

К вопросу о методике расчета элементов руслового баланса Амударьи

**Сорокин А.Г., Заитов Ш., Сорокин Д.А.,
Назарий А.М., Эргашев И.**

Балансовые расчеты БВО «Амударья» и НИЦ МКВК показывают, что после 1992 года невязки руслового баланса (разница между статьями расхода и прихода воды на участках реки) в среднем и нижнем течениях Амударьи возросли по отрицательному знаку. Для того, чтобы выделить из невязок руслового баланса Амударьи составляющую русловых потерь и руслового регулирования (и уменьшить, таким образом, невязки), в региональном информационно-аналитическом отделе НИЦ МКВК был проведен комплекс специальных исследований, направленных на:

- анализ существующих методик расчета батиметрических зависимостей – размеров речного потока (ширины, глубины, площади водной поверхности на участке реки) от его величины (расхода реки),
- уточнение морфометрических зависимостей реки Амударьи методом космического мониторинга,
- анализ существующих подходов к оценке элементов русловых балансов, выполняемых для реки Амударьи, главным образом, потерь воды,
- разработку методики расчета русловых потерь для среднего (участок от г/п Керки до г/п Дарганата) и нижнего (г/п Тюямуюн – г/п Саманбай) течений Амударьи,
- разработку методики расчета «руслового регулирования» – изменения объемов воды на участках реки в среднем и нижнем течениях,
- разработку методики расчета возвратного стока.

С целью уточнения морфометрических зависимостей реки Амударьи группой ГИС-специалистов НИЦ МКВК была проведена обработка космических снимков балансовых участков реки в ее среднем и нижнем течениях (рис. 1), получены зависимости площадей водной поверхности реки на участках и средних значений ширины потока (как отношений площадей водной поверхности к длине участка) от средних расходов воды в реке: $F = f(Q)$, $B = f(Q)$.

Для первого участка (г/п Келиф – г/п Керки) было скачено и обработано 28 снимков Landsat-8, охватывающих период с января 2017 по декабрь 2018 года, для второго участка (г/п Керки – г/п Ильчик) – 28 снимков, для третьего (г/п Ильчик – г/п Бирата/Дарганата) – 31, четвертого (г/п Тюямуюн – г/п Кипчак) – 26, пятого (г/п Кипчак – г/п Саманбай) – 37. Источник космических снимков – NASA (<http://earthexplorer.usgs.gov>). Обработка снимков велась по индексу выделения воды AWEI (Automated Water Extraction Index), позволяющего эффективно разделять водные и неводные пиксели.

Полученные морфометрические зависимости приведены в таблице 1. Наилучшая связь между расходом воды Q ($\text{м}^3/\text{с}$) и шириной потока B (км) получена для 1, 2 и 4 участков (коэффициент детерминации, характеризующий функциональную зависимость $R^2 = 0.92 \dots 0.94$), наихудшая – для пятого участка ($R^2 = 0.77$). Рекомендуется использовать полиномиальные зависимости 2-й степени, что дает лучший результат, чем аппроксимация по Лп.

Батиметрия реки (знание о размерах речного потока, зависящего от расходов воды) позволяет определять площади водной поверхности на участках реки и рассчитывать потери воды на испарение ($Q_{\text{ре}}$) с водной поверхности умножение площади водной поверхности на «чистое испарение» ($E - O$), мм. Испаряемость (E) рассчитывается по известным формулам в зависимости от климатических параметров, характеризующих климат на участках реки; здесь O – осадки, мм.

Таблица 1

Зависимости $B = f(Q)$, полученные при обработке космических снимков; размерность: $[B] = \text{км}$, $[Q] = \text{м}^3/\text{с}$

Участок реки Амударьи	Зависимость $B = f(Q)$	R^2
г/п Келиф – г/п Керки	$B = -6E-08Q^2 + 0.0005Q + 0.4$	0.94
г/п Керки – г/п Ильчик	$B = -5E-08Q^2 + 0.0004Q + 0.36$	0.93
г/п Ильчик – г/п Бирата/Дарганата	$B = -5E-08Q^2 + 0.0003Q + 0.26$	0.81
г/п Тюямуюн – г/п Кипчак	$B = -2E-07Q^2 + 0.0007Q + 0.18$	0.92
г/п Кипчак – г/п Саманбай	$B = -2E-07Q^2 + 0.0006Q + 0.2$	0.77

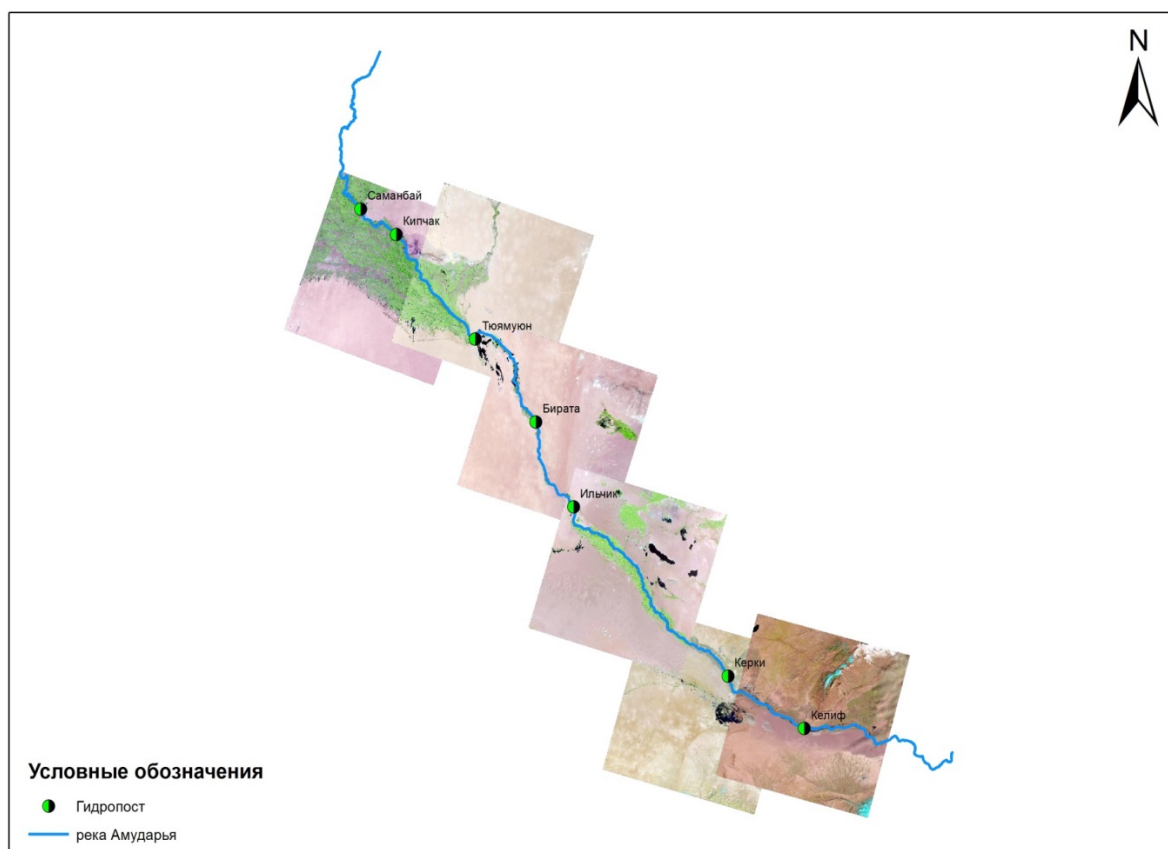


Рис 1. Схема расположения космических снимков, охватывающих реку Амударья от г/п Келиф до г/п Саманбай

Для расчета «руслового регулирования» - изменения объемов воды в русле на участке, кроме информации о зависимостях $V = f(Q)$ необходимо знать функции $h = f(Q)$, т.е. расчетные значения средних на участках глубин потока. Тогда объем воды на участке (W) можно рассчитать как произведение средней ширины (B), средней глубины (h) и длины (L) участка, т.е.:

$$W = B \times h \times L \quad (1)$$

а русловое изменение объема воды на участке реки, как разницу между объемами воды в конце и начале интервала времени « Δt » :

$$\Delta W = W(t + \Delta t) - W(t) \quad (2)$$

Здесь $W(t)$ – объем воды на участке реки длиной « L » в момент времени « t », соответствующий началу интервала « Δt ».

В качестве функции $h = f(Q)$ можно рекомендовать зависимости авторов, которые занимались исследованием морфометрии реки Амударья. При свободном формировании русла реки, не ограниченном сооружениями и др., река (поток) образует вполне определенную, устойчивую ширину (B); ее можно вычислить, зная среднюю глубину потока, и наоборот (Алтунин, 1964):

$$B^m / h = k \quad (3)$$

Где:

B – ширина реки (м),

h – средняя глубина реки (м),

m, k – некоторые переменные.

Для рек с легкоразмываемым руслом (к которым можно отнести и реку Амударью) переменная « k » находится в пределах от 8 до 12. Переменная « m » является кинематическим показателем – 0.6-0.7. К сожалению, данная зависимость не учитывают содержание в потоке руслоформирующих фракций, а значит, может давать некоторые неточности в оценке параметров потока реки Амударьи в летние месяцы. Для насыщенного потока, транспортирующего наносы в условиях среднего и нижнего течений Амударьи, расчет глубины потока « h » можно выполнять по морфометрической зависимости (Х. Исмагилов, 1982):

$$h = 0.25 \times Q^{0.33} * (f \times d)^{0.17} / (g \times I)^{0.17} \quad (4)$$

Где:

I – уклон реки,

d – средний диаметр частиц донных отложений (м),

f – коэффициент, учитывающий сопротивление размыву грунта, слагающего берега реки, для легкоразмываемого грунта $f = 0.5 - 1.0$, $g = 9.81$.

Х. Исмагилов (1982) аналогичную по структуре предложил функцию ширины речного потока $B = f(Q, I, d, f)$. Выполненное нами сравнение результатов вычисления ширины потока по $B = f(Q)$, полученной при обработке космических снимков, с результатами расчета по функции $B = f(Q, I, d, f)$, показало хорошее совпадение значений « B » для среднего течения для расходов воды выше 2500 м³/с, – расхождение 2-3 %. Для нижнего течения расчеты по функции $B = f(Q, I, d, f)$ дают отличные от

$V = f(Q)$ значения, приблизительно на 20 % превышающие $V = f(Q)$; исключение составляет расчет при расходах $< 500 \text{ м}^3/\text{с}$ – расхождение в пределах 5 %. Для расчета глубины потока, помимо функции Х. Исмагилова $h = f(Q, I, d)$, можно использовать, полученные нами обработкой данных измерений на гидропостах, зависимости $h = f(Q, I, d, f)$ (табл. 2). Зависимости построены по данным, предоставленным БВО «Амударья».

Таблица 2

Зависимости $h = f(Q)$, полученные при обработке измерений на гидропостах; размерность: $[h] = \text{м}$, $[Q] = \text{м}^3/\text{с}$

Посты измерений на реке Амударья	Зависимости $h = f(Q)$
г/п Керки	$h = -5\text{E-}07Q^2 + 0.002Q + 2.03$
г/п Бирата/Дарганата	$h = -1\text{E-}07Q^2 + 0.0008Q + 1.29$

Согласно замерам 2021 года, средняя глубина воды в г/п Керки изменялась в октябре–марте от 2 м до 4 м, в апреле–сентябре от 3 м до 4.5 м, в г/п Дарганата – от 1.5 до 3.0 м, в г/п Тюямуюн – в октябре–марте от 1.5 до 2.9 м, в апреле–сентябре от 2.8 м до 4 м. На участке г/п Келиф – г/п Керки при изменении расхода воды $Q = 0.5 - 4.6 \text{ тыс.м}^3/\text{с}$, ширина потока изменялась в пределах $V = 0.54 - 1.53 \text{ км}$; на участке г/п Керки – г/п Бирата (Дарганата) – при $Q = 0.1 - 3.2 \text{ тыс.м}^3/\text{с}$, $V = 0.18 - 1.29 \text{ км}$; на участке г/п Тюямуюн - г/п Саманбай – при $Q = 0.05 - 1.9 \text{ тыс.м}^3/\text{с}$, $V = 0.17 - 1.08 \text{ км}$.

Возвратный сток в Амударью мы предлагаем рассчитывать по зависимостям расходов коллекторов ($Q_c, \text{м}^3/\text{с}$), сбрасываемым с крупных орошаемых массивов в функции от расходов водозабора в каналы ($Q, \text{м}^3/\text{с}$) из Амударьи, поступающие в эти массивы. Данный эмпирический подход, конечно, не раскрывает всю схему водных потоков (поскольку в формировании коллекторного стока орошаемых массивов участвуют не только водные ресурсы Амударьи, но и местные ресурсы, а в Амударью сбрасывается только часть сформированного коллекторного стока), но дает вполне приемлемые результаты по линейным зависимостям (R^2 около 0.85) (табл. 3).

Таблица 3

**Зависимости $Q_c = f(Q)$, полученные при обработке
данных БВО «Амударья» А. Назарий; размерность: m^3/c**

Орошаемые массивы	Зависимости $h = f(Q)$
Каршинский	$Q_c = 0.04Q + 11.8$
Бухарский (октябрь-март)	$Q_c = 0.34Q + 5.0$
Бухарский (апрель-сентябрь)	$Q_c = 0.22Q - 10.0$
Лебап (октябрь-март)	$Q_c = 0.49Q + 3.8$
Лебап (апрель-сентябрь)	$Q_c = 0.43Q + 27.4$

Если подставить рассмотренные выше элементы руслового баланса (потери на испарение с водной поверхности реки, возвратный сток в реку, изменение объема воды в реке) в балансовые уравнения для среднего и нижнего течения Амударьи, и решить их (совместно с данными по водозабору, а также расходам воды в начале и конце участка) для вегетационного периода (апрель–сентябрь), то мы получим, как правило, отрицательные невязки, указывающие на неучтенные потери воды из реки, которые значительно превышают величину допустимых ошибок измерения стока. Одно из возможных объяснений появления таких невязок – наличие в реке фильтрационных потоков (потерь), которые при анализе фактического руслового баланса Амударьи не учитываются.

Гипотеза о наличии фильтрационных потерь из реки Амударья впервые была поставлена В.И. Куниным (1947) и А.К. Проскуряковым (1953) и в дальнейшем подтверждена Ю.Н. Ивановым (1971), а также исследованиями САНИИРИ (Каюмов, 1990), (Сорокин, 1990). По условиям формирования фильтрационного потока среднее течение реки Амударьи можно разделить на два участка: первый – от г/п Керки до г/п Ильчик и второй – от г/п Ильчик до г/п Бирата (Дарганата). На первом участке существует фильтрационный поток из реки в направлении левого берега и движение фильтрационного потока в виде подруслового потока реки, который на этом участке формируется; боковое растекание фильтрационного потока в сторону правого берега предотвращается потоком грунтовых вод, образующихся на орошаемой зоне правобережной территории и движущихся по уклону в сторону реки. Второй участок среднего течения реки Амударья представляет собой зону выклинивания подруслового потока, чему способствуют узкая долина и малопроницаемые коренные породы; расход вы-

клинивания на втором участке, очевидно, составляет часть фильтрационных потерь первого участка. В нижнем течении (третий участок – от г/п Тюямуюн до г/п Саманбай) формируется фильтрационный поток из реки в грунтовые воды.

Специальные исследования и опыт эксплуатации оросительных систем, питающихся мутной амударьинской водой, показывает, что после пропуска мутной воды потери на фильтрацию из каналов уменьшаются в два-три раза: (Бекимбетов, 1976; Джаманкараев, Бузунов, 1979). Уменьшение потерь воды объясняется образованием при пропуске мутной воды коагуляционной пленки из мелких илистых частиц. В русле реки Амударьи образование коагуляционной пленки возможно только на отдельных участках с малыми скоростями течения. Однако, подтверждаемое рядом натурных исследований, образование в приданной области вязкого потока из воды с высокой мутностью может повлиять на процесс фильтрации. Учет этого влияния возможен по эмпирической зависимости, где коэффициент фильтрации зависит от коэффициента фильтрации при осветленной воде ($K_{\phi 0}$) и мутности потока (R^m)Ж

$$K_{\phi} = K_{\phi 0} \times R^m \quad (5)$$

Основываясь на данной гипотезе для части среднего течения реки (участок г/п Керки – г/п Ильчик) была предложена следующая функция фильтрационного расхода:

$$Q_{\phi} = K_{\phi 0} \times L \times B \times Q^n \times R^m \quad (6)$$

Где:

n , m – коэффициенты, которые определяются опытным путем в результате численных экспериментов, минимизирующих невязки русловых балансов на участках реки.

Таким образом, был применен эмпирический подход, основанный на поиске зависимости фильтрационного потока от коэффициента фильтрации ($K_{\phi 0}$), ширины водного потока (B), длины участка (L), расхода воды (Q) и мутности потока (R). Данная зависимость выводится из закона Дарси:

$$Q_{\phi} = K_{\phi} \times F_{\phi} \times I_{\phi} \quad (7)$$

в предположении, что градиент является функцией расхода воды $I_{\phi} = f(Q)$, а площадь фильтрации определяется произведением:

$$F_{\phi} = L \times B \quad (8)$$

Для участка реки г/п Ильчик – г/п Бирата (Дарганата) данный подход не приемлем, поскольку на этом участке происходит выклинивание подруслового потока в русло реки (обратная фильтрация), величина которого может быть связана с потерями на фильтрацию на вышележащих участках реки, где формируется подрусловой поток:

$$Q_{\text{фпр}(i)} = L \times B \times Q_{\text{ф}(i-1)}^p \quad (9)$$

Где:

$Q_{\text{фпр}(i)}$ – расход выклинивания подруслового потока в русло реки на i -м участке (приток в русло),

$Q_{\text{ф}(i-1)}$ – фильтрационные потери на вышележащем $(i-1)$ -м участке,

p – коэффициент, который определяется опытным путем. Для расчета фильтрационного потока нижнего течения была предложена аналогичная (6) расчетная зависимость.

Вышеизложенная гипотеза формирования фильтрационных потерь реки Амударья в ее среднем и нижнем течениях была предложена и исследована еще в начале 1990-х годов (Сорокин, 1990), но не была реализована в виде рабочего расчетного инструмента и не внедрена в практику составления русловых балансов БВО «Амударья», хотя и предлагалась этой организации.

В данной работе расчеты в нижнем течении реки (участок г/п Тюямуюн – г/п Саманбай) были выполнены на данных двух временных периодов: 1970-1979 гг. и 1980-1988 гг. Периоды отличаются тем, что в первый из них по реке проходил мутный поток, о чем свидетельствуют сравнительно небольшие фильтрационные потери (1.3–2.9 км³/год); во второй период (когда в эксплуатацию ввели Тюямуюнский гидроузел), по причине начала процесса заиления Руслового водохранилища, по реке ниже ТМГУ проходил частично осветленный поток, о чем свидетельствует увеличение фильтрационных потерь (2.5–4.3 км³/год). Фильтрационные потери за счет уменьшения мутности потока в реке в среднем увеличились на 1.3 км³/год (в 1.7 раз). Таким образом, данные расчеты показывают эффективность рекомендуемых промывок Руслового водохранилища ТМГУ, благодаря которым речной поток в низовьях реки повышает мутность воды и тем самым снижает фильтрационные потери.

В региональном информационно-аналитическом отделе НИЦ МКВК результаты данных исследований были обработаны, что позволило получить зависимости фильтрационных потоков на трех характерных участках реки Амударья (рис. 2-4).

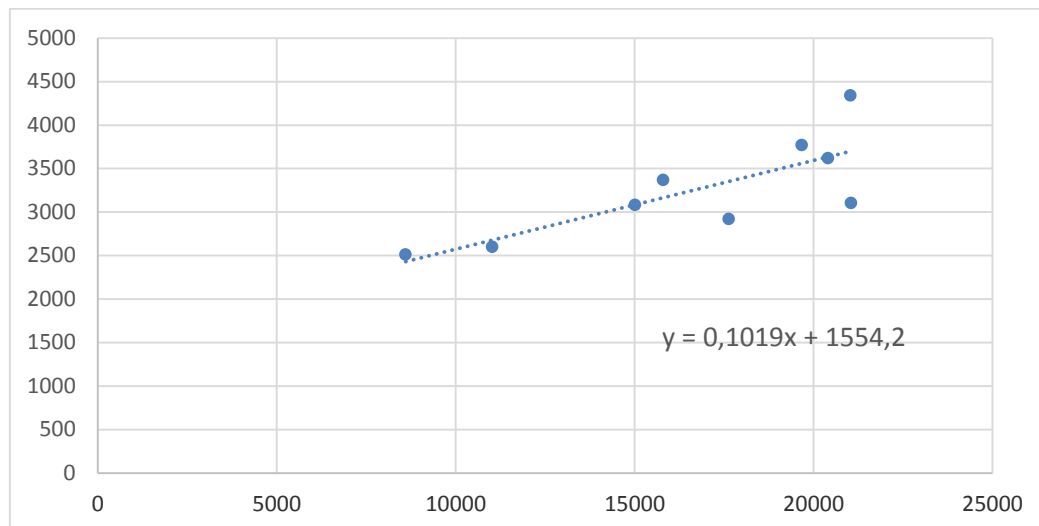


Рис. 2. Зависимость годовых объемов фильтрации из р. Амударьи от среднего годового стока на участке г/п Тюямуюн – г/п Саманбай, млн.м³ (обработка данных моделирования 1980-1988 гг.)

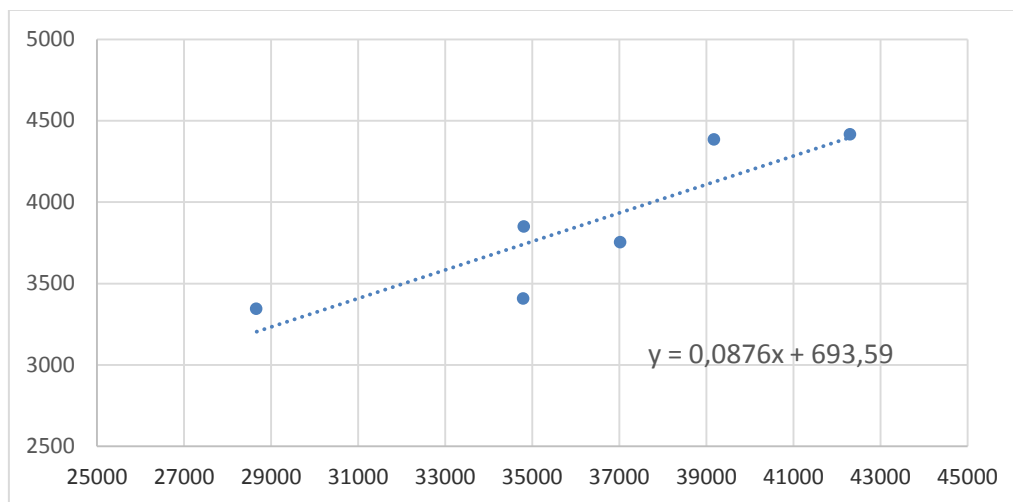


Рис. 3. Зависимость годовых объемов фильтрации из р. Амударья от среднего годового стока на участке г/п Керки – г/п Ильчик, млн.м³

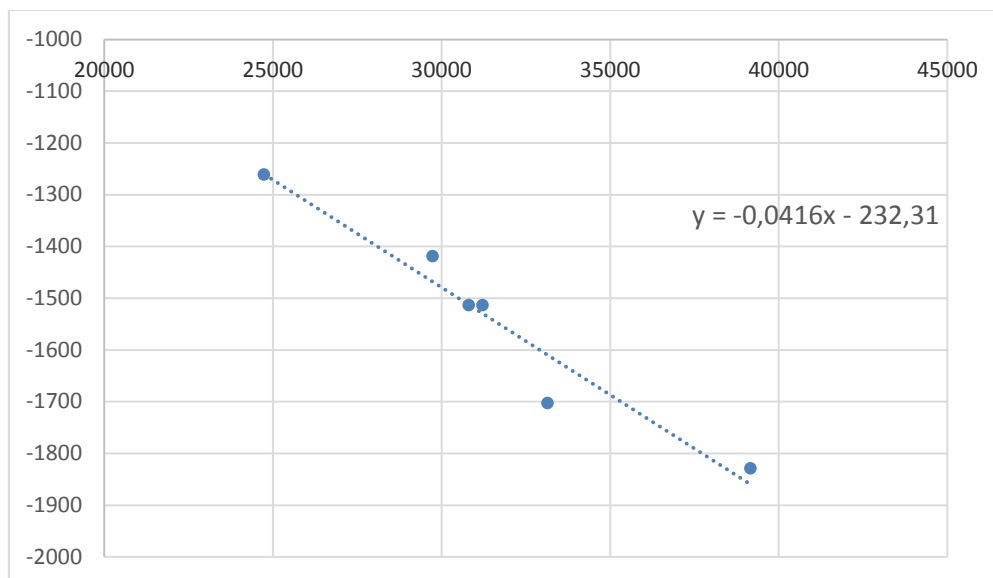


Рис. 4. Зависимость годовых объемов выклинивания подруслового стока в реку Амударью от среднего годового стока на участке г/п Ильчик –г/п Дарганата, млн.м³ (обработка данных моделирования 1979-1985 гг.)

Согласно оценке НИЦ МКВК, годовые потери на испарение с водной поверхности реки Амударья изменяются от 1.5 км³ в маловодные годы до 2.5 км³ в многоводные. Фильтрационные потери в среднем течении могут изменяться в пределах 1.0–1.9 км³, а в низовьях – 2.5–3.6 км³. Таким образом, суммарные потери на испарение и фильтрацию составляют 5–8 км³, в среднем 6.5 км³. Если учесть, что потери в водохранилищах ТМГУ оцениваются в среднем в 1.2 км³, общие потери ниже г/п Келиф в среднем составят 7.7 км³ (12 % от среднего стока малого бассейна Амударьи за 2015–2021 гг.), а максимальные – 9.5 км³ (14 % от стока многоводного года).

Литература

1. Алтунин С.Т. Водозаборные узлы и водохранилища, 1964.
2. Кунин В.И. Происхождение подземных вод Кара-Кумов. Известия ВГО. Том 79, вып. 1. 1947.
3. Проскуряков А.К.. Водный баланс р. Амударьи на участке от г. Керки до г. Нукус. Гидрометеоиздат, 1953.
4. Иванов Ю.Н. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 14. Средняя Азия, вып. 3. Бассейн Амударьи. Л: Гидрометеоиздат. 1971.
5. Бекимбетов Н.Б. Производственные исследования режима работы каналов в связи с вводом в эксплуатацию Тахиаташского гидроузла и разработка мероприя-

тий по улучшению их эксплуатации. Нукус. 1976.

6. Джаманкараев С.Д., Бузунов И.А. Руслые деформации при эксплуатации оросительных систем в низовьях Амударьи. Нукус. 1979.

7. Исмагилов Х. Сел ва ундан сакланиш, Т, Мехнат, 1982

8. Каюмов О.А. Рекомендации по управлению водно-солевым, наносным и уровенным режимами р. Амударьи и водохранилищ Тюямуюнского гидроузла, НПО САНИИРИ, 1990.

9. Сорокин А.Г. Отчет о НИР «Разработать и внедрить мероприятия по повышению эффективности регулирования стока Туямуюнским гидроузлом в интересах ирригации и водоснабжения населения низовьев Амударьи», НПО САНИИРИ, 1990.