

УДК 532.626.627

М.А.САТТАРОВ, И.Э.ЭШМИРЗОЕВ

**О СПОСОБАХ ОЦЕНКИ И ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ВОДНЫХ РЕСУРСОВ БАСЕЙНА АРАЛЬСКОГО МОРЯ\***

*В статье обсуждается современное состояние пресных водных ресурсов высокогорья. На базе уравнения водного баланса предложен новый способ оценки стока горных рек. В рамках теории гидравлического радиуса получены оптимальные конструктивные элементы каналов с максимальной пропускной способностью. Показана эффективность комбинированного использования речных и подземных вод в конусах выноса горных рек, а также в зонах действия крупных каналов Средней Азии.*

**1. Введение.** Территория Таджикистана – зона формирования и транзита поверхностного речного стока бассейна Аральского моря. Занимая около 45% площади горной части бассейна, этот сток даёт более 50% ( $>57 \text{ км}^3/\text{год}$ ) воды с минерализацией не более 0.4 г/л, что позволяет отнести его к категории высокой чистоты класса I-II [1]. Запасы пресных вод ледников, ряда озёр и водохранилищ, а также водоносных пластов составляют несколько сотен кубических километров.

Гидрографическая сеть республики включает [2-5] более 25 тыс. водотоков общей протяжённостью 69.2 тыс. км, 96% которых составляют водотоки длиной  $<10$  км (общей протяжённостью 46 тыс. км). Общая площадь оледенения Средней Азии составляет около  $17\,000 \text{ км}^2$ , т.е. более 50% находится на территории Таджикистана. Крупной ледниковой зоной является плато Памир, площадь оледенения которого в пределах СНГ равна  $8,4$  тыс.  $\text{км}^2$ .

Распределение гидрографических объектов по бассейнам рек Таджикистана представлено в табл.1. По удельным гидрографическим показателям речные системы бассейнов рек Пяндж, Кафирниган, Сурхандарья значительно превышают другие бассейны; бедна речной сетью территория республики, расположенная в бассейне р. Сырдарья. Неравномерно развита речная сеть и в каждом из бассейнов: более всего она развита в горной зоне, по предгорьям же и равнинам протекают только единичные реки, несущие воды из горной области.

---

\* Статья представляет собой текст доклада [6], прочитанного М.А.Саттаровым на XXXI Конгрессе Международной ассоциации гидравлических исследований (МАГИ), состоявшегося в г. Сеуле (Южная Корея) с 11 по 17 сентября 2005 г.

Таблица 1

## Гидрография рек и ледников Таджикистана по бассейнам рек [1]

Бассейн реки	Площадь водосбора, тыс. км	Суммарная длина рек, км.	Ледники		
			Количество	Площадь, км <sup>2</sup>	Объем льда, км <sup>3</sup>
Сырдарья	13.4	4069	-	-	-
Зеравшан	12.3	5770	1225	575	30
Каратаг, Шеркент	1.6	1098	80	25	0.7
Кафирниган	11.6	5947	380	85	2.6
Вахш	31.2	12308	2595	3150	264
Пяндж	65.0	34867	4700	2960	130
Бессточная область	8.5	5150	575	555	29
Всего по РТ	143.6	69209	9555	7350	456.3

В весенне-летний период, чаще всего в апреле-июне, ливневые или продолжительные дожди на общем фоне талого половодья формируют разрушительные наводнения, паводки, селевые потоки. Ежегодные атмосферные осадки в горах и многовековые ледники Таджикистана – основной источник стока рек в жаркие засушливые летние месяцы, когда потребность в пресной воде для народного хозяйства региона максимальна, в связи с экстенсивным развитием хлопководства (табл.2).

Таблица 2

## Развитие поливного земледелия в Средней Азии за 90 лет, тыс.га

	1913	1940	1950	1960	1965	1970	1975	2003
Узбекистан	1339	1974	2053	2377	2575	2751	3006	4020
Таджикистан	211	297	300	391	468	518	567	720
Туркменистан	307	373	352	435	514	643	819	1185
Киргизстан	435	794	797	889	861	883	911	1020
Всего*	2292	3438	3502	4092	4418	4795	5303	6945

\*Примечание: Недавно в руки автора попал доклад Директора НИЦ МКВК (Научно-информационный центр Межгосударственной координационной водохозяйственной комиссии Центральной Азии) В.А. Духовного «Азиатско-Тихоокеанский регион – Центральная Азия: – Задачи и действия по реализации принципов интегрированного управления водными ресурсами (ИУВР)», опубликованный в декабре 2005 г. В табл.1 доклада (стр. 8) приведены данные по бассейну Аральского моря: за 1960, 1970, 1980, 1990, 2000 и 2004 годы общая площадь орошаемых земель (нетто), соответственно, равна 4510, 5150, 6920, 7600, 7896 и 8120 тыс.га.

Предварительный анализ [7] гидрометеорологических данных (1930-90) показывает, что за период 1960-1990 гг. объем среднего годового стока, формирующегося на территории республики, уменьшился с 57.01 км<sup>3</sup>/год до 53.6 км<sup>3</sup>/год, т.е. ежегодное уменьшение стока составляло около 0.2%. За 30 лет наибольшее сокращение стока наблюдалось на рр. Зеравшан, Вахш и Пяндж – 7%. В меньшей степени сокращение стока наблюдалось на реке Кафирниган – 3%. На Восточном Памире сток рек сократился лишь

на 0.3%. Ожидаемое в 2025-2030 гг. сокращение объёма годового стока рек на 7% при фактической амплитуде его колебаний, достигающей от +30% до -24%, представляется не существенным и локальным, так как аналогичный сравнительный анализ рек Закавказья и Украины показал увеличение стока рек в этих регионах на 5-6% [6].

Исследования показывают [8-9], что за период с 1950 по 1990 гг. площадь ледников Гиссаро-Алая сократилась почти на треть, а объём льда уменьшился в два раза. Более детальные инструментальные измерения морфометрических характеристик ледников Абрамова и Скогач, проведенные во второй половине XX столетия, показали значительные изменения их за 50 лет как по площади распространения, так и по объёму. Однако обнаружилось, что деградация крупнейшего ледника Федченко протяженностью, площадью и объёмом 77 км, 651 км<sup>2</sup> и 130 км<sup>3</sup> идет значительно медленнее, чем ледников Гиссаро-Алайских хребтов, что обусловлено орографией и ориентацией высоких горных систем региона относительно влагонесущих западных и юго-западных ветров. Например, за последние сто лет ледник Федченко отступил не более, чем на километр и по площади и объёму уменьшился лишь на 1.7% и 0.8%, соответственно. Аналогичное, медленное отступление ледников наблюдается и на Восточном Памире с суровым арктическим климатом.

Процессы сокращения оледенения и ослабления роли ледников как регуляторов речного стока и изменения внутригодового режима рек региона диктует необходимость реализации адаптационных мер.

## **2. К расчету элементов водного баланса в условиях высокогорья**

Известная методика стационарного расчета стока рек по гидрологическим постам, как правило, точна и эффективна для рек с равномерным течением. Однако основная часть водных ресурсов бассейна Аральского моря формируется в суровых высокогорных условиях Кыргызстана и Таджикистана, и в начале течет по руслам горных рек Вахш, Нарын, Пяндж, Кафирниган, Зарафшан и их многочисленных бурных притоков. Как правило, основные ресурсы этих рек формируются в период половодья (более 60-70%), расчет которых требует применения нестандартных методов, ибо стационарный метод измерения не может точно фиксировать тот объём скоротечного бурного паводкового или селевого потока, погрешности измерений которого могут составлять 15-20% и более. В связи с этим для оценки динамических водных ресурсов горных рек, наряду с классическим методом замера по постам, предлагается балансовый метод расчета, суть которого отражена в уравнении [6,10]:

$$Q = S(A - E) - F, \quad (2.1)$$

где  $Q$  – средний многолетний или годовой сток бассейна горной реки,  $S$  – площадь водосбора (км<sup>2</sup>),  $A$  – среднемноголетняя (годовая) величина атмосферных осадков, поступивших на единицу площади водосбора реки (в км),  $E$  – средняя (многолетняя и годовая) величина испарения влаги с единицы площади водосбора (в км),  $F$  – средняя многолетняя

(годовая) величина подземного оттока воды за пределы площади водосбора ( $\text{км}^3$ ). Отличительной особенностью площадей водосбора горных рек является резкое расчленение рельефа и обусловленная им дренированность, благодаря чему впитавшаяся в грунт влага почти целиком поступает в речную сеть своего водосбора, а жидкие атмосферные осадки быстро стекают вниз в равнину. Поэтому уравнение баланса (2.1) может быть представлено в виде [6]:

$$Q = SA(1 - k), \quad (2.2)$$

где  $k = E/A + F/(SA) < 1$ , т.е. суммарная величина испарения влаги в атмосферу и инфильтрации в грунт в условиях высокогорья значительно меньше, чем величина жидких осадков, которые успевают стечь вниз в виде стока в равнину. Как правило осадки, и их обратное частичное испарение с площади  $S$  водосбора реки являются легко определяемыми величинами. При этом, учитывая, что среднемноголетние данные атмосферных осадков горной части Центральной Азии не превышают 750-800 мм в год, а в условиях высокогорья в подавляющих случаях не более 1/3 часть осадков водосбора успевает испариться, методом водного баланса ниже выполнен расчет годового стока крупных рек Таджикистана и региона в целом. В частности, табл. 3. показывает, что полученные из уравнения водного баланса (2.2) оценки сходятся с известными данными гидрологов, расчет которых выполнен другими способами.

Таблица 3

Расчет стока и расхода рек Таджикистана методом водного баланса [6]

Река	Площадь водосбора, тыс. км <sup>2</sup>	Ср. величина осадков м <sup>3</sup> /га	Коэф. k	Ср. вел. стока, км <sup>3</sup> /год	Средн. расход м <sup>3</sup> /с	Данные литературы, [2, 3]		Отн. отклонение %
						км <sup>3</sup> /год	м <sup>3</sup> /с	
Вахш	39.1	7750	1/3	20.15	640	21.2	670	-4.48
Кафирниган	11.7	7750	1/3	6.04	191	5.7	170	+12.35
Зарафшан	11.0	7750	1/3	5.68	180	5.2	165	+9.09
Бассейны рек Центр. Азии	324.0	7750	1/3	167.4	5305	170.0	5387	-1.52

Очевидна эффективность метода водного баланса и формулы (2.2) для решения “обратной” задачи гидрометеорологии, т.е. для расчета интенсивности атмосферных осадков, выпадающих в труднодоступных бассейнах горных рек. В частности, средне-взвешенная величина осадков за вычетом величин испарения и инфильтрации на данный период при известных значениях расхода или стока реки определяется по формуле:

$$A = Q/S (1 - k) \quad (2.3)$$

В табл. 4 приведены прогнозные соотношения для определения среднемноголетней величины жидких атмосферных осадков в бассейнах ряда горных рек Таджикистана. Заметим,

что если полученную по формуле (2.1) величину  $Q$  км<sup>3</sup>/год умножим на коэффициент 31.688 ( $1\text{ км}^3/1\text{ год} = 10^9\text{ м}^3/(60 \times 60 \times 24 \times 365.25\text{ сек.}) = 31.688 \text{ м}^3/\text{с}$ ), то получим величину расхода реки в м<sup>3</sup>/с. Например, среднегодовой сток р. Вахш равен 20 км<sup>3</sup>/год, тогда умножив его на 31.688, получим:  $20 \times 31.688 = 634 \text{ м}^3/\text{с}$ . Анализ таблицы 4 показывает, что расчеты по формуле (2.3) при  $k = 1/3$ , с большой точностью сходятся в основном с данными метеостанций большинства бассейнов рек, за исключением малых рек: Иляк, Явансу, Тоирсу, Обигарм, Исфара и тд..

Таблица 4.

Расчет атмосферных осадков (мм/год) в бассейнах горных рек Таджикистана на основе уравнения водного баланса.

Бассейн реки	Площадь водосб., км <sup>2</sup>	Расход реки по постам, м <sup>3</sup> /с	Расход $Q$ реки с пл. $S$ за вычетом $E+A$ , мм/год	Соотношение осадки-испар., мм/год	Коэф. $K$	Расчет $A$ по форм. (1.3), мм/год
Гунт	15800	108	215.71	216/(1-k)	1/3	324
Мургаб	10500	16.4	49.29	49/(1-k)	1/3	74
Ванч	1810	55.8	972.88	973/(1-k)	1/3	1459
Обихингоу	6630	202	961.48	961/(1-k)	1/3	1442
Обикамароу	106	3.9	1161.08	1161/(1-k)	1/3	1742
Сорбог	1760	70.0	1255.13	1255/(1-k)	1/3	1883
Сурхоб	20000	430.0	678.49	678/(1-k)	1/3	1017
Муджихарв	151	4.2	877.76	878/(1-k)	1/3	1317
Хакими	96	2.0	657.45	657/(1-k)	1/3	985
Обигарм	684	4.8	221.46	221/(1-k)	2/3	663
Кафирниган	11700	180	485.51	486/(1-k)	1/3	729
Иляк	822	6.8	261.06	261/(1-k)	2/3	783
Симиганч	91	1.8	624.22	624/(1-k)	1/3	936
Лучоб	262	5.6	674.52	675/(1-k)	1/3	1012
Душанбе	1980	47.9	763.45	763/(1-k)	1/3	1145
Хонако	782	12	484.27	484/(1-k)	1/3	726
Каратаг	1540	24.4	500.01	500/(1-k)	1/3	750
Ширкент	346	9.9	902.96	903/(1-k)	1/3	1354
Тоирсу	435	2.9	210.39	210/(1-k)	2/3	630
Явансу	1190	2.1	55.69	56/(1-k)	0,91	622
Яхсу	2670	33.9	400.68	401/(1-k)	1/3	602
Исфара	2810	14	157.23	157/(1-k)	3/4	628

*Примечание:* При составлении 4-ой колонки таблицы 3 отношение  $Q/S$  умножено на величину 31557.6 мм с учетом того, что атмосферные осадки принято в мм в год на единицу площади водозабора.

Это свидетельствует о том, что коэффициент  $k = 1/3$  более подходит для тех бассейнов горных рек, которым присуща резкая расчлененность и выпуклость орографии, а также тонкая грунтовая толща со значительным уклоном поверхности. Это подтверждает

ется, в частности, на примере бассейнов Явансу и Тоирсу, для которых основным источником водных ресурсов является не вся территория впадины, а незначительная площадь низкотеррас со скудной толщей грунта, где формируются водные ресурсы в виде продолжительных осадков. Остальная же часть бассейна за исключением периода краткосрочных ливневых дождей является поглотителем и полигоном испарения. Очевидно, коэффициент  $k$  для этих районов, тем более для равнинных территорий, при расчетах поверхностного стока принимает другие значения. Более убедительным подтверждением эффективности формулы (1.3) при  $k = 1/3$  могут служить результаты оценки атмосферных осадков в высокогорных бассейнах рек. Например, согласно данным метеорологов, среднее многолетнее значение осадков в бассейне р. Мургаб оценивается величиной 71 мм/год, а расчетные данные, полученные по формуле (1.3), на основе многолетних данных расхода р. Мургаб равны 74 мм/год, т.е. расхождение между данными наблюдения и балансового метода не превышает 4-5%. Аналогичное можно наблюдать и для Гиссаро-Алайской системы гор, а также гор Западного Памира. Например, для самого западного участка Гиссарского хребта – бассейна р. Ширкент расчетные данные при  $k=1/3$  дают величину осадков более 1300 мм, что характерно для южных склонов Гиссарского хребта, а для бассейна р. Яхсу – 600 мм, что достаточно близко к данным систематических наблюдений метеостанции Куляб.

Детальный анализ данных метеорологических станций показал, что для бассейнов рек с отметкой 1500-2000 м и выше формула (2.3) при  $k = 1/3$  позволяет определить величину жидких осадков, согласующуюся с данными наблюдений, хотя формула (2.3) универсальна и пригодна для ведения расчета осадков и для других высот при других значениях  $k$ .

### **3. Задачи повышения пропускной способности оросительных каналов**

Экстенсивное земледелие при отсутствии опыта оросительной мелиорации в новых слабо изученных предгорных долинах и степях привело к засолению и снижению плодородия земель, а в ряде случаев к выходу земель из севооборота. Например, при освоении плодородных земель Вахшской долины в 1932-1940 гг. даже в сравнительно удовлетворительных условиях (подстилания почвы галечником) естественный отток вод с орошаемой территории был явно недостаточным. Он составлял только 5-6% количества воды, обильно подаваемой на орошение и промывку. Такая ситуация в более сложном виде наблюдается не только в недавно освоенных под полив замкнутых межгорных долин Таджикистана, но и в просторных степях Узбекистана и в орошаемых землях Туркменистана в зоне большого Кайракумского канала. Такое заключение, в частности, имеется и в отчете Научно-Консультативного Совета ЮНЕСКО по бассейну Аральского моря (SABAS) [11]:

«Площадь орошаемых земель с высоким уровнем грунтовых вод (менее 2 м от поверхности) превышает 30% от общей площади орошаемых земель в бассейне. Площадь засоленных земель (на которых урожайность культур падает на 20-50%) также составляет

около 30% от общей площади орошаемых земель, но это не те же земли. В Туркменистане, например, 44% орошаемых земель не являются ни заболоченными, ни засоленными, ни тем и другим вместе. Если прошлые тенденции засоления продолжатся, в течение нескольких десятилетий основная часть сельскохозяйственных земель в бассейнах рек станет непригодной для орошаемого сельского хозяйства, причем засоление рек нанесет огромный ущерб речным экосистемам и сделает их непригодными для питьевого водоснабжения. Экономические, экологические и социальные последствия будут огромны» (Водное видение бассейна Аральского моря. На 2025 год. ЮНЕСКО 2000, Париж, с.152). При этом Совет отмечает: «Несмотря на нынешний экономический кризис, Таджикистан имеет значительный потенциал для развития. Население страны хорошо образовано, земли плодородны и могут обеспечить производство продукции конкурентоспособной на внешнем рынке» (там же, с. 174). В табл.5 приведено современное состояние аграрной отрасли республики на 1990 г. и рекомендуемая SABAS-ом оптимальная статистика на 2025 г. [11-12].

Таблица 5

Современная (2000) и рекомендуемая на ближайшее будущее (2025) водохозяйственная статистика Таджикистана

№	Объекты водопотребления и их параметры	Настоящее	Будущее
1	Использование воды для полива, м <sup>3</sup> /га •расход воды: тыс.м <sup>3</sup> на тонну: зерна, риса, хлопка	>16000 >2.51; 10; 6	<8000 ≤1.1; 4.0; 2.6
2	Потери воды в каналах/потери воды в поле, %	>30/15	<15/10
3	Засоление орошаемых земель, в % от общего	>30-45	<10
4	Посевная площадь, тыс. га	809	2000
5	Орошаемая пашня, тыс. га •эффекты применения воды на поле, в %	720 ≤40	1500 >75
6	Обеспеченность питьевой водой: город/село, в %	<40-60/20-40	≥80/60
7	Структура посева и урожайность, тыс.га/ц/га • зерновые (пшеница, кукуруза, рис и др.) • технические культуры (хлопок и др.) • картофель, овощи, бахча • многолетние насаждения, сады, пл. винограда • кормовые	419/11;11;17 236/14 47.9/100;144;67 102.9/нет данных 107.6/17,. корм.Е	>500/20;40;40 ≥600/30 >125/300; 170 >300/оптимальн. 300/до 35 корм.Е

Очевидно, реализация предлагаемых рекомендаций SABAS`а и не только его требует коренного пересмотра установившихся в течение десятилетий традиций и способов землепользования, в частности поливного земледелия в регионе. Защита орошаемых земель от засоления и заболачивания зависит от многих факторов, определяющим из которых является качество проектных разработок по расчету конструктивных элементов канала, обеспечивающих его максимальную пропускную способность при минимуме поте-

ри воды на фильтрацию, как из крупных и малых каналов, так и при подаче воды непосредственно в поле.

### 3.1. Оптимальные модели открытых каналов

С давних времен известно, что при проектировании канала его уклон предопределяется рельефом и степенью размываемости грунтовых толщ района. Канал будет гидравлически наивыгоднейшим, если он при данном уклоне и допускаемой максимальной скорости обладает наибольшей пропускной способностью и устойчивостью своего русла. Например, если заданы геометрические параметры канала и его уклон, то задаваясь глубиной наполнения  $H$ , вычисляют площадь живого сечения  $\omega$ , смоченный периметр  $\chi$ , гидравлический радиус  $R = \omega / \chi$  потока, скоростной множитель – коэффициент  $C$  и затем определяют расход  $Q$  и среднюю скорость  $U = Q / \omega$  течения в канале по формуле Шези [13]:

$$Q = C\omega\sqrt{RI} \equiv K\sqrt{I}; \quad (K = C\omega\sqrt{R}) \quad (3.1)$$

Из множества возможных вариантов сечений наибольшей пропускной способностью обладает тот канал, который имеет наименьший смоченный периметр  $\chi$  и наибольший гидравлический радиус  $R$ , и, согласно формулы Шези, будет иметь наибольшую расходную характеристику  $K$ . В рамках теории гидравлического радиуса задача о наивыгоднейшем сечении канала сводится к определению соотношения между размерами ширины канала  $B$  по дну и  $H$  – глубины наполнения канала водой.

3.1.1. Рассмотрим канал полуэллипсоидальной формы сечения с большой и малой полуосями:  $B$  – половина ширины канала по свободной поверхности потока,  $H$  – глубина воды в канале ( $B > H$ ). Тогда уравнение эллипса, площадь и длина его определяются, соответственно [6]:

$$\frac{x^2}{B^2} + \frac{y^2}{H^2} = 1; \quad \omega = \pi BH; \quad \chi = E(e, \pi/2) \cong \pi \cdot 1,5(B + H) - \sqrt{BH}, \quad (3.2)$$

где  $E(e, \pi/2)$  – полный эллиптический интеграл 2-го рода,  $e = \sqrt{B^2 - H^2} / B$  – эксцентриситет эллипса. Тогда гидравлический радиус  $R$  в формуле Шези (3.1) согласно (3.2) определяется соотношением:

$$R = 0,5\omega / 0,5\chi = H / 1,5(1 + H/B) - \sqrt{H/B}.$$

Условие минимума смоченного периметра  $\chi$  ( $d\chi/dH = 0$ ) приводит к соотношению  $B = 9H$ . При этом канал полуэллипсоидального сечения, будет наивыгоднейшим, если его геометрические параметры удовлетворяют соотношениям:



$$B = 9H, R = 0,75H, \chi = 2\pi B/3, \omega_{\text{эн}} = \pi BH/2 \equiv 9\pi H^2/2. \quad (3.3)$$

3.1.2. Аналогичным образом для канала с глубиной  $H$  и шириной  $2B$ , с сечением вида параболы, симметричной относительно оси  $Oy$ , с длиной смоченного периметра  $\chi$  дуги  $ОММ_1$  и площадью  $\omega$  сегмента  $ОММ_1$  имеем, соответственно:

$$x^2 = 2py, \omega_{\text{ОММ}_1} = 4BH/3, \chi \cong 2B \left[ 1 + 2(H/B)^2/3 - 2(H/B)^4/5 \right],$$

где  $p$  – параметр параболы, для сегмента  $ОММ_1$ :  $p = B^2/2H$ .

Оптимальными гидравлическими элементами канала являются соотношения:

$$2B = 2,191H, p = 0,6H, R = 0.5447H, \chi = 1.38B = 1.512H.$$

3.1.3. Для канала трапецеидальной формы сечения площадь поперечного сечения  $\omega$  и длина  $\chi$  смоченного периметра определяются согласно формулам, соответственно:

$$\omega = 0.5H(B+b)H = b + 0.5H(\text{ctg } \beta_1 + \text{ctg } \beta_2) H,$$

$$\chi = b + \frac{H(\sin \beta_1 + \sin \beta_2)}{\sin \beta_1 \sin \beta_2} = \frac{\omega}{H} - \frac{H(\text{ctg } \beta_1 + \text{ctg } \beta_2)}{2} + \frac{H(\sin \beta_1 + \sin \beta_2)}{\sin \beta_1 \sin \beta_2},$$

где  $b$  и  $B$  – соответственно ширина канала по дну и по водной поверхности,  $H$  – глубина потока,  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1 > 0, \beta_2 > 0$  – величины заложения и углы наклона левого и правого откосов канала. Нетрудно доказать, что гидравлический радиус канала трапецеидального сечения, аналогично каналу формы полукруга, равен половине глубины потока, т.е.  $R = H/2$  и, согласно определения гидравлического радиуса, имеет место следующее тождество:

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{(b + 0.5H(\text{ctg } \beta_1 + \text{ctg } \beta_2))H}{b + H(\sin \beta_1 + \sin \beta_2)/\sin \beta_1 \sin \beta_2} \equiv \frac{H}{2}.$$

Отсюда, для наивыгоднейшей относительной ширины канала по дну получим формулу:

$$\frac{b}{H} = \frac{1 - \text{ctg } \beta_1}{\sin \beta_2} + \frac{1 - \text{ctg } \beta_2}{\sin \beta_1}. \quad (3.4)$$

Из (3.4) следует весьма важный для практики вывод о том, что в рамках понятий теории гидравлического радиуса оптимальная относительная ширина трапецеидального канала по дну существенно зависит только от углов наклона откосов канала к горизонту. Например, при  $\beta_1 = \beta_2 = 90^\circ$  из (3.4) получается  $b = 2H$  и трапецеидальный канал превращается в канал с параллельными стенками, с площадью поперечного сечения  $\omega = 2H^2$ . А в случае  $\beta_1 + \beta_2 = 90^\circ$  из (3.4) следует, что  $b = 0$  и трапеция трансформируется в треугольник, и максимальная пропускная способность канала имеет место при:

$$\operatorname{tg} (\beta_1 + \beta_2)/2 = 1. \quad (3.5)$$

Формула (3.5) представляет особый интерес, т. к. в этом случае при любом сочетании углов откоса независимо от наполнения канала его пропускная способность определяется характером этих углов. Например, при  $\beta_1 = \beta_2 = 45^\circ$  поперечное сечение канала примет вид прямоугольного треугольника с шириной  $2H$  по водной поверхности и глубиной  $H$ . При этом площадь сечения канала минимальная и равна  $\omega = H^2$ . Соотношение (3.4) является обобщенным индикатором выбора оптимальных геометрических параметров сечения канала трапециевидальной формы. При этом суммарная величина углов наклона может принимать значения лишь в отрезке  $90^\circ \leq \beta_1 + \beta_2 \leq 180^\circ$ , так как при  $\beta_1 + \beta_2 < 90^\circ$  в рамках понятий теории гидравлического радиуса принцип максимума гидравлического радиуса и оптимальности сечения потеряет свой смысл.

Очевидно, наспех спроектированные трапециевидальные каналы в период работы, в зависимости от уклона и прочности структуры грунта в связи с величиной расхода и пропускной способности, трансформируются и стремятся принять один из рассмотренных выше вариантов наивыгоднейших профилей. На рис. показано изменение поперечного сечения Кайракумского канала в створе 0.7 км от р. Амударьи [14]. Отсюда видно, что с течением времени проектный профиль, существенно меняясь, стремится к наивыгоднейшему полуэллипсоидальному виду.

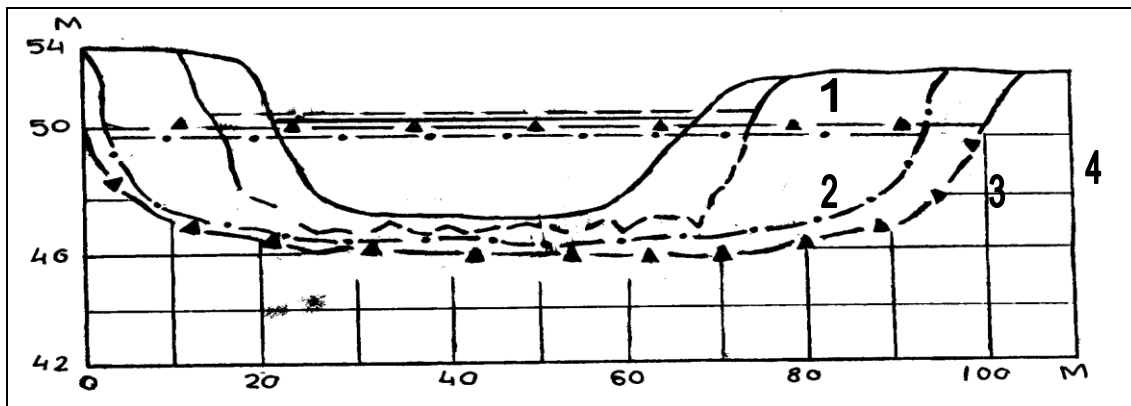


Рис. 1 – 1960 г., 2 – 1965 г., 3 – 1970 г., 4 – 1974 г.

Следовательно, если трасса крупного канала проходит через сыпучие (мелкий песок, супесь и т.д) грунты, то при уклонах менее 0.001 наивыгоднейшим является полуэллипсоидальная форма сечения. Кстати, полуэллипсоидальные каналы являются самыми наивыгоднейшими и для судоходства, так как, согласно (3.3),  $B_k = 2B = 18H$ . В долинах, где трасса каналов проходит через толщу связных грунтов (лесс, суглинков, глина и т.д.), оптимальным будет криволинейная трапеция, состоящая из сочетания прямых линий с

полуциркульными (парабола, полуэллипс и др.) кривыми. Для малых каналов, где глубина в два раза меньше, чем ширина русла по верху, самыми оптимальными являются полукруг, парабола, а также варианты трапецидальных каналов. При бороздковых поливах больших плантаций в гидроагротехническом отношении эффективной является борозда в виде равнобедренного треугольника с углами заложения 45°.

В табл. 6 на примере магистральных каналов Таджикистана и Туркменистана дан анализ соответствия проектных конструктивных параметров крупных каналов с полукруглыми выше характеристиками оптимальных моделей.

Таблица 6.

Соответствие проектных и реальных профилей крупных каналов к моделям теории гидравлического радиуса

Канал	В проекте канал – трапецидальный			В рабочем состоянии канал – криволинейная трапеция				R <sub>опт</sub> и ширина B <sub>опт</sub> канала полуэллипс		
	B, в м	B, в м	$\frac{R_{пр}}{H}$	$\frac{B}{H}$	B,	R <sub>раб</sub>	H	R <sub>опт</sub>	H	B <sub>опт</sub>
Пр.вт.ЯМК Пк 160+00	15	8.5	$\frac{1.48}{2.02}$	16.2	6.5	1.30	2,1	1.60	2.14	38.5
БГК Пк 116+00	23	18.5	$\frac{1.92}{2.23}$	21.5	17	1.86	2.3	1.73	2.30	41
БКК:0.7км От реки, проект	67	36.0	$\frac{3.85}{5.14}$	Трапеция трансформировалась в полуэллипс						
БКК:0.7км От реки	Профиль в 1960 г.→			44.4	B=0	2.56	3.4	2.57	3.43	61.7
БКК:0.7км От реки	Профиль в 1965 г.→			56.7	B=0	2.98	4	3.00	4.0	72
БКК:0.7км От реки	Профиль в 1970г.→			85.0	B=0	2.7	3.7	2.75	3.66	65.9
БКК:0.7км От реки	Профиль в 1975 г.→			94.4	B=0	3.38	4.6	3.43	4.57	82.3

Здесь: Пр.вт. ЯМК – «Правая ветвь» Яванского магистрального канала – русло на лесе; БГК – Большой Гиссарский канал – русло на лесе; БКК – Большой Кайраккумский канал – русло супесь и песок.

#### 4. К вопросу о рациональном использовании водных ресурсов

По гидродинамическому характеру подземные пресные воды Таджикистана значительно подвижны, так как большая часть их сосредоточена в песчаных отложениях межгорных долин и конусах выноса горных рек. Эксплуатационные запасы пресных подземных вод, пригодных для питьевого и других видов водоснабжения, в том числе и орошения, оцениваются величиной 6.65 км<sup>3</sup> в год. Межгорные и предгорные конусы выноса многих горных рек Таджикистана представлены валунно-галечными, галечно-песчаными и песчаными отложениями, которые являются крупными хранилищами –

«магазинами» природных вод. Это позволяет поставить и решить ряд практических задач теорий поливов и мелиоративной гидрогеологии в бассейнах горных рек Таджикистана, а также в песчаном бассейне Большого Кайраккумского канала Туркменистана (>1000 км). В частности, при решении проблемы оросительной мелиорации по борьбе с явлением засоления почвы необходимо реконструировать оросительную и проектировать дренажную систему таким образом, чтобы уровень грунтовых вод поддерживался на критической глубине (>2-3 м). Для решения этой задачи как в конусах выноса горных рек, так и на трассах оросительных каналов равнинных долин необходимо установить оросительные нормы таким образом, чтобы на  $Q_p$  м<sup>3</sup> подаваемой воды, поступающей из главного сооружения, подавалось  $Q_n$  м<sup>3</sup> подземной воды. На основе уравнения водного баланса для решения этой задачи нами получено соотношение [15]:

$$Q_{ck} = nbQ_p/ma + e/a, \quad (4.1)$$

которое является обобщением известного уравнения П.Я.Полубариновой-Кочиной [16] применительно к условиям поливного земледелия в аридных зонах. Здесь  $n$  и  $m$  – коэффициенты водоотдачи пласта ( $n < m$ ) и недостатка насыщения почвогрунтов в зоне аэрации,  $a$  – часть дебита  $Q_n$  скважины, идущая на питание растений с последующей ее транспирацией,  $b$  – доля потери воды из канала и в поле,  $e$  – доля питания грунтовых вод за счет атмосферных осадков. В частности, путем анализа комплекса природных и водохозяйственных факторов в предгорной Яхсуйской долине республики для коэффициентов уравнения (4.1) получены следующие оценки:  $0.4 < b < 0.5$ ,  $a = 0.8; 0.75$ ,  $n = 0.85m; 0.95m$  и  $e = 0.075$ . Тогда из (4.1) имеем следующие значения для дебита скважины, соответственно:  $Q_{скв} = 0,505Q_p$  и  $Q_{скв} = 0,728Q_p$  или в долях имеем – 505:1000 и 728:1000.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. За период 1960-90 гг. объём среднего годового стока рек Таджикистана, являясь сугубо региональным, ежегодно уменьшается на 0.2%. Ожидаемое в 2020-30 годы сокращение среднегодового стока рек республики на 7% при фактической амплитуде его колебаний, достигающей от -24% до +30%, представляется не существенным и локальным.

2. Улучшение мелиоративного состояния засоленных почв и повышение их продуктивности, рациональное использование водных ресурсов горных территорий, при современном состоянии водохозяйственной статистики, требует вести эффективную аграрную стратегию с ориентиром на будущее 20-30 лет в соответствии рекомендациями статистики (табл. 5).

3. Имеются различные пути рационального использования земельных и водных ресурсов бассейна Аральского моря (БАМ). Одним из них является реконструкция оросительных и дренирующих сооружений с целью повышения их эффективности и внедрение комбинированного метода эксплуатации поверхностных и подземных вод в соответствующих долинах БАМ. Для этого имеются достаточные гидроэнергетические ресурсы для ускоренного внедрения системы вертикального дренажа для орошения и водопользования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Таджикистан. Природа и природные ресурсы. Душанбе: Дониш, 1982, 602с.
2. Гидроэнергетические ресурсы Таджикской ССР (с учетом трансграничных вод). Л.: Недра, 1965, 657 с.
3. Шульц В.Л. – Проблемы преобразования природы Средней Азии, М.: Наука, 1967, с. 62.
4. а). Многолетние данные о режиме и ресурсах вод суши. Том 12. Таджикская ССР, Л.: Гидромет, 1987 г. б). Справочник по климату СССР. Вып. 31. Таджикская ССР, Л.: Гидромет, ч. 1-2 – 1966 г., ч. 4 –1969. в) Гидрологический ежегодник, Таджикистан, 1990.
5. Тахиров И.Г., Купайи Г.Д. Водные ресурсы Республики Таджикистан. Душанбе: НПИЦ РТ, 1994, ч.1-2 .
6. Sattarov M.A., Eshmirzoev I.E., Rakhimov F. On Estimation Methods and Rational use of Water Resources in Central Asia. Proc. XXXI IAHN Congress, Seoul, Korea, 2005, theme D, v. II, pp 1261-1263. Электронная версия в CD-ROM., 10 с..
7. Сборник докладов ученых Таджикистана. Национальный семинар по изменению климата. г. Душанбе, 2002, 53 с.
8. Чуб В.Е., Ососкова Т.А.. Изменение климата и поверхностные водные ресурсы Аральского моря. Бюллетень №3, САРНИГМИ им В.А.Бугаева, Ташкент, 1999, с. 5-14
9. Отчет Таджикского филиала Международного фонда по спасению Арала. Раздел I-II «Национальная программа Республики Таджикистан по оздоровлению и стабилизации социально-экологической обстановки в бассейне Аральского моря». Под ред. М.А.Саттарова. Душанбе, 2001, 37 с .
10. Саттаров М.А. – Материалы Межд. конф. «Водные ресурсы и водохозяйственные проблемы», Душанбе, 1999, с. 13-16.
11. Water Related Vision for the Aral Sea Basin. For the year 2025. UNESCO 2000, 237 p., Paris,07SP, France. Водное видение бассейна Аральского моря на 2025 год.
12. Пачаджанов Д.Н., Саттаров М.А. Видение проблем бассейна Аральского моря: Таджикистан. с. 20-25.
13. Яблонский В.С. Краткий курс технической гидромеханики. М.: Физматгиз, 1961, 356 с.
14. Аннаев С.А. Русловые процессы в крупных каналах. Ашхабад, 1986, 163 с.
15. Полубаринова-Кочина П.Я., Пряжинская В.Г., Эмих В.Н. Математические методы в вопросах орошения. М.: Наука. 1969, 216 с.

*Институт гидродинамики  
Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск,  
Министерство мелиорации и водного хозяйства  
Республики Таджикистан, Душанбе*

М.А.САТТАРОВ, И.Э.ЭШМИРЗОЕВ

### **ОИДИ УСУЛҲОИ БАҲОДИҲӢ ВА ИСТИФОДАИ САМАРАНОКИ ЗАХИРАҲОИ ОБИ ҲАВЗАИ БАҲРИ АРАЛ**

Дар мақола ҳолати имрӯзаи захираи обҳои дарёҳо, пирахҳо ва обҳои зерзаминии Чумхурии Тоҷикистон таҳқиқ карда шудааст. Услуби навовари ҳисоби раҳоби дарёҳои қухистони баланд, яқчанд моделҳои оптималии сохтмони канал ва рӯдхонаҳо, услуби мураккаби яқҷоя истифода бурдани обҳои дарё ва зерзаминӣ пешниҳод шуда, мутобиқати онҳо ба озмоишҳои амалиёти обёрӣ муайян карда шудааст.