

УДК 556.53

## **Подсчет расходов воды в период ледостава на реках при отсутствии материалов наблюдений**

**Д.Е. Клименко, М.Э. Гарайшина**

**Пермский государственный университет**

Вычисление расходов воды в период ледостава (зимних расходов) необходимо как в режимном учете стока (вычисление ежедневных расходов воды), так и при производстве инженерных изысканий на реках (переход от расходов воды, измеренных подо льдом, к расходам воды открытого русла). В то же время объем гидрометрической информации (данные об измеренных расходах воды) часто ограничивается пятью-шестью измерениями за зиму на гидрологических постах, до единичных измерений на водотоках в период производства полевых работ на разных стадиях изысканий. Поэтому необходимо иметь некую модель, позволяющую переходить от кривой расходов при свободном русле к зимним расходам, а также обратно – от зимних расходов к расходам открытого русла для неизученных рек.

В настоящее время существует большое количество методов определения ежедневных расходов воды (ЕРВ) периода ледостава. Их можно разделить на две группы: полевые и расчетные методы. Полевые методы предполагают оборудование гидрометрических створов таким образом, чтобы ледяной покров оказывал минимальное влияние на зависимости расхода воды от уровня (к примеру, в США и Швеции широкое применение находит измерение расходов воды на незамерзающих участках рек, часть створов оборудована утепленными гидрометрическими лотками). Расчетные методы основываются на выявлении и учете факторов, вызывающих отклонение зимних расходов воды от кривой расходов свободного русла. Наиболее простыми являются методы, которые предполагают использование поправок или переходных коэффициентов. В настоящей статье подробно рассматриваются два метода вычисления зимних расходов воды при ограниченном объеме информации – графические связи зимнего коэффициента со степенью стеснения русла ледяным покровом и гидравлический, связанный с графическими связями расходов воды с площадью водного сечения. Рассматриваются границы применения методов, погрешности. Для расчетов были выбраны водные объекты различных в гидрологическом отношении территорий – бассейнов Камы и Средней Оби.

Обзор методов расчета. Все многообразие существующих расчетных методов вычисления зимних расходов воды можно объединить в несколько групп:

1. Интерполяция между измеренными расходами воды (ИРВ) – метод применим при достаточно плавном изменении уровня воды и наличии ИРВ с периодичностью 5-10 суток.

2. Использование хронологического графика изменения  $K_{зим}$  ( $K_{зим} = \frac{Q_{зим}}{Q_{св}}$ , где  $Q_{зим}$  – зимний расход,  $м^3/с$ ,  $Q_{св}$  – расход воды при свободном русле,  $м^3/с$ , отнесенные к одному уровню воды  $H$ ,  $см$  над нулем поста или  $мБС-77$ ). Несмотря на то, что фактические расходы воды здесь заменены безразмерными коэффициентами, этот метод также требует большого количества ИРВ (не менее трех в месяц), совместного анализа комплекса гидрометеорологических условий (ход температуры воздуха, изменение толщины льда и др.). При достаточно полных гидрологических наблюдениях для вычисления ЕРВ строится хронологический график переходных коэффициентов, для критической оценки – совмещенные графики колебания уровня, толщины льда, температуры воздуха. По ним определяют наличие оттепелей, наледей, зажоров, заторов. Расходы между сроками находятся прямолинейной интерполяцией  $K_{зим}$ .

3. Использование зимних зависимостей  $Q_{зим} = f(H)$ . Данный метод применим начиная с середины ледостава для средних и крупных рек, с устойчивыми зимними кривыми расходов. Существуют некоторые модификации данного метода, например метод Больстера [1].

4. Использование хронологического графика поправок к уровню воды на толщину погруженного льда. Он заключается в придании к наблюдаемым уровням поправок, благодаря которым ИРВ «совпадают» с расходами, полученными по исправленным уровням из кривой расходов. Для дней с отсутствием ИРВ поправки находятся интерполяцией. Этот метод аналогичен методу Стаута [2], его модификации разработаны в 1912 г. С.И. Моисеенко, В. Хойтом [1].

5. Использование графической связи переходного коэффициента  $K_{зим}$  со степенью стесненности русла ледяным покровом  $\alpha$  ( $\alpha = \frac{F_{л.}}{F_{общ}}$ , где  $F_{л.}$  – площадь погруженного льда,  $м^2$ ,  $F_{общ}$  – общая площадь сечения,  $м^2$ ). При ограниченном количестве ИРВ данный метод позволяет определить значения  $K_{зим}$ , оперируя только данными о средней толщине погруженного льда. Границы применения метода и существующие погрешности будут рассмотрены ниже.

Впервые на возможность использования графических связей переходного коэффициента  $K_{зим}$  со степенью стесненности русла льдом указал Ф. Федоров [7]. Он уже исходил из того, что чаще всего приходится иметь дело с небольшим числом ИРВ, по существу недостаточным для подсчета стока, или же с отсутствием ИРВ. Предполагая, что основным фактором, влияющим на связь расходов воды с уровнями, является толщина льда, Ф. Федоров построил вполне определенную зависимость  $K_{зим} = f(\alpha)$  для р. Москвы за несколько лет при нормальных условиях ледообразования (отсутствие зажоров, переменного подпора, наледей, всячего ледостава). Разброс точек относительно средней кривой не превышал 25%. Эти

отклонения он объяснил, наряду с ошибками измерений, теми неучтенными факторами (неоднородная шероховатость льда в течение ледостава и изменяющиеся уклоны водной поверхности), которыми пренебрег при выборе главного из них – толщины льда. В качестве математического выражения средней кривой Ф. Федоров, используя формулу Шези-Маннинга, получил:  $K_{зим} = 0,80 \cdot (1 - \alpha)^{1,5}$ .

Из выражения видно, что при  $\alpha \rightarrow 0$   $K_{зим} \rightarrow 0,80$ . Ф. Федоров объясняет это тем, что в промежутке значений  $K_{зим}$ , соответствующих свободной водной поверхности и поверхности, покрытой самым тонким льдом, имеется скачок, который формируется под влиянием дополнительной шероховатости. При  $\alpha \rightarrow 1$   $K_{зим} \rightarrow 0$ , что вполне закономерно при полном промерзании русла.

В дальнейшем детальные исследования зимнего переходного коэффициента производились Л.М. Ковалевым [3]. Наряду с использованием зависимостей  $K_{зим} = f(\alpha)$ , им предложена типизация этих кривых для трех типов русел по чистоте и разработанности русла (рис.1), установлены фактические пределы изменения коэффициента  $K_{зим}$ : от 0 до 1. В отличие от Ф. Федорова Л.М. Ковалев не допускает скачков переходного коэффициента  $K_{зим}$  от 1 до некоторого численного значения в момент установления ледостава.

Ковалевым предпринимается попытка учесть разбросы точек относительно средней кривой  $K_{зим} = f(\alpha)$ . Поскольку при нарастании льда и переходе его в более устойчивое состояние процент отклонения отдельных точек от кривой уменьшается, предложено нормировать значения  $K_{зим}$  по коэффициентам для вполне сформировавшегося периода ледостава, когда основным фактором, влияющим на  $K_{зим}$ , является параметр  $\alpha$ .

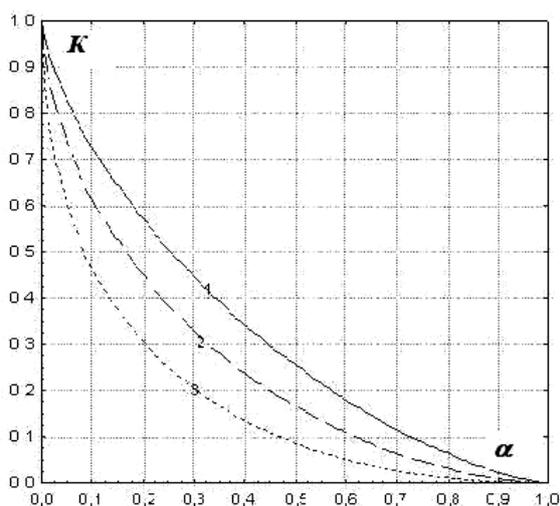


Рис.1 Обобщенные зависимости  $K_{зим} = f(\alpha)$ : 1 – хорошо разработанные и чистые русла при отсутствии глубинного льда; 2 – русла средней разработанности с небольшим количеством внутриводного льда; 3 – плохо разработанные и загрязненные русла, а также при наличии внутриводного льда, но без заторных явлений

Кривая  $K_{зим} = f(\alpha)$  при построении ориентируется лишь на нормированные значения  $K_0$ , которые соответствуют невысокой шероховатости и поэтому могут быть названы нормальными. Отношение  $\beta = K_{зим}/K_0$  характеризует влияние дополнительной шероховатости нижней поверхности льда, изменяющееся во времени от начала ледостава.

К этой группе методов можно отнести и исследования коэффициентов шероховатости нижней поверхности ледяного покрова, попытки связи его с общим коэффициентом шероховатости русла подо льдом. Установлено, что изменение его во времени носит экспоненциальный характер. В некоторых случаях отмечается небольшое увеличение коэффициента шероховатости льда весной, непосредственно перед вскрытием реки из-за изменения структуры льда.

6. Гидравлический метод. Гидравлические зависимости для  $K_{зим}$  представлены формулой Шези-Маннинга, которая в самом общем виде имеет вид

$$K = \frac{Q_з}{Q_{св}} = \frac{\frac{1}{n_{np}} \cdot R_з^{1/6} \cdot F_з \cdot (R_з \cdot I_з)^{1/2}}{\frac{1}{n_p} \cdot R_{св}^{1/6} \cdot F_{св} \cdot (R_{св} \cdot I_{св})^{1/2}} = \frac{n_p}{n_{np}} \cdot \left(\frac{R_з}{R_{св}}\right)^{2/3} \cdot \frac{F_з}{F_{св}} \cdot \left(\frac{I_з}{I_{св}}\right)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $Q_з$  – зимний ИРВ,  $m^3/c$ ;  $Q_{св}$  – ИРВ при свободном русле при уровне воды в лунке,  $m^3/c$ ;  $R_з, R_{св}$  – гидравлический радиус сечения в условиях ледостава и открытого русла,  $m$ ;  $F_з, F_{св}$  – площадь водного сечения в условиях ледостава и свободного русла,  $m^2$ ;  $I_з, I_{св}$  – уклоны водной поверхности русла подо льдом и свободного русла (в абсолютных единицах);  $n_{np}, n_p$  – приведенный коэффициент шероховатости русла подо льдом и коэффициент шероховатости свободного русла.

Допуская, что в период ледостава гидравлический радиус уменьшается в два раза по сравнению с открытым руслом ( $R_з \approx \frac{R_{св}}{2}$ ), уклоны водной поверхности при низких уровнях воды в периоды ледостава и открытого русла различаются незначительно, а показатель  $y$  в формуле Шези ( $C = 1/n \cdot R^y$ ) равен  $1/6$ , выражение (1) можно записать:

$$K = \frac{Q_з}{Q_{св}} = 0,63 \cdot \frac{n_p}{n_{np}} \cdot \frac{F_з}{F_{св}} \quad (2)$$

Подобные упрощения выражения (1) за счет допущения равенства ширин русла и уклона при свободном русле и ледоставе получены рядом исследователей (П.Н. Белоконь, В.Н. Гончаров, С.И. Колупайло) [2]. Г.В. Железняков вводит в формулу отношение параметров формы живого сечения свободного и подледного потоков [3]. Ф.И. Карасевым [4] производится регрессионный анализ несколько преобразованных членов уравнения, которые обозначаются факторами.

Полученные нами зависимости расхода воды от площади водного сечения подтверждаются рассмотренным гидравлическим методом.

Границы применения метода  $K_{зим} = f(\alpha)$ . Гидравлическая формула  $K_{зим}$  (1), (2) в общем виде обосновывает использование зависимости  $K_{зим} = f(\alpha)$  в том виде, в каком ее представил Л.М. Ковалев. Ясным обнаруживается предел  $K_{зим}$  при полном стеснении русла (при  $\alpha \rightarrow 1$ ). О поведении кривой в верхней части (при  $\alpha \rightarrow 0$ ) судить трудно, учитывая «внезапный» характер образования неподвижного ледостава при очень малых (менее 0,2) значениях  $\alpha$ . Для очень малых рек даже при начальной толщине льда трудно получить значения коэффициента стеснения русла меньше 0,1. С другой стороны, на очень глубоких реках нельзя получить значения коэффициента стеснения русла, близкие к единице. В этом состоят граничные условия применимости метода расчета зимних ЕРВ посредством связей  $K_{зим} = f(\alpha)$  для условий одной реки. Такие случаи будут давать скопления координат около некоторого диапазона  $\alpha$ , затрудняя производство вычислений ЕРВ (рис. 2).

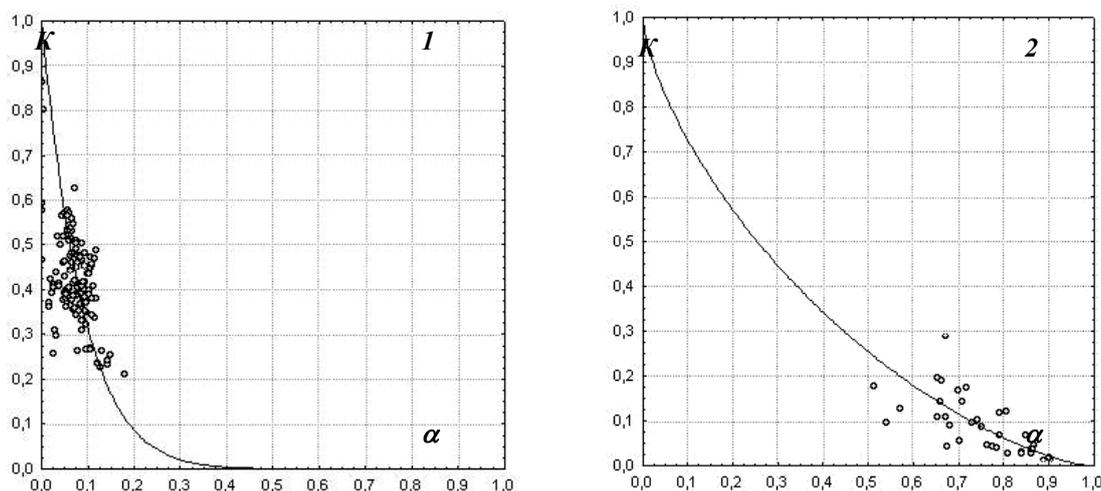


Рис. 2. Распределение точек  $K_{зим} = f(\alpha)$  на р.Каме у с. Тарловка (1) и на р. Койве у д. Федотовка (2) в зимний период (1944–1954 гг.)

Не исключается возможность применения связей  $K_{зим} = f(\alpha)$  для группы рек, различных по морфометрическим параметрам, но одинаковых по ледовым условиям (ледообразование, наличие шуги, полыней, наледей), используя преимущества каждой из них для наиболее полного освещения интервала координат кривой.

Апробация метода. В качестве математического выражения кривой  $K_{зим} = f(\alpha)$  можно использовать несколько преобразованное уравнение астроида  $K_{зим} = (1 - \alpha^n)^m$ , где  $n$  находится в пределах от 0 до 1, а  $m$  изменяется от 0 до бесконечности. При  $n = 1/m$  кривая будет симметричной относительно прямой  $K_{зим} = 1 - \alpha$ . Данное уравнение позволяет придерживаться граничных значений зимнего коэффициента и степени

стесненности русла, указанные Л.М. Ковалевым. Используя метод наименьших квадратов, подбираются эмпирические значения степеней для каждого створа. Для апробации метода нами была проделана работа по построению кривых  $K_{зим} = (1 - \alpha^n)^m$ , нахождению значений степеней для каждого створа гидрологического поста как для отдельно взятой зимы, так и для всего периода в целом, оценке качества полученных зависимостей. В качестве исходной информации в расчет брались значения ИРВ под ледоставом и кривые расходов для свободной ото льда поверхности для постов на реках Среднего Урала – левобережных притоках Камского водохранилища (данные 24 постов Росгидромета) и на реках Среднего Приобья – правобережных притоках Оби (данные 31 поста, находящихся в ведении ОАО «Гипротюменнефтегаз»).

Полученные кривые скошены в сторону оси абсцисс, за которую принимается ось коэффициентов стеснения русла льдом. В периоды нарастания толщины льда предлагается выводить кривую на значение  $K_{зим} = 1$  от значения  $\alpha$ , соответствующего начальной толщине льда (она будет изменяться в зависимости от характера замерзания реки). Поэтому кривая будет иметь скошенность в сторону оси ординат. ИРВ периода таяния льда, непосредственно перед вскрытием, доказывают правильность вывода об уменьшении общей шероховатости русла подо льдом в течение зимы [5]. При одной и той же стесненности русла расход воды перед вскрытием больше именно по указанной причине, следовательно, больше и зимний коэффициент. Это приводит к такому распределению точек  $K_{зим}$  и  $\alpha$ , которое показано на рис. 3. Однако метод наименьших квадратов предусматривает проведение кривой  $K_{зим} = (1 - \alpha^n)^m$  по среднеудаленным значениям. В некоторых случаях отклонения невелики и погрешность вычислений не превышает погрешность измерения расхода воды под ледоставом.

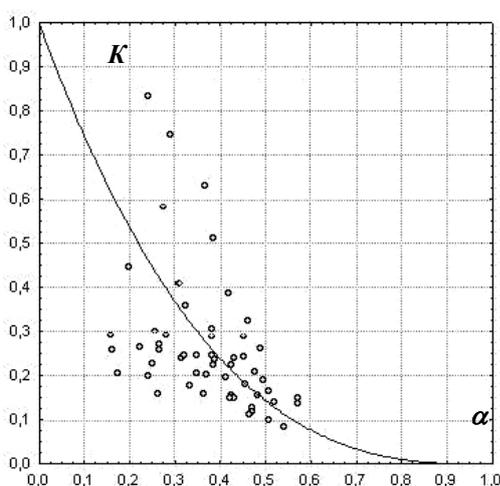


Рис. 3. Распределение точек  $K_{зим} = f(\alpha)$  на р. Колве – д. Петрецова в зимний период (1944–1954 гг.)

Средние и малые реки Среднего Урала, Среднего Приобья мало подвержены шугообразованию, однако такие случаи имеют место. Согласно М.Л. Рупперту [6] ошибка измерения расхода воды при детальном способе при ледоставе без шуги составляет 5–7%, при зашугованности больше 10% – 7–10%. В.Д. Быков, А.В. Васильев [1] рассчитывают погрешность при шуге более 20%, как 5–10%, предельная составляет 45%.

Коэффициенты детерминации построенных кривых  $K_{зим} = (1 - \alpha^n)^m$  по створам Росгидромета: р. Вогулка – с.Шамары, р. Чусовая – д. Н. Шалыги за зимы с 1952–53 гг., а также по створам ОАО «Гипротюменнефтегаз»: р. Кутып-Яорты – в/п №43, р. Ампута – в/п №50, р. Нишль-Манайн-Майта – в/п №57, ручей без названия – в/п №61 за зимы 1982–83, 83–84 гг. (рис.4, 5) находятся в пределах 0,80–0,95.

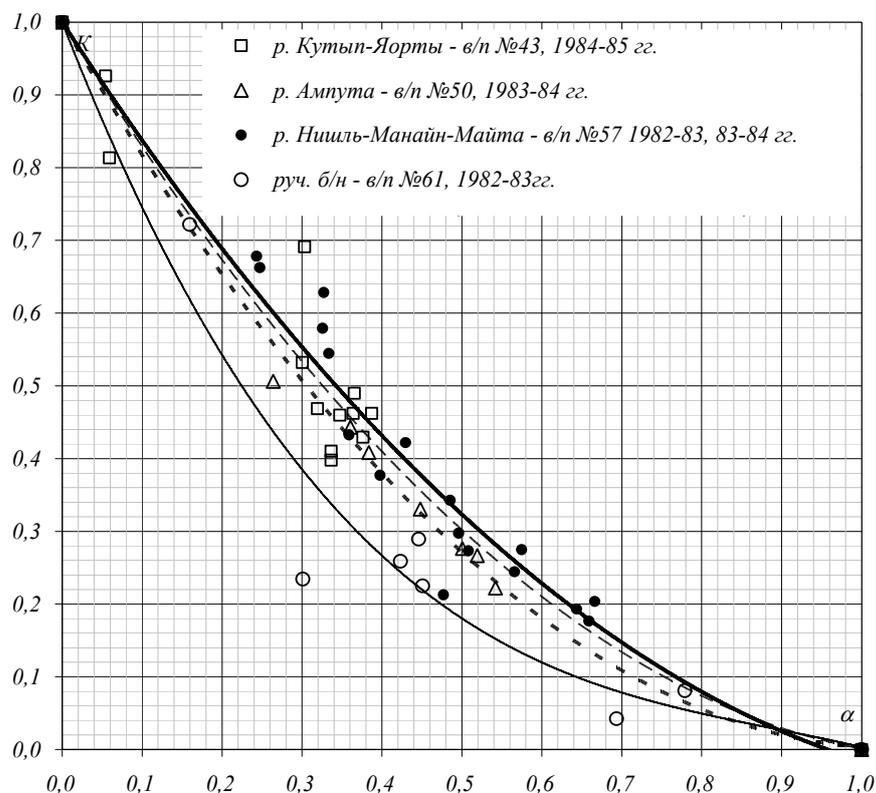


Рис. 4. Зависимости  $K_{зим} = f(\alpha)$  для рек Среднего Приобья в зимний период (1982–83, 1983–84, 1984–85 гг.)

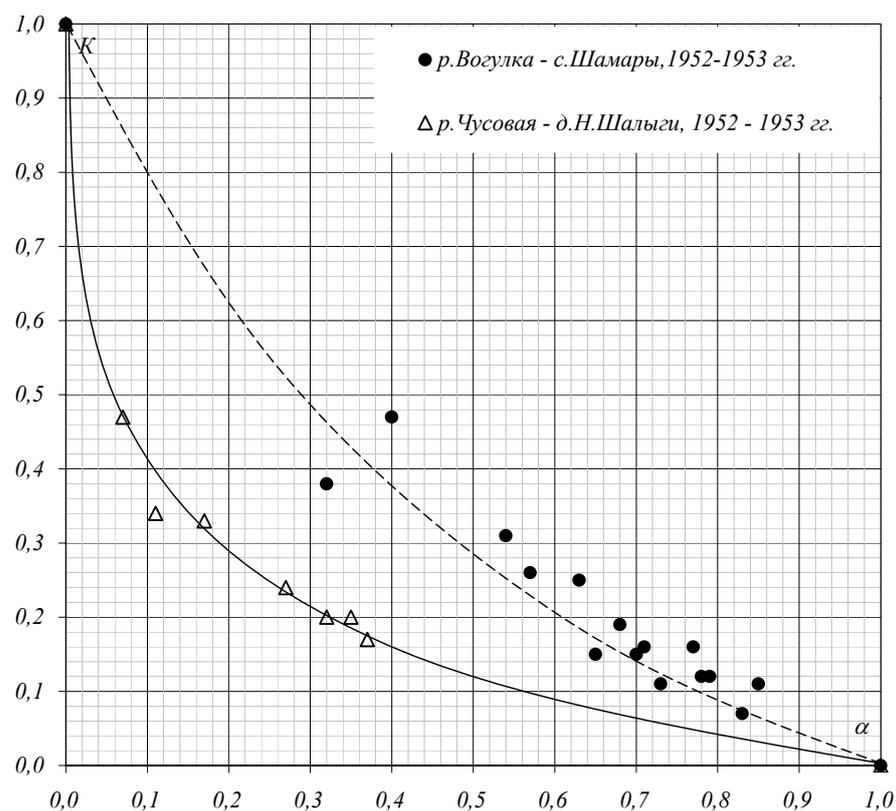


Рис. 5. Зависимости  $K_{зим} = f(\alpha)$  для рек бассейна Камы в зимний период (1952–53 гг.)

Результаты анализа погрешностей измерения расходов воды за зимы 1952–53 гг. для рек бассейна Камы и за зимы 1982–83 и 1983–84 гг. для рек Среднего Приобья представлен в табл. 1.

Таблица 1

Оценка качества зависимостей  $K_{зим} = f(\alpha)$ . Сравнение точности расчетов по полученным зависимостям с расчетами методом интерполяции между ИРВ

Дата	$\alpha$	$K_{зим} = f(\alpha)$	$K_{зим} = Q_{изм}/Q_{ср}$	Отклонение, %	$K_{зим}$ в случае интерполяции через 2 ИРВ	Отклонение от $K_{зим} = Q_{изм}/Q_{ср}$ , %	Дата	$\alpha$	$K_{зим} = f(\alpha)$	$K_{зим} = Q_{изм}/Q_{ср}$	отклонение, %	$K_{зим}$ в случае интерполяции через 2 ИРВ	Отклонение от $K_{зим} = Q_{изм}/Q_{ср}$ , %
р. Чусовая – д.Н.Шалыги, 1952–53 гг.							р. Ампута – в/п №50, 1983–84 гг.						
04.11.1952	0,07	0,44	0,47	7,3			22.01.1983	0,40	0,38	0,28	30,2		
21.11.1952	0,11	0,38	0,34	11,9	0,39	13,7	03.02.1983	0,41	0,37	0,25	37,7	0,27	6,2
08.12.1952	0,17	0,31	0,33	6,8	0,32	3,1	15.02.1983	0,44	0,33	0,25	29,4	0,26	5,5
16.01.1953	0,27	0,24	0,24	2,6	0,25	4,1	24.04.1983	0,54	0,23	0,22	3,3	0,27	19,4
12.02.1953	0,32	0,21	0,20	0,3	0,23	14,0	01.05.1983	0,52	0,25	0,27	6,1	0,27	1,2
21.03.1953	0,37	0,18	0,17	1,5	0,21	21,1	13.05.1983	0,50	0,27	0,28	2,5	0,35	23,5
07.04.1953	0,35	0,19	0,20	7,3			20.05.1983	0,45	0,32	0,33	1,9	0,41	21,4
среднее отклонение, %				5,4		11,2	26.05.1983	0,38	0,40	0,41	2,3	0,45	9,7
р.Вогулка – с.Шамары, 1952–53 гг.							29.05.1983						
02.11.1952	0,4	0,39	0,47	17,4			01.06.1983	0,26	0,56	0,51	9,5		

10.11.1952	0,32	0,46	0,38	19,4	0,33	14,1	среднее отклонение, %			12,7		11,6	
12.11.1952	0,54	0,28	0,31	10,9	0,35	12,1	р. Нишль-Манайн-Майта-в/п №57 1982–83,83–84гг.						
17.11.1952	0,57	0,26	0,26	0,3	0,31	17,5	15.11.1982	0,24	0,63	0,68	7,1		
23.11.1952	0,63	0,22	0,25	12,9	0,21	17,4	30.11.1982	0,33	0,52	0,58	9,8	0,62	6,8
30.11.1952	0,68	0,19	0,19	3,5	0,16	17,1	07.12.1982	0,33	0,52	0,63	18,3	0,57	9,7
08.12.1952	0,65	0,21	0,15	40,1	0,15	0,0	16.12.1982	0,33	0,52	0,54	5,5	0,52	4,6
19.12.1952	0,7	0,17	0,15	15,7	0,13	14,3	27.01.1983	0,49	0,34	0,34	0,7	0,34	0,7
28.12.1952	0,71	0,17	0,16	3,9	0,12	28,6	12.02.1983	0,51	0,32	0,27	16,4		
10.01.1953	0,78	0,12	0,12	1,7	0,12	0,0	11.12.1983	0,40	0,44	0,38	15,3		
28.01.1953	0,73	0,16	0,11	48,6	0,12	8,7	18.12.1983	0,43	0,40	0,42	4,4	0,37	13,1
13.02.1953	0,77	0,13	0,16	16,7	0,12	28,6	18.01.1984	0,48	0,35	0,21	49,8	0,26	20,1
28.02.1953	0,79	0,12	0,12	2,6	0,12	0,0	01.02.1984	0,57	0,27	0,24	8,9	0,21	15,1
08.03.1953	0,83	0,09	0,07	31,7	0,12	52,6	13.02.1984	0,50	0,33	0,30	11,7	0,2	39,1
11.04.1953	0,85	0,08	0,11	26,7			25.04.1984	0,66	0,19	0,18	6,4	0,23	26,3
среднее отклонение, %				16,8		16,2	30.04.1984	0,64	0,20	0,19	3,6		
р. Кутып-Яорты – в/п №43, 1984–85 гг.							12.05.1984	0,67	0,18	0,20	10,8		
01.02.1984	0,34	0,49	0,41	16,8			22.05.1984	0,57	0,26	0,27	5,9	0,38	32,2
18.02.1984	0,39	0,42	0,46	8,9	0,44	4,9	28.05.1984	0,36	0,48	0,43	11,4	0,57	27,4
29.02.1984	0,38	0,44	0,43	1,5	0,46	6,9	02.06.1984	0,25	0,63	0,66	5,6		
11.03.1984	0,37	0,45	0,49	8,6	0,44	10,7	среднее отклонение, %			11,3		15,8	
21.03.1984	0,30	0,53	0,53	0,2	0,49	8,2	ручей б/н (приток р. Ампута) – в/п №61, 1982–83гг.						
30.03.1984	0,35	0,47	0,46	2,5	0,48	4,4		0,30	0,38	0,23	48,0		
10.04.1984	0,36	0,45	0,46	2,5	0,43	7,2		0,42	0,24	0,26	5,7		
20.04.1984	0,34	0,49	0,40	19,8	0,46	14,5		0,45	0,22	0,29	25,4		
30.04.1984	0,30	0,53	0,69	26,8	0,46	40,1		0,45	0,22	0,22	2,3		
09.05.1984	0,32	0,51	0,47	7,8	0,46	1,9		0,78	0,06	0,08	32,5		
11.05.1984	0,06	0,90	0,81	9,7	0,87	6,7		0,69	0,08	0,04	65,0		
11.05.1984	0,05	0,90	0,93	2,4			среднее отклонение, %			19,0			
среднее отклонение, %				8,9		10,6							

Средние отклонения значений  $K_{зим}$ , вычисленных по зависимостям  $K_{зим} = f(\alpha)$ , от фактических значений в большинстве случаев находятся в пределах допустимой погрешности вычисления ЕРВ периода ледостава: для р. Вогулка средние отклонения составляют 5,4% (при наибольших – 11,9%), для р. Чусовая – 16,8% (48,6%), для р. Кутып-Яорты – 8,9% (26,8%), для р. Ампута – 12,7% (37,7%), для р. Нишль-Майн-Майта – 11,3% (49,8%), для ручья без названия (в/п №61) – 19,0% (65,0%). В таблице выполнено сравнение точности расчетов  $K_{зим}$  методом интерполяции между измеренными расходами (считая, что измерения производились втрое реже) с расчетами по зависимостям  $K_{зим} = f(\alpha)$ . Как видно, средние погрешности расчета  $K_{зим}$  методом интерполяции практически во всех случаях превышают средние погрешности расчетов по зависимостям  $K_{зим} = f(\alpha)$ : для р. Вогулка средние отклонения составляют 11,2% (при наибольших – 21,1%), для р. Чусовая – 16,2% (52,6%), для р. Кутып-Яорты – 10,6% (40,1%), для р. Ампута – 11,6% (23,5%), для р. Нишль-Майн-Майта – 15,8% (39,1%), для ручья без названия (в/п №61) погрешности не оценивались. Таким образом, вычисление ЕРВ по зависимостям  $K_{зим} = f(\alpha)$  в большинстве случаев дает меньшие погрешности (в 1,2–2,0 раза) в сравнении с вычислением ЕРВ при ограниченном количестве ИРВ методом интерполяции.

Анализ зависимостей  $K_{зим} = f(\alpha)$  для Среднего Приобья показывает, что для рек, сходных по морфометрическим особенностям русла и условиям

замерзания, зависимости практически совпадают. Это открывает возможности использования полученных зависимостей в инженерных изысканиях неизученных водотоков, в целях вычисления расходов воды открытого русла на основании зимних ИРВ.

Случай с р. Вогулкой характеризует поле точек  $K_{зим}$  и  $\alpha$  для «неглубокой» (глубина по уровню в среднем равна 0,6 м) реки: почти все они находятся правее значения  $\alpha = 0,4$ . Створ на р. Чусовая у д. Н. Шалыги имеет глубину потока в те же зимы 1,5 м. Поэтому поле точек в этом случае имеет несколько иное расположение: они находятся левее значения  $\alpha = 0,4$ . Реки Среднего Приобья имеют ширину в период ледостава 10–60 м, средние глубины 0,6–1,0 м. Эмпирические точки освещают зависимость  $K_{зим} = f(\alpha)$  более или менее равномерно.

В ряде случаев проведение зависимости  $K_{зим} = f(\alpha)$  по полю точек становится затруднительно. Для более обоснованного ее наведения нами предпринята попытка совместного анализа зависимостей  $(Q_3; Q_{св}; F_3; F_{св}) = f(H)$ , где  $H$  – уровень воды, остальные обозначения те же, что в (1).

Ниже, на рис. 6, представлены совмещенные зависимости  $(Q_3; Q_{св}; F_3; F_{св}) = f(H)$  для рек Среднего Приобья (р. Кирилл-Выс-Ягун, р. Хапхльнутяй, посты Свердловского филиала ОАО «Гипротюменнефтегаз»). Зависимости получены весьма тесными, с коэффициентом детерминации 0,87–0,95. Зависимости отражают тот факт, что при одном и том же уровне воды расходы воды и площади водного сечения периода открытого русла всегда превышают эти значения для периода ледостава. На основании полученных зависимостей вычислены значения  $K_{зим}$  и  $\alpha$ , нанесенные на графики  $K_{зим} = f(\alpha)$  (рис. 7).

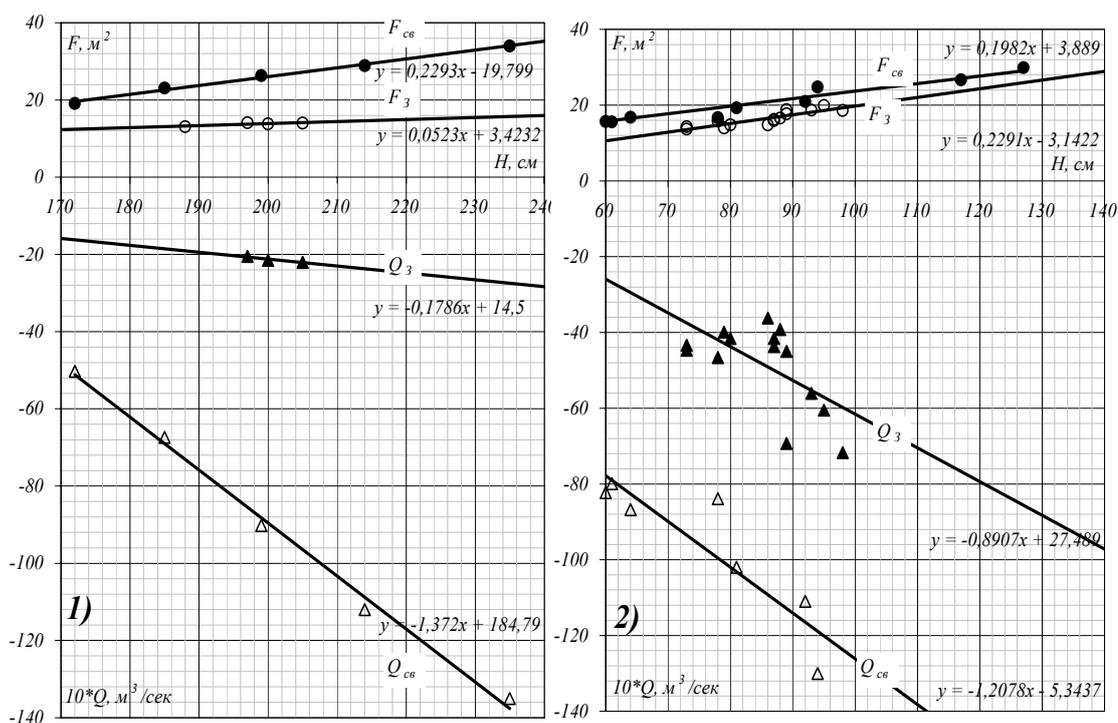


Рис. 6. Совмещенные зависимости  $(Q_3; Q_{св}; F_3; F_{св}) = f(H)$  для рек Среднего Приобья: р. Кирилл-Выс-Ягун (1), р. Хапхльнутай (2)

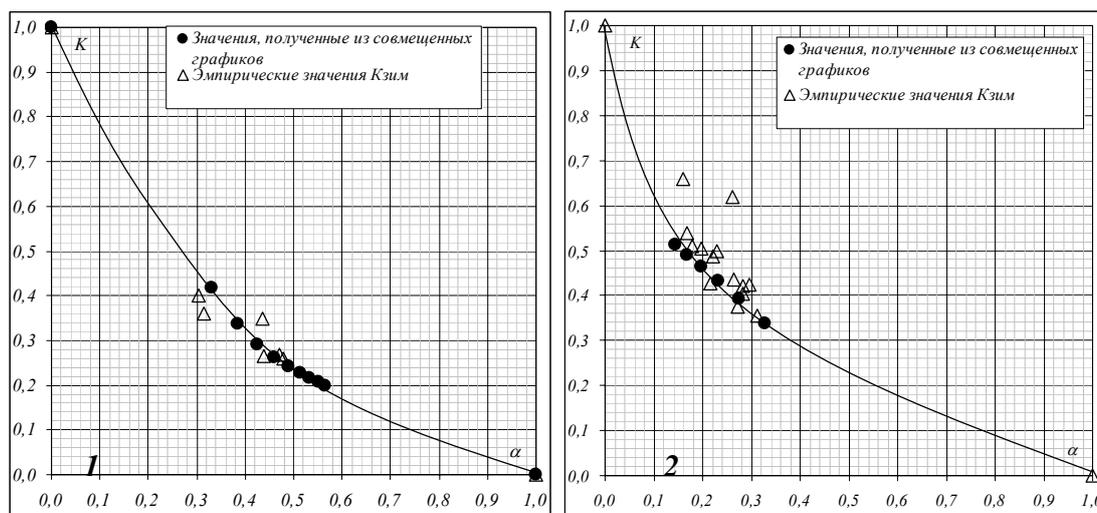


Рис. 7. Зависимости  $K_{зим} = f(\alpha)$ , построенные по эмпирическим значениям  $K_{зим}$ , откорректированные по значениям, вычисленным по совмещенным графикам

$(Q_3; Q_{св}; F_3; F_{св}) = f(H)$  для рек Среднего Приобья: Кирилл-Выс-Ягун (1), Хапхльнутай (2)

Для обоснования возможности применения гидравлического метода нами были предприняты попытки установления зависимостей  $(Q_3; Q_{св}) = f(F_{в.с.})$ , где  $F_{в.с.}$  - площадь водного сечения,  $m^2$ . Подобные зависимости удалось построить только для рек Среднего Приобья (рис. 8); в

бассейне р. Камы зимние расходы, как правило, ниже расходов открытого русла в два раза.

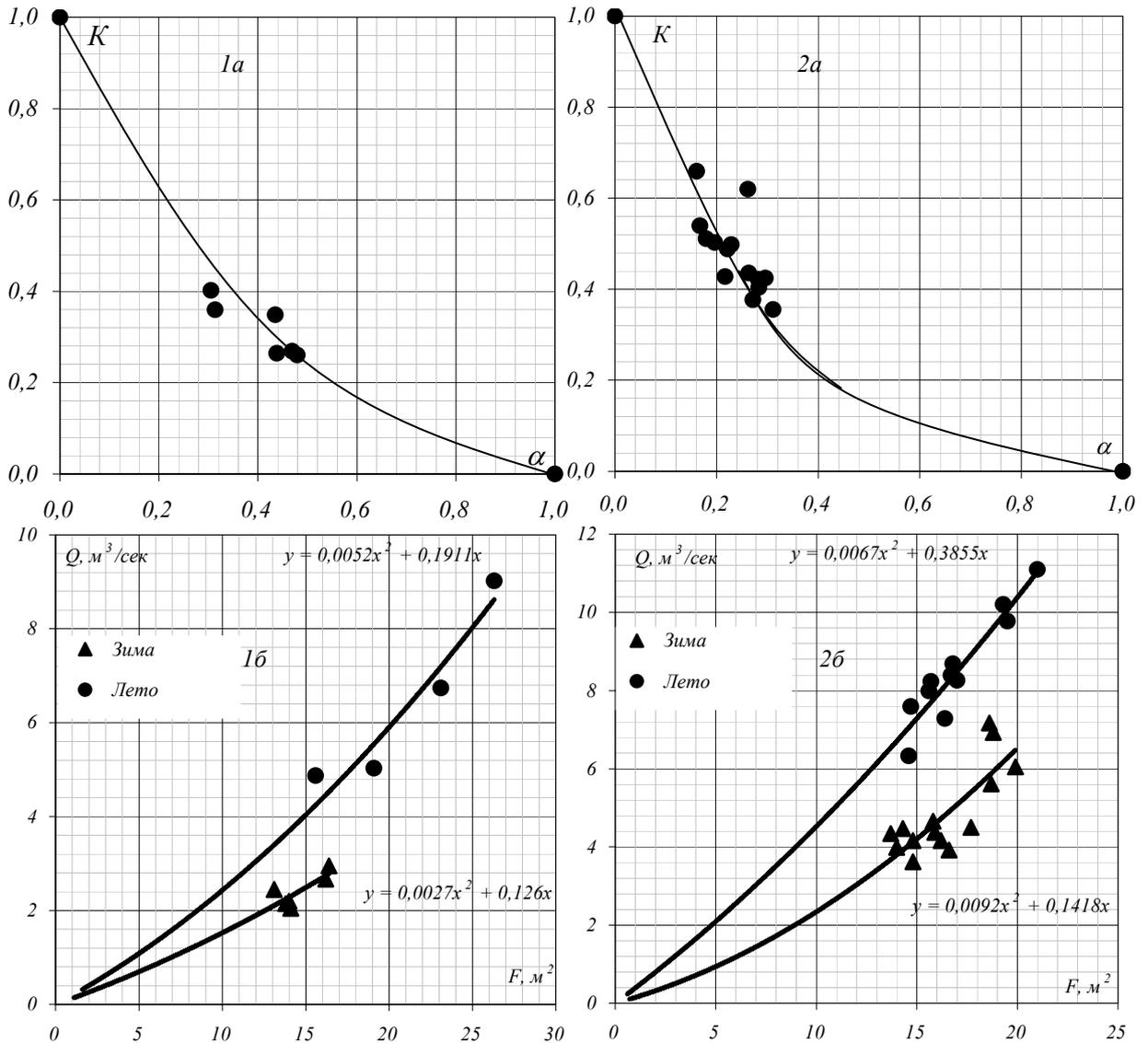


Рис. 8. Совмещенные зависимости  $(Q_3; Q_{св}) = f(F_{с.с.})$  (б) и зависимости  $K_{зим} = f(\alpha)$

(а) для пунктов на реках Среднего Приобья: Кирилл-Выс-Ягун – в/п №29 в зимний период 1981–82 гг. (1), Хапхльнутяй – в/п № 86 в зимний период 1982–83, 1983–84 гг. (2)

Зависимости  $(Q_3; Q_{св}) = f(F_{с.с.})$  не содержат в себе информации об уровнях воды и подтверждают тот факт, что для пропуска равных расходов воды в период ледостава требуется большая площадь водного сечения. Для створов постов возможно непосредственное использование подобных зависимостей. Для неизученных рек зависимости позволяют обоснованно подойти к определению параметров выражения (2). Разброс точек обусловлен изменяющейся шероховатостью нижней поверхности льда. Соотношения расходов воды при равных площадях изменяются в диапазоне

0,63±0,08. Значение 0,63 отражает изменение гидравлического радиуса водного сечения зимой по сравнению с летними значениями, колебания относительно этого значения связаны с изменением шероховатости. Подобный способ оценки зимних расходов воды позволяет дополнить зависимости  $K_{зим} = f(\alpha)$ , поскольку не содержит информации о степени стеснения русла льдом. Для получения выводов о возможности использования зависимостей  $(Q_3; Q_{св}) = f(F_{в.с.})$  для обоснования зависимостей  $K_{зим} = f(\alpha)$  необходимы дальнейшие исследования.

Обработка значений зимних ИРВ на постах Среднего Урала за несколько лет (1944–54 гг.) показывает, что средние погрешности вычисления  $K_{зим}$  по зависимостям  $K_{зим} = f(\alpha)$ , построенным за все зимы, в большинстве случаев допустимы (табл. 2).

Таблица 2

Расчетные зависимости  $K_{зим} = (1 - \alpha^n)^m$  в виде формул, полученные по данным ИРВ всех зим за период 1944–54 гг., принятых к расчету; погрешности расчетов по зависимостям

№ п/п	Река - пост	Формула	Ср. отклонения фактических значений $K_{зим}$ от $K_{зим} = f(\alpha)$ , %	№ п/п	Река - пост	Формула	Ср. отклонения фактических значений $K_{зим}$ от $K_{зим} = f(\alpha)$ , %
1	р.Березовая – д.Булдырья	$K=1-\alpha^{0,4}$	14	13	р.Лысьва – пос.Креж	$K=(1-\alpha)^{3,0}$	23
2	р.Вильва – корд.Узкий	$K=(1-\alpha^{0,4})^{1,4}$	20	14	р.Сулем – с.Галашки	$K=1-\alpha^{0,2}$	61
3	р.Вишера – д.Митракова	$K=(1-\alpha^{0,4})^{1,2}$	14	15	р.Сылва – с.Подкаменное	$K=(1-\alpha^{0,7})^{1,5}$	22
4	р.Вишера – пос.Рябиново	$K=1-\alpha^{0,3}$	10	16	р.Сылва – р.п.Суксун	$K=(1-\alpha)^{2,0}$	20
5	р.Вишерка – д.Фадина	$K=(1-\alpha^{0,6})^{1,4}$	14	17	р.Сылва – с.Троица	$K=(1-\alpha^{0,6})^{1,6}$	24
6	р.Вогулка – р.п.Шамары	$K=1-\alpha^{0,6}$	20	18	р.Сылва – р.п.Шамары	$K=1-\alpha^{0,4}$	21
7	р.Койва – д.Федотовка	$K=(1-\alpha^{0,7})^{1,5}$	37	19	р.Усьва – пос.Вилуха	$K=(1-\alpha^{0,8})^{1,3}$	21
8	р.Колва – д.Петрецова	$K=(1-\alpha)^{3,0}$	42	20	р.Усьва – ст.Усьва	$K=(1-\alpha^{0,7})^{1,4}$	38
9	р.Колва – д.Подбобыка	$K=(1-\alpha^{0,8})^{1,2}$	12	21	р.Чусовая - с.Косой Брод	$K=(1-\alpha^{0,7})^{1,4}$	36
10	р.Колва – с.Покча	$K=1-\alpha^{0,4}$	27	22	р.Чусовая – д.Н.Шалыги	$K=1-\alpha^{0,3}$	18
11	р.Косьва – с.Троицкое	$K=1-\alpha^{0,2}$	39	23	р.Чусовая – р.п.Староуткинск	$K=(1-\alpha^{0,8})^{1,7}$	44
12	р.Кутим – д.Кутим	$K=(1-\alpha^{0,6})^{1,6}$	20	24	р.Яйва –	$K=1-\alpha^{0,7}$	24

				с.Подслудное		
--	--	--	--	--------------	--	--

Сведения о постах ведомственной сети, материалы которых использованы в расчетах, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сведения о постах Свердловского филиала ОАО  
«Гипротюменнефтегаз»

№	Река-пост	Куда впадает	Площадь водосбора F, км <sup>2</sup>	Значения при среднем меженном уровне воды	
				Ср. глубина, м	Ширина, м
1	р. Кирилл-Выс-Ягун - в/п №29	р. Тром-Юган	870	1,10	21,6
2	р. Кутып-Яорты - в/п №43	р. Лагрн-Еган	160	1,00	10,0
3	р. Ампуга - в/п №50	р. Аган	3180	1,19	61,5
4	р. Хапхльнутяй - в/п №53	р. Ампуга	226	1,15	11,0
5	р. Нишль-Манай-Майга - в/п №57	р. Ампуга	477	0,85	17,0
6	ручей б/н - в/п №61	р. Ампуга	58,7	0,68	6,50

Все же в отдельных случаях ошибки превышают 30%. Для повышения точности расчетов ЕРВ зимнего периода необходимо выполнить классификацию зависимостей  $K_{зим} = f(\alpha)$  по степени суровости зимы, характеру ледообразования, морфометрическим параметрам русел (использование зависимостей  $K_{зим} = f(\alpha)$  для расчетов ЕРВ рек за схожие по гидрометеорологическим условиям зимы дает погрешности в 2–3 раза меньшие по сравнению с зависимостями, построенными по всему полю точек (см. табл. 1). Классификация будет выполнена в дальнейших исследованиях.

Выводы. Качество проводимой кривой и численные значения степеней в выражении  $K_{зим} = (1 - \alpha^n)^m$  будут зависеть от:

- 1) количества ИРВ зимой и освещенности ими всего периода ледостава;
- 2) характера замерзания водотока и продолжительности ледообразования, начальной толщины льда, наличия процессов шугообразования, полыней за зимний период (величины и динамики шероховатости русла подо льдом);
- 3) морфометрических параметров русла (глубина, толщина льда, ширина русла);
- 4) степени суровости зимы: скорости нарастания льда, максимальной толщины льда;
- 5) качества кривой расходов при свободной поверхности.

Анализ многочисленных ИРВ в период ледостава как во времени (весь интервал ледостава, разные по степени суровости зимы), так и в пространстве (различные по морфометрическим показателям, характеру ледообразования реки) показывает, что использование зависимостей

$K_{зим} = f(\alpha)$  позволяет повысить точность определения расходов воды при недостаточности или отсутствии гидрометрической информации.

Анализ материалов наблюдений на реках бассейна Средней Оби доказывает возможность использования зависимостей  $K_{зим} = f(\alpha)$  для определения ЕРВ неизученных рек, схожих по ряду признаков, методом аналогии. Данное обстоятельство позволяет существенно сократить сроки инженерных изысканий, обходясь ИРВ зимнего периода для вычисления ИРВ открытого русла.

Для обоснованного наведения кривых  $K_{зим} = f(\alpha)$  при большом разбросе эмпирических значений или при неполном освещении данными всего диапазона значений  $\alpha$  предложено проводить совместный анализ зависимостей  $(Q_3; Q_{св}; F_3; F_{св}) = f(H)$ .

В качестве самостоятельного метода вычисления зимних расходов, а также в качестве основы для разработки гидравлического метода предложено использование зависимостей  $(Q_3; Q_{св}) = f(F_{с.с.})$ .

Вычисление расходов воды под ледоставом с помощью поправок на уровень воды в условиях Среднего Урала невозможно, так как летние расходы часто вдвое превышают зимние, что затрудняет экстраполяцию кривой расходов свободного русла в область малых уровней. В то же время этот способ применим для рек Среднего Приобья.

Указанный метод предпочтительнее гидравлического способа, так как последний требует наличия материалов наблюдений над уклоном водной поверхности и значения коэффициентов шероховатости русла подо льдом. Коэффициент шероховатости русла подо льдом в настоящее время по предлагаемым формулам средневзвешенного (Белоконя-Сабанеева [5]) лежит между значениями коэффициентов шероховатости русла и нижней поверхности ледяного покрова, однако общеприменимого метода для его применения на сегодняшний день нет.

### **Библиографический список**

1. *Быков В.Д.* Гидрометрия / В.Д. Быков, А.В. Васильев. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 448 с.
2. *Гириллович И.А.* Гидрометрия / И.А. Гириллович. М.: Изд-во ОНТИ НКТП СССР, 1937. 326 с.
3. *Железняков Г.В.* Пропускная способность русел каналов и рек / Г.В. Железняков. Л.: Гидрометеиздат, 1981.
4. *Карасев И.Ф.* Речная гидрометрия и учет водных ресурсов / И.Ф. Карасев. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 311 с.
5. *Нежиховский Р.А.* Коэффициенты шероховатости нижней поверхности шуголедяного покрова / Р.А. Нежиховский // Тр. ГГИ. 1964. Вып.110. С. 54–82.
6. *Рупперт М.Л.* О точности определения расхода воды в зимних условиях / М.Л. Рупперт // Тр. ГГИ. 1968. Вып. 160.

7. Федоров Ф. Учет стока рек при ледоставе / Ф. Федоров // Гидротехническое строительство. 1933. №7. С. 18–20.