м (табл. 3).

Таблица 3

Рассчитанные по формуле (1) значения  $K_2$

| Глубина, м | Шероховатость |       |
|------------|---------------|-------|
|            | 0,020         | 0,100 |
|            | $K_2$         |       |
| 5          | 0,70          | 0,58  |
| 1          | 0,68          | 0,57  |

Результаты расчётов не соответствуют данным табл. 1, особенно при повышенной шероховатости. Коэффициенты практически не зависят от глубины, а только от шероховатости. При изменении шероховатости в 5 раз, коэффициенты  $K_2$  изменяются только в 1,2 раза. Гидравлическая шероховатость не измеряется, а находится через среднюю скорость потока и уклон водной поверхности. При отсутствии измерения скорости и уклона шероховатость принимается по специальным таблицам описательного характера, что вносит элементы субъективизма в выбор её значений.

Через 15 лет была предложена зависимость, в которой, кроме коэффициента Шези, учтены коэффициенты формы русла  $\varphi_p$  и эпюры скорости  $\varphi_v$  [4]

$$K_{\max} = \frac{(2\varphi_p^2 + \varphi_p)K}{\varphi_v(5\varphi_p - 2)}, \quad (2)$$

где  $K_{\max} = \frac{v_m}{v_n}$ ;  $K = f(C)$ .

Коэффициент формы эпюры скорости  $\varphi_v$  рассчитывается по максимальной  $v_m$  и средней по ширине потока поверхностной скорости  $v_n$ . Точность расчёта напрямую зависит от выбора гидравлической шероховатости.

В последние годы, когда существенно уменьшились возможности измерений расходов воды гидрометрическими вертушками, всё большее значение будут приобретать методы определения средних скоростей течения по формулам без учёта в явном виде коэффициента шероховатости.

### Предлагаемая формула определения расхода воды

При измерении скоростей течения в стандартных точках скоростных вертикалей расход воды рассчитывается по формуле (6)

$$Q = V_{cp} h_{cp} B,$$

где  $V_{cp}$  – средняя в сечении скорость потока,  $h_{cp}$  – средняя глубина,  $B$  – ширина потока.

При умножении и делении правой части уравнения на произведение наибольшей глубины  $h_{max}$  и наибольшей поверхностной скорости  $V_{max}$  получается выражение с двумя безразмерными гидроморфологическими параметрами потока  $K_v$  и  $K_h$

$$Q = K_v K_h V_{max} h_{max} B, \quad (3)$$

где

$$K_v = \frac{V_{cp}}{V_{max}}; \quad K_h = \frac{h_{cp}}{h_{max}}.$$

Произведение коэффициентов является комплексной характеристикой потока

$$K_{vh} = K_v K_h$$

Теперь формулу (3) можно представить в виде

$$Q = K_{vh} V_{max} h_{max} B. \quad (4)$$

Для определения расхода воды по зависимости (3) или (4) необходимо измерить наибольшую поверхностную скорость на стрежне, наибольшую по ширине потока глубину, расстояние между урезами  $B$ , рассчитать или назначить коэффициенты  $K_v$ ,  $K_h$ ,  $K_{vh}$ .

К настоящему времени накоплен чрезвычайно большой объём данных о расходах, скоростях и глубинах потока, которые получены измерениями в стационарных створах с помощью приборов по всему сечению потока или только на его поверхности.

Задачей исследования является определение численных значений  $K_v$ ,  $K_h$ ,  $K_{vh}$  и статистической оценки их изменчивости на реках больших и малых, протекающих в благоприятных и неблагоприятных условиях.

### **Исходные данные. Краткая характеристика рек региона**

Для расчёта и анализа коэффициентов использованы наблюдения в 82 створах рек Ангары, Лены, Витима, Енисея и некоторых их притоков. Всего рассмотрено 3427 расходов воды, измеренных после 1937 г.

В рассматриваемом регионе большие реки отличаются малой извилистостью, имеют галечное, песчано-галечное дно или скальные берега. Поймы небольшие или отсутствуют. Берега крутые, высокие, не размываются. При низких уровнях поток управляется рельефом дна, при высоких – крутыми берегами. Глубины потока превышают 3 м.

Река Ангара, которая пересекает всю Иркутскую область, до 1955 г. находилась в естественном состоянии, исключая небольшой участок в районе г. Ангарска, где производилась широкомасштабная добыча гравия из русла реки, пойменных проток и с поверхности поймы.

До строительства ГЭС сток реки изучался в 19 створах. В настоящее время осталось только 3 речных гидроствора, измерения на которых можно использовать для анализа коэффициентов в современных условиях. Большая часть наблюдений р. Ангары, использованных в данной работе, относится к периоду до зарегулирования стока.

На средних и малых реках предгорных участков поток отличается извилистостью, укрупнением донных отложений, русловой и пойменной многоруканностью, захламлённостью русла карчами и древесиной с образованием заломов. Последние при низких уровнях ещё больше искривляют течение, усиливают воздействие на пойменные берега и вызывают их разрушение. Русло большинства рек песчано-галечное, с островами и осередками. Высота берегов от 2 до 6 м, вода выходит на пойму в годы высоких паводков редкой обеспеченности. Поймы рек застроены жилыми строениями и дачами, распаханы. Реки пересекают мостовые переходы с глухими дамбами, которые перекрывают течение воды по пойме. Из русел рек у берегов производится несанкционированная выборка гравия, которая влияет на скорости течения, изменяет рельеф дна, форму поперечного сечения и уклоны водной поверхности. В последние годы на ряде средних и малых рек происходит снижение уровня (просадка) из-за увеличения поперечного сечения русла при выборке гравия, в результате чего пойма затопляется на меньшую глубину, больше воды проходит в пределах коренного русла. Увеличение концентрации потока в основном русле усиливает разрушение берегов.

Малые горные реки отличаются от равнинных большей крупностью донных отложений. Это крупная галька и валуны. Течение сбойное, берега устойчивые, поймы нет или она небольшая. Уклоны составляют более 5 м/км, наибольшие скорости могут превышать 3 м/с, глубины от 0,3 до 1,5 м. Русла отличаются высокой гидравлической шероховатостью 0,050–0,15.

Значения гидроморфологических параметров некоторых рек выборки данных приведены в табл. 4–7.

Таблица 4

Максимальные значения параметров потока в истоке и устье р. Ангары

| Гидроствор           | Расход,<br>м <sup>3</sup> /с | Средняя скорость,<br>м/с | Ширина,<br>м | Средняя<br>глубина, м |
|----------------------|------------------------------|--------------------------|--------------|-----------------------|
| Гм. ст. Исток Ангары | 5520                         | 2,58                     | 1130         | 4,50                  |
| дер. Татарка         | 18 200                       | 1,46                     | 1930         | 6,20                  |

В гидростворах г. Ангарск, Падунский порог, г. Братск, с. Дубынино максимальные глубины до зарегулирования достигали 8–9 м. Наибольшая глубина по длине р. Ангары была в пос. Балаганск (11,6 м).

В 1957 г. в канале Иркутской ГЭС в яме приплотинного размыва сформировалась глубина 7,8 м при очень низком расходе воды 1400 м<sup>3</sup>/с.

Максимальные глубины более 10 м измерены в створах рек Лены, Витима, Енисея, Подкаменной Тунгуски.

Таблица 5

Наибольшие и наименьшие значения гидроморфологических параметров больших рек

| Параметры створа             | р. Ангара<br>дер. Татарка | р. Лена<br>пос. Змеино-<br>ново | р. Витим<br>г. Бодайбо | р. Енисей<br>Подкаменная<br>Тунгуска | р. Подкаменная<br>Тунгуска<br>факт. Чёрный остров |
|------------------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------------------|---|
| Расход,<br>м <sup>3</sup> /с | $\frac{18200}{3600}$      | $\frac{5360}{488}$              | $\frac{15600}{1370}$   | $\frac{61200}{8020}$                 | $\frac{26760}{1213}$                              |
| Ширина,<br>м                 | $\frac{1930}{1890}$       | $\frac{302}{267}$               | $\frac{483}{415}$      | $\frac{1850}{1610}$                  | $\frac{804}{568}$                                 |
| Средняя<br>глубина,<br>м     | $\frac{6,20}{2,50}$       | $\frac{7,40}{4,50}$             | $\frac{11,30}{2,92}$   | $\frac{17,50}{5,50}$                 | $\frac{14,60}{4,00}$                              |
| <i>n</i>                     | $\frac{0,031}{0,021}$     | $\frac{0,054}{0,023}$           | $\frac{0,060}{0,016}$  | $\frac{0,039}{0,017}$                | $\frac{0,035}{0,022}$                             |
| Уклон,<br>м/км               | $\frac{0,16}{0,10}$       | $\frac{0,40}{0,01}$             | $\frac{0,95}{0,07}$    | $\frac{0,10}{0,03}$                  | $\frac{0,015}{0,010}$                             |
| <i>K<sub>v</sub></i>         | $\frac{0,73}{0,60}$       | $\frac{0,77}{0,63}$             | $\frac{0,84}{0,71}$    | $\frac{0,80}{0,61}$                  | $\frac{0,80}{0,68}$                               |
| <i>K<sub>h</sub></i>         | $\frac{0,88}{0,81}$       | $\frac{0,65}{0,61}$             | $\frac{0,88}{0,77}$    | $\frac{0,70}{0,44}$                  | $\frac{0,77}{0,54}$                               |
| <i>K<sub>vh</sub></i>        | $\frac{0,63}{0,40}$       | $\frac{0,49}{0,41}$             | $\frac{0,72}{0,58}$    | $\frac{0,55}{0,28}$                  | $\frac{0,55}{0,39}$                               |

Малые водотоки, измерения которых использованы в расчётах, имеют свои особенности (табл. 6). Гидравлическая шероховатость трёх рек этой категории изменяется в 4 раза, глубины менее 1,5 м, ширина основного русла до выхода на пойму составляет 5–12 м.

Для анализа гидроморфологических параметров использованы расходы воды, измеренные детальным и основным способом вертушкой и поплавками на больших, средних и малых водотоках.

В настоящее время при наличии вертушки все расходы в стационарных створах определяются основным способом. В этом случае наибольшие скорости в таблицах измеренных расходов воды (ИРВ) выбраны из скоростей не на поверхности, а на глубине  $0,2 h$  от поверхности, поэтому они меньше или равны поверхностной скорости в зависимости от формы эпюры распределения скоростей по глубине. Поэтому для основных расходов воды выполнялось приведение скоростей  $V_{0,2h}$  к скоростям на поверхности потока.

Таблица 6

Гидроморфологические параметры малых равнинных рек

| Параметры створа             | р. Каран дер. Тымбыр | р. Хингуйка с. Укар | р. Залари пос. Новонукутский |
|------------------------------|----------------------|---------------------|------------------------------|
| Расход, м <sup>3</sup> /с    | 0,25–1,43            | 1,4–12,5            | 0,45–14,7                    |
| Ширина, м                    | до 5 м               | 6,5–14              | 12,0–26,0                    |
| Средняя глубина потока, м    | 0,5–1,0              | 0,5–1,5             | 0,8–1,3                      |
| Гидравлическая шероховатость | 0,066–0,088          | 0,022–0,029         | 0,019–0,035                  |
| Уклон, м/км                  | 0,17–1,11            | 0,20–0,36           | 0,0012–0,33                  |
| Коэффициент $K_v$            | 0,61–0,75            | 0,62–0,70           | 0,55–0,60                    |

Таблица 7

Гидроморфологические параметры малых горных рек

| Параметры створа             | р. Шаманка г. п. Шаманка | р. Нестериха дер. Нестериха (о. русло) | р. Уро с. Большое Уро |
|------------------------------|--------------------------|--|-----------------------|
| Расход, м <sup>3</sup> /с    | 1,43–14,4                | 1,26–13,0                              | 0,78–5,40             |
| Ширина, м                    | 8,1–14,0                 | 8,1–11,1                               | 10,6–12,9             |
| Средняя глубина потока, м    | 0,34–0,67                | 0,36–0,73                              | 0,32–0,91             |
| Гидравлическая шероховатость | 0,042–0,090              | 0,062–0,150                            | 0,074–0,150           |
| Уклон, м/км                  | 7,0–8,4                  | 14,0–15,0                              | 0,7–5,3               |
| Коэффициент $K_v$            | 0,57–0,70                | 0,41–0,53                              | 0,41–0,51             |

### Методика обработки опытных данных

К сожалению, не сохранились полевые материалы измерений детальных расходов за прошлые годы, поэтому не было возможности сравнить скорости на поверхности со скоростями на глубине  $0,2 h$ . Определение максимальных скоростей на поверхности потока при основном способе измерения расхода выполнено аналитически по формулам В. Н. Гончарова [2].

Для условий плоского потока без учёта влияния берегов средняя скорость потока определяется формулой

$$V = 4 \lg\left(\frac{6,15h_{cp}}{\Delta}\right) \sqrt{2gh_{cp}i}, \quad (5)$$

где  $\Delta$  – высота выступов на дне, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $i$  – уклон свободной поверхности.

Наибольшая скорость  $V_{\max}$  на поверхности вертикали с наибольшей глубиной  $h_{\max}$  составляет

$$V_{\max} = 4 \lg\left(\frac{16,7h_{\max}}{\Delta}\right) \sqrt{2gh_{\max}i}. \quad (6)$$

Скорость  $u$  в любой точке этой вертикали на расстоянии  $y$  от дна определяется зависимостью

$$u = V_{\max} \left( \frac{y}{h_{\max}} \right)^m. \quad (7)$$

Показатель степени  $m$  зависит от относительной шероховатости дна  $\frac{h_{cp}}{\Delta}$

$$m = \frac{0,43}{\lg \frac{6,15h_{cp}}{\Delta}}. \quad (8)$$

Введём в формулы (5–6) коэффициенты  $K_v$  и  $K_h$ . Разделив среднюю скорость (5) на максимальную (6), получим зависимость коэффициента скорости  $K_v$  от коэффициента формы русла  $K_h$  и относительной шероховатости

$$K_v = \frac{\lg 6,15 \frac{h_{cp}}{\Delta}}{\lg(16,7K_h \frac{h_{cp}}{\Delta})} \sqrt{K_h}. \quad (9)$$

В случае использования измерений на глубине  $0,2 h$  максимальная скорость на поверхности потока рассчитывается по формуле (7), в которой расстояние от дна до точки измерения составляет  $0,8 h$ .

Для использования формул (5–9) необходима величина относительной шероховатости дна  $\frac{h}{\Delta}$ . Она определялась итерационно по формуле (9). Левая часть формулы получается по измеренным скоростям, правая – расчётом при задании ряда значений  $\frac{h}{\Delta}$  до тех пор, пока невязка левой и правой частей не будет превышать  $0,001$ .

### Анализ и расчёт коэффициентов $K$ ,

В Гидрологических ежегодниках приводится описание рек в створах стационарных наблюдений: характеристика долины, русла, грунтов дна, берегов и поймы, особенности течения, устойчивость русла к размыву, антропогенные факторы, изменяющие русло. На основании этих описаний реки выборки объединены в 4 группы по условиям протекания. Принималась во внимание прямолинейность потока, извилистость русла, устойчивость берегов и дна к размыву, захламлённость русла, наличие островов и осерёдков, затопление поймы, крупность руслового аллювия.

К первой группе отнесены гидростворы на прямолинейных или слабоизогнутых участках русла, с высокими крутыми скальными берегами, с каменисто-галечным, галечным и галечно-песчаным дном, берега и дно которых не размываются. Пойма небольшая или отсутствует.

Реки второй группы умеренно извилистые с косоструйным движением потока, галечно-валунным или песчано-галечным дном, с островами и осерёдками, заламами леса при низких уровнях, затоплением открытой поймы. Песчано-галечные берега размываются.

К третьей группе относятся участки рек на изгибах русла с большой кривизной струй, с галечно-песчаным руслом с вкраплениями валунов, деформируемыми берегами, с выходом воды на пойму. Кривизна потока сохраняется при любых уровнях.

Четвёртая группа – это малые реки в горных районах с валунным дном, косоструйным сбойным течением, глубинами менее 1 м и уклонами водной поверхности более 5 м/км. Реки этой группы отличаются повышенной гидравлической шероховатостью. Берега и дно устойчивые.

Гидроморфологические параметры, определённые по расходам рек четырёх групп, приведены в табл. 8.

Анализ коэффициентов  $K_v$  и  $K_h$  (табл. 8) привёл к выводу о существовании связи между коэффициентами. С ухудшением условий протекания коэффициент скорости уменьшается. При этом в первых трёх группах уменьшается и коэффициент формы русла.

Таблица 8

Осреднённые и экстремальные значения  $K_v$ ,  $K_h$ ,  $K_{vh}$

|                             | $K_v$                      | $K_h$                      | $K_{vh}$                   |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1-я группа<br>2966 расходов | $\frac{0,71}{0,78 - 0,61}$ | $\frac{0,68}{0,86 - 0,52}$ | $\frac{0,48}{0,65 - 0,35}$ |
| 2-я группа<br>349 расходов  | $\frac{0,62}{0,66 - 0,54}$ | $\frac{0,65}{0,85 - 0,42}$ | $\frac{0,40}{0,52 - 0,24}$ |
| 3-я группа<br>87 расходов   | $\frac{0,52}{0,54 - 0,49}$ | $\frac{0,60}{0,81 - 0,47}$ | $\frac{0,31}{0,44 - 0,24}$ |
| 4-я группа<br>25 расходов   | $\frac{0,46}{0,47 - 0,45}$ | $\frac{0,69}{0,76 - 0,58}$ | $\frac{0,31}{0,35 - 0,26}$ |

*Примечание.* В числителе дроби приведены средние значения коэффициентов, в знаменателе – максимальные и минимальные значения по отдельным расходам многолетнего ряда.

Коэффициент  $K_v$  предлагается определять в функции коэффициента формы русла  $K_h$ . Параметры зависимости  $K_v = f(K_h)$  определены раздельно для четырёх групп (рис. 1).

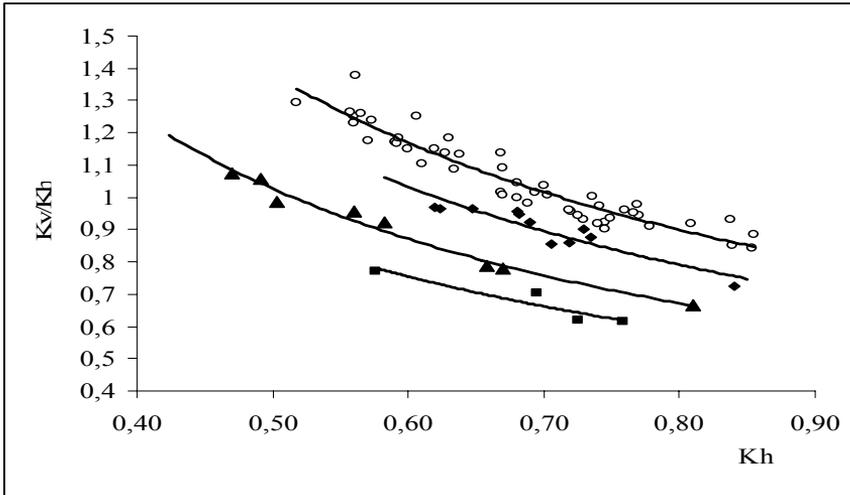


Рис. 1. Зависимость отношения коэффициентов  $K_v$  и  $K_h$  от коэффициента формы русла

Верхняя линия графика соответствует равнинным рекам с благоприятными условиями протекания, нижняя – малым горным рекам с бурным течением в валунном русле.

Уравнения связи

$$\frac{K_v}{K_h} = a_i K_h^{b_i}$$

преобразованы в зависимость

$$K_v = a_i K_h^{b_i + 1},$$

параметры которой приведены в табл. 9, где  $i$  – номер группы рек по условиям протекания.

Среднее значение показателей степени  $b_i$  составляет минус 0,90, которое принято одинаковым для рек всех групп. В связи с этим незначительно изменились параметры  $a_i$ , которые составляют 0,74; 0,64; 0,56; 0,48 соответственно для рек 1–4-й группы.

Окончательно рабочая формула для расчёта  $K_v$  имеет вид

$$K_v = a_i K_h^{0,10}. \tag{10}$$

Коэффициент  $K_v$  автоматически изменится при изменении формы русла. Особенно ярко это проявляется при выходе потока на пойму, когда меняется не только форма, но и сопротивление движению потока. В рамках данной работы эти особенности пойменных потоков рассмотрены недостаточно из-за малого количества измерений на поймах и редком их за-

топлении на рассмотренных реках региона. Это должно стать предметом дальнейших исследований с использованием материалов наблюдений на других реках, где поймы затапливаются чаще.

Таблица 9

Параметры уравнений связи гидроморфологических коэффициентов рек в различных условиях протекания

| Условия протекания   | $a_i$ | $b_i$ | $R_i^2$ |
|--|-------|-------|---------|
| 1. Благоприятные<br>(прямолинейные русла с устойчивыми высокими берегами без островов и осерёдков с глубинами более 2 м) | 0,73  | -0,91 | 0,90    |
| 2. Менее благоприятные<br>(извилистость, острова, размываемые берега)  | 0,64  | -0,93 | 0,85    |
| 3. Неблагоприятные<br>(изгибы русла, затопление поймы, песчано-галечно-валунное дно, захламлённость русла)               | 0,55  | -0,90 | 0,98    |
| 4. Ухудшенные условия<br>(малые горные реки с валунным руслом при глубине потока менее 1 м)                              | 0,49  | -0,85 | 0,88    |

Оценка погрешности расчётов по формуле (10) с подстановкой в неё коэффициентов формы русла всех рассмотренных рек показала, что средние отклонения в группах менее 4 %, наибольшие – не превышают 10 % (табл. 10).

Таблица 10

Погрешность расчёта коэффициентов  $K_v$  по формуле (10)

| Условия протекания     | $a_i$ | Средняя погрешность, % | Наибольшая погрешность, % |
|------------------------|-------|------------------------|---------------------------|
| 1. Благоприятные       | 0,74  | 3,2                    | 9,7                       |
| 2. Менее благоприятные | 0,64  | 2,9                    | 5,8                       |
| 3. Неблагоприятные     | 0,56  | 3,2                    | 8,8                       |
| 4. Ухудшенные          | 0,48  | 2,8                    | 5,5                       |

Самое большое отклонение получено в первой группе для р. Енисей в створе г. Енисейска. Здесь русло треугольной формы  $K_h = 0,56$ , которое на 18 % ниже среднего в группе. Коэффициент скорости  $K_v = 0,77$  на 5,5 % выше среднего в данной группе (табл. 9). Расчётом по формуле (10) для этого створа получено значение  $K_v = 0,70$ , что меньше рассчитанного для створа на 9,7 %.

Подобное несоответствие коэффициентов средним статистическим значениям параметров группы может быть следствием повышенной турбулизации потока, вызванной кинематическим эффектом [2]. Это характерно при слиянии потоков ниже одного или нескольких островов, после впадения крупного притока, при затоплении широкой поймы. В данном случае из описания створа не следует, что в нём происходит соединение

потоков. Возможно, есть ещё какая-то причина формирования треугольного русла.

После замены в формуле (3) коэффициента  $K_v$  из формулы (10) получаем выражение для расхода воды, в котором учтена форма поперечного сечения русла и условия протекания потока в створе и за его пределами

$$Q = a_i K_h^{1,1} V_{\max} h_{\max} B. \quad (11)$$

Применение формул (4) или (11) возможно в следующих случаях.

#### ***Первый случай***

Имеются многолетние или годовые измерения расходов воды детальным или основным способом, по которым можно вычислить все три коэффициента  $K_v$ ,  $K_h$ ,  $K_{vh}$ , принять их постоянными или изменяющимися с высотой уровня. В потоке должны быть измерены  $V_{\max}$ ,  $h_{\max}$ ,  $B$ . Расход определяется по формуле (4).

#### ***Второй случай***

Имеются многолетние данные измеренных расходов воды, но скорости потока измерялись в одной точке глубины ( $0,6 h$  от поверхности). Глубину потока можно получить экстраполяцией зависимости  $h_{\max} = f(H)$ , ширину потока – по профилю поперечного сечения, максимальную скорость надо определить поплавками.

#### ***Третий случай***

Выполняются гидрологические изыскания на неизученном створе. Необходимо измерить наибольшую поверхностную скорость и глубины по ширине потока между урезами, рассчитать  $K_h$  и расход по формуле (11) при выборе  $a_i$  для соответствующих условий протекания.

#### ***Четвёртый случай***

Необходимо определить расходы в рукавах разветвления при русловой многорукавности. Для расчёта необходимы глубины русла в створах рукавов разветвления между урезами, максимальные поверхностные скорости в рукавах и однорукавном русле выше или ниже разветвления. Расход рассчитывается по формуле (11). Контролем является равенство сумм расходов в рукавах расходу однорукавного русла.

### **Выводы и предложения**

Предлагаемый метод определения расходов воды является инструментально-аналитическим. Он основан на минимуме полевых измерений и предполагает большую аналитическую работу по изучению коэффициентов  $K_v$ ,  $K_h$ ,  $K_{vh}$  за многолетний период наблюдений. Архивные материалы (ИРВ) будут востребованы не только для вычисления ежедневных расходов воды, но и для оценки изменения русел рек при усилении антропогенного воздействия на потоки.

На малых реках с глубинами менее 1 м, где скорости измеряются в одной точке глубины, использование метода возможно при обязательном измерении поверхностных скоростей поплавками на стрежне.

## Список литературы

1. *Быков В. Д.* Гидрометрия / В. Д. Быков, А. В. Васильев. – Л. : Гидрометеиздат, 1972. – 447 с.
2. *Гончаров В. Н.* Динамика русловых потоков / В. Н. Гончаров. – Л. : Гидрометеиздат, 1962. – 374 с.
3. *Железняков Г. В.* Теория гидрометрии / Г. В. Железняков. – Л. : Гидрометеиздат, 1976. – 343 с.
4. *Карасёв И. Ф.* Гидрометрия / И. Ф. Карасёв, А. В. Васильев, Е. С. Субботина. – Л. : Гидрометеиздат, 1991. – 375 с.
5. Методические рекомендации по измерению расходов воды рек аэрометодами. – Л. : Гидрометеиздат, 1974. – 134 с.
6. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. – Вып. 6, ч. 1. Гидрологические наблюдения и работы на реках. – Л. : Гидрометеиздат, 1957. – 400 с.

*Работа выполнена при поддержке гранта ФЦП 2009-1.1-154-069-005 «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области географии и гидрологии суши».*

## **Discharge determination river streams by minimum field work**

G. S. Mazur

**Abstract.** Coefficient of transition from maximal velocity to overall mean velocity in line gauging discharge section lines of Angara river, Lena river, Witim river, Yenisei river and their tributaries was analyzed. Dependence discharge on maximal velocity, maximal depth stream, width of the stream and coefficient of the river bed form four groups of streams with particular conditions of movement was calculated. Dependences end formulas can be used in hydraulic engineerings of hydraulic structures and hydro-meteorological service.

**Key words:** Discharge, velocity coefficient, detailed discharge, Chezy's parameter, channel roughness, discharge section line, form parameter of channel, channel line, stability of river channel, river bed sinuosity, hydro morphological parameter.

*Мазур Галина Степановна  
Иркутский государственный университет  
664003, Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
доцент кафедры гидрологии и охраны  
водных ресурсов географического факультета  
тел.: 42-56-22*