

Научно-информационный центр
Межгосударственной координационной водохозяйственной комиссии
Центральной Азии

А.Г. Сорокин

Методология расчета руслового баланса Амударьи

Ташкент 2023

Речную систему как объект планирования распределения и регулирования стока, можно описать системой дифференциальных уравнений сохранения массы (количества) вещества, имеющих свою специфику трансформации для участков реки без водохранилища:

$$dW_i / dt = Q_i^H - Q_i^K + Q_i^{\text{бпр}} - k^B \times Q_i^B - Q_i^{\text{п}} - Q_i^{\text{эк}}$$

$$Q_i^{\text{п}} = Q_i^{\text{пи}} - Q_i^{\text{о}} + Q_i^{\text{пф}} - Q_i^{\text{фпр}}$$

$$Q_i^{\text{бпр}} = Q_i^{\text{рек}} - Q_i^{\text{воз}}$$

$$Q_i^{\text{эк}} = k^{\text{э}} \times (Q_i^{\text{оз}} + Q_i^{\text{А}}) + Q_i^{\text{сэк}} + Q_i^{\text{авэ}}$$

$$Q_{i+1}^H = Q_i^K$$

$$Q_i^{\text{max}} \geq Q_i^K \geq Q_i^{\text{сан}}$$

$$Q_i^{\text{пи}} - Q_i^{\text{о}} = (E_i - O_i) \times L_i \times V_i / dt$$

Здесь:

t – время (с), i – участок реки, $i = [1, N]$, N – количество участков,

W_i – объем воды на участке реки (м^3),

Q_i^H – расход воды в начале участка (здесь и далее для Q – $\text{м}^3/\text{с}$),

Q_i^K – расход воды в конце участка,

$Q_i^{\text{бпр}}$ – расход бокового поверхностного притока на участок,

Q_i^B – расход требуемого водозабора на участке (лимит на водозабор),

k^B – коэффициент урезки требуемого водозабора (лимита),

$Q_i^{\text{п}}$ – расход русловых потерь на участке,

$Q_i^{\text{эк}}$ – расход требуемого экологического попуска,

$k^{\text{э}}$ – коэффициент урезки экологического попуска,

$Q_i^{\text{пи}}$ – расход потерь на испарение из реки,

$Q_i^{\text{пф}}$ – расход потерь на фильтрацию из реки, как функция параметров потока (расход, ширина, мутность) и длины участка,

Q_i° – расход осадков, приходящих на участок,

$Q_i^{\text{фпр}}$ – расход притока воды из грунтовых вод в реку на участке (из подруслового потока), как функция параметров потока и длины участка, а также фильтрационных потерь на вышерасположенном участке,

$Q_i^{\text{рек}}$ – расход бокового притока по рекам на участок,

$Q_i^{\text{воз}}$ – расход бокового притока по коллекторам и каналам на участок (возвратный сток), как функция водозабора $Q_i^{\text{воз}} = f(Q_i^{\text{в}})$,

$Q_i^{\text{оз}}$ – расход требуемого притока воды в систему озер Приаралья,

$Q_i^{\text{А}}$ – расход требуемого притока воды в Аральское море,

$Q_i^{\text{сэк}}$ – расход санитарно-экологических попусков в каналы нижнего течения Амударья, $Q_i^{\text{авэ}}$ – расход аварийно-экологических попусков в каналы среднего и нижнего течения Амударья,

$Q_i^{\text{сан}}$ – санитарный расход по руслу реки,

Q_i^{max} – максимальный допустимый расход по реке, L_i – длина участка реки (м),

B_i – средняя на участке ширина реки (м), как функция среднего расхода воды на участке $B_i = f(Q_i)$ (зависимости, полученные обработкой космических снимков) или как функция, полученная по зависимостям С.Т.Алтунина и Х.А.Исмагилова, E_i ,

O_i – испаряемость с водной поверхности и осадки на 1 м^2 водной поверхности (м).

Реализация модели предлагается в виде алгоритмов водного баланса участков реки (руслового баланса) и водного баланса водохранилищ, увязанных между собой по течению реки Амударья, с шагом по времени 1 месяц.

Изменение объема воды на участке реки во времени (t) можно представить как:

$$dW / dt = \Delta W / \Delta t = [W(t+\Delta t) - W(t)] / \Delta t$$

Где:

ΔW – приращение функций, т.е. изменение объема воды в реке (м^3),

Δt – приращение аргумента (количество секунд в 1 месяце),

$W(t+\Delta t)$, $W(t)$ – объемы воды в реке в конце месяца и в его начале.

Приращение функции ΔW будем называть русловым регулированием – изменением объема воды в реке за временной интервал Δt . Если $\Delta W > 0$, то в реке за Δt происходит наполнение русла реки, и соответственно, на эту величину уменьшение объема воды в конце участка реки, если $\Delta W < 0$, то в реке за Δt происходит уменьшение объема воды в русле реки, и соответственно, на эту величину увеличение объема воды в конце участка реки.

Расчет руслового баланса (участок реки без водохранилища) ведется дискретно за каждый интервал времени Δt на каждом i -том участке по формулам:

$$W(t+\Delta t) - W(t) = [Q_i^H - Q_i^K + Q_i^{\text{опр}} - k^B \times Q_i^B - Q_i^П - Q_i^{\text{ЭК}}] \times \Delta t$$

Поиск наилучшего решения предлагается осуществлять в имитационном режиме, не допускающем дефицита воды в бассейне, перебором управляющих воздействий: коэффициентов (k^B), урезающих первоначально установленные лимиты водозаборов в каналы, при соблюдении экологических попусков (k^3). Коэффициенты урезки (k^B) предлагается искать с шагом их изменения 0.5, т.е.: $k^B = 1$ (урезка отсутствует), $k^B = 0.95$ (урезка 5 %), $k^B = 0.9$ (урезка 10 %) и т.д.

Предлагается, что управляющие воздействия k^B , k^3 будут теми переменными, которые пользователь электронных правил сможет изменять при решении задачи планирования распределения водных ресурсов и регулирования стока водохранилищами.

При дефиците воды в бассейне реки Амударья, когда $Q_{i=N}^k < 0$ (здесь N – конечный створ речной сети), начинается урезка коэффициентов k_i^B и k_i^3 с тем, чтобы было достигнуто условие $Q_{i=N}^k \geq 0$.

При расчете руслового баланса реки Амударья **в разрезе суток** предлагается ввести в систему балансовых уравнений динамический фактор – расход руслового регулирования Q_r , т.е. расход наполнения или опорожнения русла реки на участке. Здесь принимается гипотеза: речной участок оказывает такое же регулирующее воздействие на поток реки, как равное по объему водохранилище.

Используя, предложенные в проекте “Электронные правила” рекомендации по морфометрическим зависимостям (смотрите ниже),

позволяющим по расходу воды и другим параметрам рассчитывать объем воды в реке на участке (условном водохранилище), можно русловое регулирование Q_r определить по разнице объема воды W в реке в начале (t) и в конце ($t+\Delta t$) расчетного интервала Δt (сутки):

$$Q_r(\Delta t) = [W(t+\Delta t) - W(t)] / \Delta t$$

$$W(t+\Delta t) = f [Q(t+\Delta t)]$$

$$W(t) = f [Q(t)]$$

Здесь расход $Q(t)$ можно условно принять равным расходу воды за период времени, предшествующий периоду Δt , а $Q(t+\Delta t)$ равным $Q(\Delta t)$.

Если $Q_r(\Delta t) > 0$, то объем воды в русле реки увеличивается, а расход воды в реке уменьшается на эту величину, а если $Q_r(\Delta t) < 0$ - объем воды в русле реки уменьшается, а расход воды в реке увеличивается на эту величину. Влияние руслового регулирования особо заметно на резком подъеме паводка (когда регулирование снижает пики паводка) и резком спаде паводка, когда русловое регулирование пополняет нисходящий поток.

В алгоритм (расчетную схему) трансформации суточных расходов воды реки Амударья на участках Керки–Дарганата и Тюямуюн–Саманбай (который включен в виде компьютерной модели в интерфейс “Электронных правил”) введено “времени добегания” расхода воды от створа начального створа № 1 к конечному створу № 2 балансового участка.

Имея эмпирическую функцию “времени добегания” на единицу расстояния (км) τ_L (сек/км) участка реки (имеющего свою специфику формирования “времени добегания”) можно рассчитать “время добегания” на участке τ длиной L :

$$\tau = L \times \tau_L$$

Учет “времени добегания” позволяет определить сдвигку во времени (лаг), за который расход воды, рассчитанный по балансовому уравнению, достигнет конечного створа.

Поясним на примере. Пусть в створе 1 (начальный створ участка реки) задан временной ряд из 10 суток: $\Delta t = \Delta t_1, \dots, \Delta t_{10}$. В нарастающем итоге для створа 1 имеем на временной оси t :

$$t_1 = \Delta t_1, t_2 = t_1 + \Delta t_2, \dots, t_{10} = t_9 + \Delta t_{10}$$

Аналогично в створе 2 на временной оси t имеем:

$$t_1 = \Delta t_1 + \tau(\Delta t_1), t_2 = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \tau(\Delta t_2)$$

Используя информацию, полученную от БВО “Амударья” (данные ТЭО АСУБ Амударья, Союзгипроводхоз, 1989 г), о значениях “времени добегаия” τ в среднем и нижнем течениях реки Амударьи, мы получили зависимости “времени добегаия” на 1 км от расходов воды на участках г/п Керки – г/п Дарганата (Бирата) и г/п Тюямуюн – г/п Кипчак (таблица 1).

Таблица 1

“Время добегаия” расхода воды Амударьи

| Расход воды Q, м ³ /с | г/п Керки – г/п Дарганата | | г/п Тюямуюн – г/п Кипчак | |
|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|
| | τ , сутки | τ_L , сутки/км | τ , сутки | τ_L , сутки/км |
| 500 | 6,0 | 0,014 | 3,7 | 0,022 |
| 1000 | 5,5 | 0,013 | 3,1 | 0,019 |
| 2000 | 3,4 | 0,008 | 2,0 | 0,012 |
| 3000 | 2,5 | 0,006 | 1,6 | 0,010 |
| 4000 | 1,9 | 0,004 | 1,3 | 0,008 |
| 5000 | 1,6 | 0,004 | 1,0 | 0,006 |
| 6000 | 1,4 | 0,003 | 0,8 | 0,005 |

Сравнение значений τ_L для одних и тех же расходов воды в среднем и нижнем течениях показывает, что в нижнем течении “время добегаия” на 1 км приблизительно в 1.5 раза больше, чем в среднем течении.

Для того, чтобы рассчитать все статьи руслового баланса Амударьи, в рамках проекта “Электронных правил” 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), и уточнение морфометрических зависимостей реки Амударьи методом космического мониторинга,
- анализ существующих подходов к оценке потерь из реки Амударья, и разработку рекомендаций 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 рекомендаций по расчету возвратного коллекторно-дренажного стока в реку Амударью.

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, - 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 скачано 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 сбора 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 приводятся в таблице 2. 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 $R^2 = 0.92...0.94$), наихудшая – для 5 участка ($R^2 = 0.77$). Рекомендуется использовать полиномиальные 2-й степени зависимости, что дает лучший результат, чем аппроксимация по Ln.

В качестве функции $h = f(Q)$ можно рекомендовать зависимости авторов, которые занимались исследованием морфометрии реки Амударья.

Таблица 2

Зависимости $V = f(Q)$, полученные при обработке космических снимков;

размерность: $[V] = \text{км}$, $[Q] = \text{м}^3/\text{с}$

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

Для насыщенного потока, транспортирующего наносы в условиях среднего и нижнего течений Амударья, расчет глубины потока “h” можно выполнять по морфометрической зависимости Х. Исмагилова [1982]:

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

Где:

I – уклон реки, d – средний диаметр частиц донных отложений (м),

f – коэффициент, учитывающий сопротивление размыву грунта, слагающего берега реки,

для легкоразмываемого грунта $f = 0.5 - 1.0$, $g = 9.81$.

Для расчета глубины потока, помимо функции Х. Исмагилова $h = f(Q, I, d, f)$ для г/п Керки и г/п Дарганата можно использовать полученные нами зависимости (таблица 3) путем обработки данных измерений на этих гидростях (информация, представленная БВО “Амударья”).

Таблица 3

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 | $h = -5E-07Q^2 + 0.002Q + 2.03$ |
| г/п Бирата/Дарганата | $h = -1E-07Q^2 + 0.0008Q + 1.29$ |

Возвратный сток в Амударью мы предлагаем рассчитывать по зависимостям расходов коллекторов (Q_c , $\text{м}^3/\text{с}$), сбрасываемых с крупных орошаемых массивов, 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. 4.

Таблица 4

Зависимости $Q_c = f(Q)$, полученные при обработке данных БВО “Амударья” (А.Назарий); размерность: $\text{м}^3/\text{с}$

| 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) | $Q_c = 0.43Q + 27.4$ |

Алгоритм оценки русловых потерь реки Амударья, рекомендуемый “Электронными правилами”, предполагает расчет отдельно потерь на испарение и отдельно потерь на фильтрацию. Потери на фильтрацию рассчитываются умножением площади водной поверхности реки (как произведение средней на участке ширины потока на длину участка) на чистое испарение – разница между испаряемостью с водной поверхности и осадками (в сантиметрах / за период). Расчет потерь на фильтрацию основывается на ранее проводимых исследованиях (смотрите ниже).

По условиям формирования фильтрационного потока среднее течение реки Амударья 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 выклинивания 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 Н.Б. [1976], Джаманкараев С.Д., Бузунов И.А [1979]. Уменьшение потерь воды объясняется образованием при пропуске мутной воды кольматационной пленки из мелких илистых частиц.

В русле реки Амударья образование кольматационной пленки возможно только на отдельных участках с малыми скоростями течения. Однако, подтверждаемое рядом натурных исследований, образование в придонной 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_{ϕ_0}) и мутности потока (R^m).

Вышеизложенная гипотеза формирования фильтрационных потерь реки Амударья в ее среднем и нижнем течениях была предложена и исследована еще в начале 1990-х годов [Сорокин А.Г., 1990], но не была реализована в виде рабочего расчетного инструмента и не внедрена в практику составления русловых балансов БВО “Амударья”, хотя и предлагалась для этой организации.

В рамках проекта “Электронных правил” результаты исследований [Сорокин А.Г., 1990] были обработаны, что позволило получить зависимости фильтрационных потоков на трех характерных участках реки Амударья (рисунки 1 – 3).

Согласно оценке, выполненной по алгоритму “Электронных правил”, 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.

Если учесть, что потери в водохранилищах ТМГУ оцениваются в среднем в 1.2 км³, общие потери водных ресурсов в реке и ТМГУ (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).

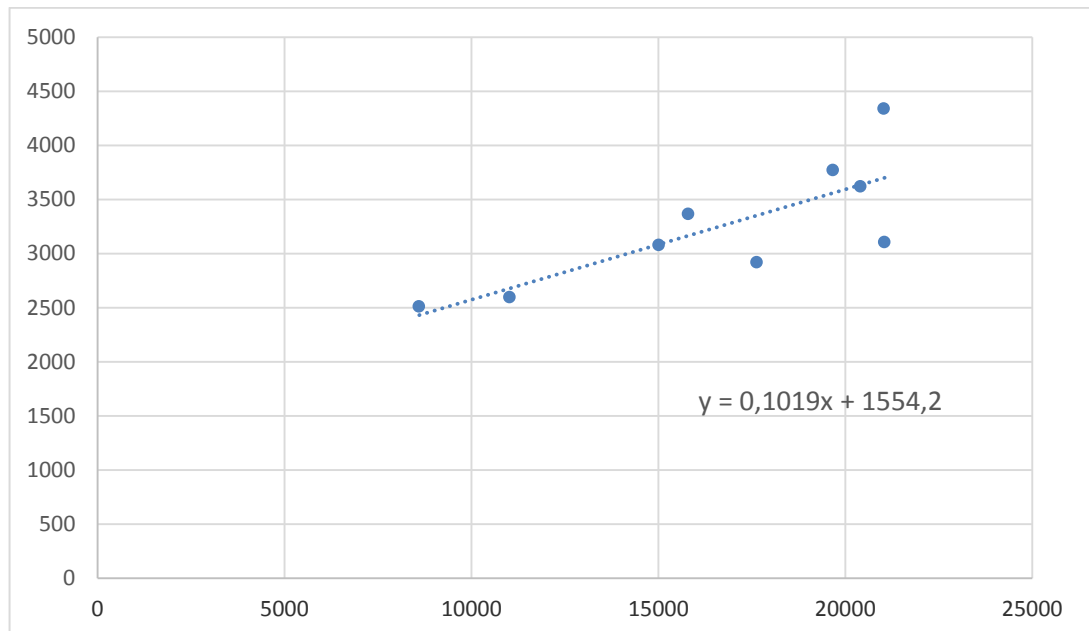


Рис 1. Зависимость годовых объемов фильтрации из р. Амударья от среднего годового стока на участке г/п Тюямуюн – г/п Саманбай, млн.м³ (обработка данных моделирования 1980-1988 гг.)

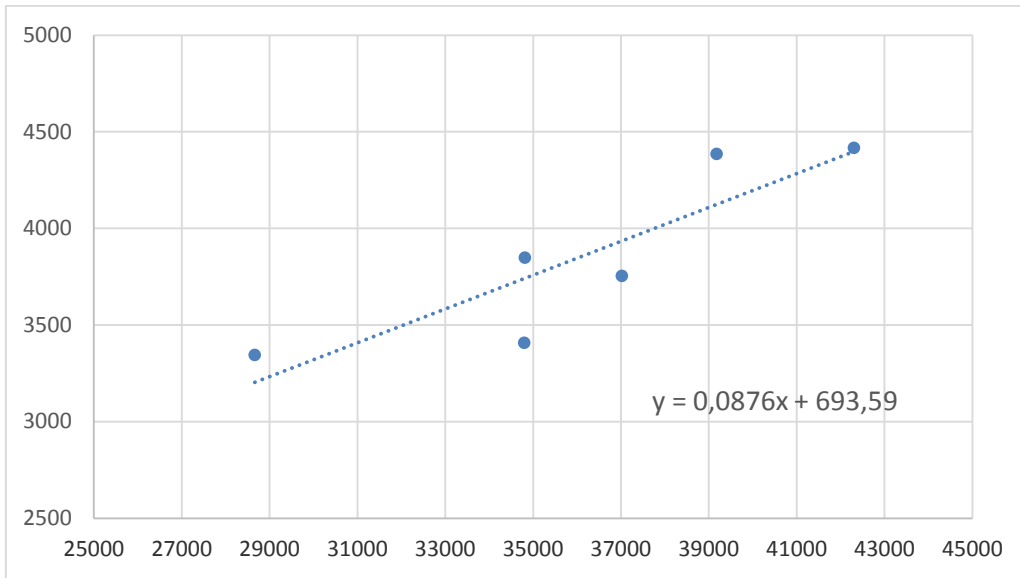


Рис 2. Зависимость годовых объемов фильтрации из р. Амударья от среднего годового стока на участке г/п Керки – г/п Ильчик, млн.м³ (обработка данных моделирования 1979-1985 гг.)

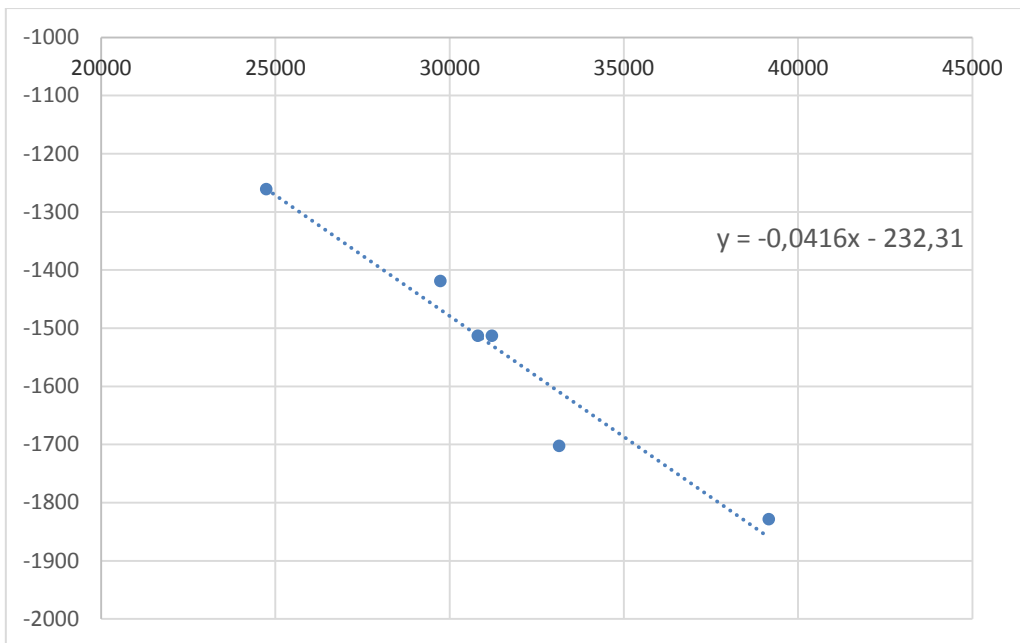


Рис 3. Зависимость годовых объемов выклинивания подруслового стока в реку Амударья от среднего годового стока на участке г/п Ильчик–г/п Дарганата, млн.м³ (обработка данных моделирования 1979-1985 гг.)

Использованная литература

1. Алтунин С.Т. Водозаборные узлы и водохранилища, 1964.
2. Кунин В.И., 1947. Происхождение подземных вод Кара-Кумов. Известия ВГО. Том 79, вып. 1.
3. Проскураков А.К., 1953. Водный баланс р. Амударьи на участке от г. Керки до г. Нукус. Гидрометеоиздат.
4. Иванов Ю.Н., 1971. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 14. Средняя Азия, вып. 3. Бассейн Амударьи. Л: Гидрометеоиздат.
5. Бекимбетов Н.Б., 1976. Производственные исследования режима работы каналов в связи с вводом в эксплуатацию Тахиаташского гидроузла и разработка мероприятий по улучшению их эксплуатации. Нукус.
6. Джаманкараев С.Д., Бузунов И.А, 1979. Русловые деформации при эксплуатации оросительных систем в низовьях Амударьи. Нукус.
7. Исмагилов Х. Сел ва ундан сакланиш, Т, Мехнат, 1982
8. Каюмов О.А., 1990. Рекомендации по управлению водно-солевым, наносным и уровенным режимами р. Амударьи и водохранилищ Тюямуюнского гидроузла, НПО САНИИРИ, Отдел комплексного регулирования стока рек, Договор 47/88 с Средазгипроводхлопком.
9. Сорокин А.Г., 1990. Отчет о НИР “Разработать и внедрить мероприятия по повышению эффективности регулирования стока Тюямуюнским гидроузлом в интересах ирригации и водоснабжения населения низовьев Амударьи”, НПО САНИИРИ, Отдел комплексного регулирования стока рек, Договор 70/89 с Управлением эксплуатации Тюямуюнского гидроузла, УДК 627.81.

Верстка: Беглов И.

Подготовлено к печати
в Научно-информационном центре МКВК

Республика Узбекистан, 100 187,
г. Ташкент, м-в Карасу-4, д. 11А

sic.icwc-aral.uz