

Моделирование трансформации стока реки Амударья

Сорокин Д.А.

Научно-информационный центр МКВК Центральной Азии

В бассейне реки Амударьи функционирует сложный водохозяйственный комплекс, работа которого в последние годы затруднена из-за отсутствия оперативного информационного обеспечения на фоне нарастания дефицита водных ресурсов. Для улучшения управления водными ресурсами необходимо повысить достоверность и качество информации – модернизировать систему контроля и прогнозирования трансформации стока реки Амударьи. Эта система должна включать в себя базу данных и математические модели годового планирования и оперативного управления.

Модели годового планирования должны позволять рассчитывать в месячном разрезе допустимые решения по регулированию и использованию водных ресурсов. Модели оперативного управления – это динамические модели, позволяющие на основе оперативной информации в верхних створах реки прогнозировать трансформацию гидрографа стока по течению реки на краткосрочный период (несколько дней) с шагом расчета не более суток. Оперативное управление включает анализ фактической ситуации в сравнении с решениями, принятыми на этапе годового планирования, возможную корректировку планов.

Сегодня актуальной является задача создания для БВО «Амударья» информационно-программного комплекса оперативного управления, включающего компьютерную динамическую модель Амударьи, базу данных и интерфейс, объединяющий все перечисленные составляющие в единое целое в составе информационной системы БВО.

БВО «Амударья» осуществляют годовое планирование, согласованное с водохозяйственными ведомствами государств и оперативно-диспетчерское управление, обеспечивает подачу и контроль водных ресурсов в пределах установленных МКВК лимитов. Режимы работы водохранилищ разрабатываются БВО с целью удовлетворения водопотребителей и недопущения конфликтных ситуаций и утверждаются на заседаниях МКВК.

Особенности трансформации стока

Задачу управления объёмом речного стока Амударьи в фиксированных интервалах месяц, сезон, водохозяйственный год, с шагом сутки, декада, месяц, можно сформулировать следующим образом. Необходимо выбрать такие режимные параметры функционирования речной системы (водохранилища, водозаборы, сбросы), которые обеспечивали бы выполнение требований водопотребителей (согласно лимитам на водозаборы в каналы и подачу стока в Приаралье), минимальные потери стока реки, при сохранении необходимых запасов воды в водохранилищах к концу периода управления. В деятельности БВО “Амударья” данная задача решается на вегетационный (апрель-сентябрь) и межвегетационный (октябрь-март) периоды водохозяйственного года. При этом, сначала оцениваются размеры располагаемых водных ресурсов, получаемых на основании прогноза Узгидромета о водности реки Амударья в створе Керки, прогноза боковой приточности к реке ниже Керки и начальных запасов воды в водохранилищах. Затем анализируются соотношения между располагаемыми водными ресурсами и требованиями на воду, и исходя из этого, рассчитываются режимы регулирования стока водохранилищами и подачи воды к каналы и Приаралье. С задачей прогнозирования неразрывно связана задача осуществления контроля за обеспечением принятых режимов и установленных лимитов, а также задача их корректировки в зависимости от изменения водохозяйственной ситуации. Основа расчетов – метод руслового водного баланса (РВБ), результат – фактические (за отчетный период) и прогнозные (на период прогноза) водные балансы, с среднесуточными, среднедекадными и среднемесячными параметрами стока реки в характерных створах, с указанием расчетных потерь стока, дефицитов воды, невязок баланса.

Трансформация стока рек происходит за счет водозабора, регулирования стока водохранилищами, сброса в реку возвратных вод, а также перераспределения во времени стока в русле и пойме, т.е. его аккумуляирования в половодье и сработки в межень. В балансе речных вод Амударьи русловое регулирование (накопление воды в русле и на пойме при подъёме уровня и отдача её при спаде) играет значительную роль – учет данного фактора по Амударье в половодье только в среднем течении реки позволяет внести коррективы в балансовые расчеты порядка на 2-3 км³ воды/сезон, и тем самым, снизить на эту величину ошибку расчета притока к Тюямуонскому гидроузлу. С удлинением расчетного периода до года, когда цикл “наполнение – опорожнение” русловой емкости обычно завершается, величины руслового регулирования приближаются к нулю.

Балансовые расчеты БВО “Амударья” и НИЦ МКВК показывают, что после 1992 года невязки руслового баланса в среднем и нижнем течении реки Амударья значительно возросли. Для того, чтобы выделить из фактических невязок руслового баланса составляющую потерь, необходимы специальные исследования, включающие моделирование процессов взаимодействия русла реки и его потока (фильтрационный приток, отток и др.) и численные эксперименты, позволяющие выдавать результаты для “нормирования” потерь.

Оценка русловых потерь

Гидрологическая ситуация в последние годы требует уточнения существующих методик расчёта русловых потерь из реки Амударьи и водохранилищ Тюямуянского гидроузла. К тому же, существует некоторые расхождения в оценке этой составляющей водного баланса различными авторами и организациями региона. Для того, чтобы выделить из фактических невязок руслового баланса реки и водохранилищ составляющую потерь, необходимы специальные исследования, включающие моделирование процессов взаимодействия русла реки и его стока (фильтрационный приток, отток и др.), чаши водохранилища и его наполнения, и численные эксперименты, позволяющие “нормировать” потери. Это позволит обоснованно рассчитывать потери стока на расчетных участках реки Амударьи в зависимости от периода времени и проходящих по реке расходов воды, а для водохранилищ Тюямуянского гидроузла – и в зависимости от уровня воды в водохранилищах.

В 60-х годах прошлого столетия В.Шульц оценивал потери воды из реки Амударьи в 7.6 км^3 (Шульц В.Л., 1965). В проектных проработках Среднеазиатского отделения Гидропроекта (1971 год) к Генеральной схеме комплексного использования водных ресурсов р. Амударьи (САО Гидропроект, 1971) потери из реки оценивались в 7.8 км^3 в год (для условий среднемноголетнего года). Из них, на участке от слияния Вахша и Пянджа до г. Керки потери воды (на испарение) оценивались в 1.2 км^3 , на участке Керки–Чатлы в 6.6 км^3 (на долю испарения приходилось 4.7 км^3 , на фильтрацию 0.3 км^3 , на неучтенный водозабор 1.4 км^3 и 0.2 км^3 были отнесены к точности учета стока). В начале 80-х годов при уточнении схемы Амударьи оценка потерь была несколько снижена (Средазгипроводхлопок, 1984). Для маловодного года (90% обеспеченности) потери принимались равными 2.9 км^3 , в том числе в низовьях 1.96 км^3 (или 7.2 % от стока в створе Тюямуяун).

В связи с вводом в эксплуатацию Тюямуянского гидроузла (водохранилища были заполнены в середине 80-х) и изменения режима

реки в низовьях, встала задача пересмотра руслового баланса реки и уточнения потерь (включая оценку в водохранилищах Тюямуонского гидроузла). Такие исследования, имеющие мощную экспедиционную базу, проводились с середины 80-х до середины 90-х годов в САНИИРИ, в отделе Комплексного регулирования стока рек. Исследования включали натурные измерения, их обработку и компьютерное моделирование процессов формирования потерь (Сорокин А.Г., 1994). По результатам данных исследования потери из реки, в среднем за период 1981-1988 годов, оценивались в 8.6 км^3 , в том числе ниже створа Тюямуон – 3.8 км^3 (или 13.2 %). Потери за 1989-1990 годы составили 7.3 км^3 , однако с 1991 года они стали вновь возрастать. Тогда же был сделан вывод о занижении потерь в уточненной Генсхеме Амударьи, в частности, за счет не учета фильтрационной составляющей, которая при прохождении осветленного потока (ниже Тюямуонского гидроузла) может составлять значительную часть потерь.

Была разработана гипотеза (Сорокин А.Г., 1994), согласно которой река от г. Керки до Дарганаты по условиям формирования фильтрационного потока делилась на два участка: Керки-Ильчик и Ильчик-Дарганата. Первый участок характеризовался фильтрационными потерями, второй – фильтрационным русловым притоком, зависящим от величины фильтрационных потерь на первом участке. Третий участок (Тюямуон-Саманбай) характеризовался фильтрационными потерями. Были получены зависимости, объединяющие русловую фильтрацию с гидравлическими параметрами и мутностью потока (чем ниже мутность, тем выше потери). Использование в моделях САНИИРИ фильтрационных зависимостей, формул расчета мутности потока, а также морфометрических зависимостей Х.Исмагилова (3, 4) позволили рассчитывать потери из реки как на фильтрацию, так и на испарение, для любого по водности года, сезона, месяца.

Гипотеза о наличии фильтрационных потерь из реки Амударьи, поставленная впервые В.Куниным (1947) и А.Проскуряковым (1953) подтверждалась не только исследованиями САНИИРИ, но и Гидропроекта, согласно которым на участке Тюямуон – Чатлы в конце 60-х и начале 70-х годов был установлен подземный отток порядка 1.4 км^3 в год (Светитский В.П., 1985). В.Кунин (1947) определив фильтрационные потери из реки в $150 \text{ м}^3/\text{с}$ (или около 4.7 км^3 в год), сделал вывод о питании Амударьинской водой подземных вод пустыни Каракумы. М.Кривошей в своих исследованиях (Кривошей М.И., 1997) приходит к заключению о связи русловой фильтрации из Амударьи с расходом воды в русле, а также напряжениями в земной коре. По ее данным только в дельте Амударьи за 1977-1988 годы средние фильтрационные потери оцениваются в 2.6 км^3 . Всеми исследователями отмечено существование систематических невязок

балансов реки одного знака, что исключает ошибки измерений (ошибки измерений должны иметь разные знаки). В суммарном объеме потерь со временем (70-е, 80-е, 90-е годы) наблюдается увеличение доли фильтрационной составляющей.

По данным САНИИРИ (Сорокин А.Г., 1994), потери воды из водохранилищ Тюямуянского гидроузла (ТМГУ) при полном их наполнении оцениваются в 1.1..1.2 км³ за год. Из водохранилищ ТМГУ (Русловое, Капарас, Султансанджар, Кошбулак) при их наполнении выше отметки 125...126 м наблюдаются фильтрационные потери, при сработке этих емкостей – фильтрационный приток (Сорокин А.Г., 1994). Фильтрационная составляющая в общем объеме потерь из водохранилищ ТМГУ может достигать в осенне-зимний период 60..70 %. Работа Руслового водохранилища ТМГУ на отметках ниже 120...119 м обеспечивает не только снижение потерь воды из Руслового водохранилища ТМГУ, но и пропуск наносов в нижний бьеф и увеличение мутности потока в русле реки и каналах, что уменьшает потери стока на фильтрацию в низовьях. Для обеспечения данного режима рекомендовано правило, заключающееся в преимущественной сработке Руслового водохранилища и одновременном наполнении всех емкостей. Данный принцип, предложенный группой исследователей отдела комплексного регулирования стока рек (ОКРСР) САНИИРИ, в том числе и автором, в первой половине 80-х годов, в настоящее время применяется в практике эксплуатации ТМГУ и позволяет значительно уменьшить потери воды.

Следует отметить, что русловые балансы по реке Амударье с целью выявления систематических невязок баланса и оценки потерь стока составляют главным образом в многолетнем и реже во внутригодовом (по сезонам) разрезах. При оценке по многолетнему ряду исключается влияние такого фактора, как береговое регулирование, что повышает точность оценки.

Исследования ОКРСР САНИИРИ, проводимые в 80-х и 90-х годах, по оценке потерь воды в Амударье и водохранилищах Тюямуянского гидроузла, в основном, были подтверждены последующими исследованиями Научно-технического центра (НТЦ) “Тоза Дарье” НПО САНИИРИ (Республика Узбекистан) и Научно-информационного центра (НИЦ) МКВК. Эти организации продолжили исследования ОКРСР САНИИРИ по оценке русловых потерь Амударьи с конца 90-х годов и мы располагаем сегодня определенными наработками в этой области, которые могут служить основой исследований по “нормированию потерь”.

Выполненные исследования позволяют выделить особенности расчета статей руслового баланса Амударьи на следующих участках.

Участок г/п Керки - г/п Ильчик. Протяженность 295 км. Пойма шириной 4-5 км. Уклон 0,00024. Водозабор из реки превышает коллекторный сброс в реку. Фильтрационные потери зависят от расхода (прямая линейная зависимость) и мутности (обратная показательная). Результирующая руслового баланса по многолетним данным указывает на среднегодовые потери. Фильтрационные потери из русла реки происходят на левый берег. Основная масса фильтрационных потерь в русле из-за затрудненных условий оттока за пределы долины может расходоваться только на суммарное испарение с уровня грунтовых вод и на выклинивание в коллекторно-дренажную сеть.

Участок г/п Ильчик - г/п Бирата (Дарганата). Протяженность 140 км. Шириной поймы небольшая, местами практически отсутствует. Уклон 0,00022. Коллекторный приток в реку превышает водозабор из реки. Фильтрационные потери существуют. Фильтрационный русловой приток зависит от величины фильтрационных потерь на участке Керки-Ильчик (показательная зависимость) и ширина потока. Приточность в русло постоянна. Река является естественной дренажной подземных вод прилегающих территорий. Возможно поступление в русло подземных вод с обоих берегов и выклинивание подруслового потока.

Участок г/п Бирата (Дарганата) – г/п Тюямуюн. Участок потерь на испарение и взаимосвязи горизонтов воды в водохранилищах с горизонтами грунтовых вод. При уровнях воды в водохранилищах выше 125 отметки наблюдаются фильтрационные потери, растущие с увеличением горизонтов воды в водохранилищах. В диапазоне отметок 125...120 фильтрационная составляющая незначительна, ниже 120 отметки наблюдается фильтрационный приток в водохранилище.

Участок г/п Тюямуюн - г/п Саманбай. Протяженность 235 км. Коллекторный сброс в реку незначителен. Наличие фильтрационных потерь зависит от степени осветления руслового потока (мутности) и ширины потока. Особенностью дельты Амударьи является преобладание вертикального водообмена при вековом стоке. Вблизи реки уклоны зеркала грунтовых вод достигают 0.001 и более, по мере удаления от реки они уменьшаются. Одновременно ухудшаются фильтрационные свойства пород. Основными путями разгрузки подземных вод являются испарение с уровня, транспирация растительностью, выклинивание в коллекторно-дренажную сеть.

Численные расчеты показывают, что после 1992 года наибольшие невязки стока по Амударье наблюдались на участке Дарганата – Саманбай, которые нельзя полностью списывать только на потери стока. В периоды особого маловодья, повторяющегося более одного года, относительные потери в низовьях Амударьи могут достигать 23 %. Это явление, исследуемое на данных 2000-2001 годов, имеет временный характер и

связано с некоторым увеличением фильтрационной составляющей, вызванной падением уровня грунтовых вод в предрусловой зоне. Относительные потери в низовьях в средние по водности годы, как показывают расчеты, не превышают 6...12 % (нижний предел – при не осветленном потоке, формируемом работой Руслового водохранилища Тюямуонского гидроузла на пониженных отметках).

Оценка потерь выполненная на моделях для маловодных лет (1982, 1989, 2000, 2001 годы) показывает, что потери в вегетацию лежат в пределах 4.3...6.4 км³, в том числе: до ТМГУ – 1.3...2.0 км³, ниже ТМГУ – 2.5...3.7 км³. Невязки стока, превышающие эти оценки, могут свидетельствовать о неучтенных потерях по реке и из водохранилищ, включающих неучтенный водозабор, ошибки измерений и расчета. Потери в водохранилищах ТМГУ оцениваются в зависимости от среднегодового уровня воды в пределах 0.7...1.3 км³ за год.

Тюямуонский гидроузел остается в настоящее время мало изученным объектом в части оценки непроизводительных потерь и возникновения невязок руслового баланса, а также факторов влияющих на водный баланс, изменяющих и ограничивающих регулируемую способность водохранилищ (заиление водохранилищ, батиметрические кривые и др.). Неправильный расчет водного баланса, показывающий, например, нехватку воды в маловодные периоды при низких отметках водохранилищ, приводит к списанию полученного дефицита на потери, хотя на самом деле потерь нет, а происходит заполнение понижений (созданных русловыми процессами при промывках водохранилища), вода из которых уже при наполнении водохранилищ дает неучтенную прибавку к стоку реки.

В зимний период на потери влияет фактор льдообразования, а также регулирующая емкость Тахиаташского гидроузла, в которой задерживают воду для обеспечения бесперебойной работы электростанции.

Выбор метода моделирования

Для условий Амударьи за основу может быть принят концептуальный подход, позволяющий при относительно небольшом объеме исходной информации получать приемлемые для практики результаты. Моделирование водного режима реки Амударья может быть основано на схематизации процессов движения речного потока с учетом времени добегания и использования эмпирических частных закономерностей формирования и трансформации потока, характерных для среднего течения реки. В модель входят зависимости, позволяющие

рассчитывать параметры потока и характеристики русла реки, потери воды на испарение с водной поверхности, русловые фильтрационные потоки. В качестве характерного течения может быть обосновано уравнение кинематической волны (квазиустановившееся движение), а также балансовый метод.

Алгоритмы оперативной оценки стока рек предполагают построение гидрологических рядов, меняющихся под воздействием естественных факторов и антропогенных воздействий (управляющих воздействий и их последствий). Такой алгоритм можно решать в разностной схеме, предполагающей в момент t описание состояния системы $\mathbf{G}(t)$ с решением $\mathbf{R}(t)$ и оценку системы на момент $t+1$ в виде $\mathbf{G}(t+1)$. Схема обеспечивает не только временное, но и пространственное решение, для чего водохозяйственная система формируется в виде графа.

Наиболее трудная задача – выбор и компьютерная реализация динамической схемы, позволяющей по суткам (часам) прогнозировать трансформацию исходного гидрографа стока в начале расчетного участка к конечному створу участка. Компьютерное моделирование трансформации стока реки Амударьи можно осуществить различными количественными методами расчета неустановившегося движения воды в открытых руслах – строгими и упрощенными, требующими минимальный набор исходной информацией (что часто бывает определяющим при выборе метода).

Гидродинамическое моделирование для большинства методов основано на использовании уравнений математической физики, - исходная система уравнений состоит из уравнений сохранения массы (2) и уравнения движения (1):

$$i_o - \frac{\partial h}{\partial S} = \frac{a}{g} V \frac{\partial V}{\partial S} + \frac{a}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V|V|}{C^2 R} + \frac{qV}{q\omega} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial S} = q \quad (2)$$

Где: координата расстояния S и время t - независимые переменные: глубина h и средняя скорость V - их функции; площадь живого сечения (ω) – известная функция глубины; расход Q определяется как произведение V и (ω); C – коэффициент Шези; R – гидравлический радиус; g – ускорение силы тяжести; q – боковой приток на единицу длины; “ a ” – коэффициент неравномерности распределения скоростей по поперечному сечению (обычно “ a ” принимают равным единице).

Динамическое уравнение (1) может быть упрощено или даже заменено иным уравнением движения, обычно эмпирическим. Наиболее

известные преобразования - диффузионное уравнение, кинематическая волна, балансовые методы, включающие время добегания [М.С. Грушевский, 1982]. Существует определенный опыт создания динамических моделей в САНИИРИ и НИЦ МКВК.

Моделирование водного режима реки Амударья в работе [А.Г.Сорокин, О.А.Каюмов, 2002] представляет из себя схематизацию процессов движения речного потока с учетом времени добегания и использования эмпирических частных закономерностей формирования и трансформации потока, характерных для среднего течения реки. В модель входят зависимости, позволяющие рассчитывать параметры потока и характеристики русла реки, потери воды на испарение с водной поверхности, русловые фильтрационные потоки. Система уравнений (1, 2) упрощается до кинематической волны, которая хорошо преобразуется существующими разностными схемами (такое волновое движение называют также квазиустановившимся).

Кинематическая волна

Моделирование водного режима реки Амударья по методу “кинематическая волна” представляет из себя схематизацию процессов движения речного потока с учетом времени добегания и использования эмпирических частных закономерностей формирования и трансформации потока. В модель входят зависимости, позволяющие рассчитывать параметры потока и характеристики русла реки, потери воды на испарение с водной поверхности, русловые фильтрационные потоки.

Для реки Амударьи должна быть разработана и апробирована специфическая модель, отражающая особенности морфологической структуры и формирования статей руслового баланса. Учтены процессы формирования русловых фильтрационных потоков. Можно выделить два характерных участка: Керки-Ильчик, Ильчик-Дарганата.

На первом участке основной формой фильтрации является ее формирование в виде подруслового потока. Второй участок представляет собой зону выклинивания подруслового потока в реку, чему способствует заглубленность узкой долины реки, врезанной в малопроницаемые коренные породы. Каждый характерный участок реки имеет свою гипотезу формирования фильтрации. Учтены два важных фактора, которые во многом определяют режим реки: морфометрия русла и мутность потока.

Основные факторы, определяющие ширину и глубину потока реки: расход воды, уклон, диаметр донных наносов. В алгоритме программы использованы морфометрические зависимости Х.Исмагилова.

$$h = 0.25 * Q^{0.33} * (f * d)^{0.17} / (g * i)^{0.17} \quad (3)$$

$$B = 0.5 * Q^{0.5} / (f * g * i)^{0.25} \quad (4)$$

где: Q – расход воды, м³/с; i – уклон; d – средний диаметр частиц данных отложений, м; f – коэффициент, учитывающий сопротивление размыву грунтов, слагающих берега реки (для легкоразмываемого грунта); g – ускорение силы тяжести.

Факторы, формирующие русловые потери и фильтрацию: расход воды (на расчетном участке и выше по течению), ширина потока, испаряемость, мутность потока. Для определения мутности потока использовались эмпирические зависимости отдела русел САНИИРИ, для среднего течения Амударьи (кг/м³):

$$p_1 = 0.0035Q \quad (5)$$

$$p_2 = 0.0025Q \quad (6)$$

где: p₁, p₂ – мутность потока, для периодов: январь-май и июнь-декабрь.

Русловая фильтрация (потери притока) рассчитывается следующим образом.

Для участка Керки-Ильчик (1 участок):

$$P_{ф.п.и.ж}^I = K * a * L_{ij} * Q_{ij}^n * P_{ij}^m \quad (7)$$

Для участка Ильчик-Дарганата (2 участок):

$$P_{ф.пр.и.ж}^{II} = K * \beta * B_{ij} * L_{ij} (P_{ф.п.и.ж}^I)^t \quad (8)$$

где: $P_{ф.п.и.ж}^I$, $P_{ф.пр.и.ж}^{II}$ – объем фильтрационных потерь (ф.п.) и фильтрационного притока (ф.пр.) соответственно для I, II участков в i месяц j-го года, млн.м³; Q_{ij} – средний расход воды на участке, м³/с; p_{ij} – средняя на участке мутность, кг/м³; B_{ij}, L_{ij} – ширина русла и длина участка,

км; α , β , m , t – безразмерные опытные коэффициенты; K – коэффициент расхода воды в объем стока за месяц.

Гидродинамическое моделирование основано на использовании для описания моделируемых процессов уравнений математической физики. Исходная система уравнений состоит из уравнений сохранения массы и уравнения движения.

Было принято, что имеется однозначная зависимость расхода воды от площади живого сечения потока – $Q = f(\omega)$, то есть:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial \omega} * \frac{\partial \omega}{\partial t} \quad (9)$$

Решая совместно уравнения (8) и (9) получим:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \pm \frac{\partial Q}{\partial \omega} * \frac{\partial \omega}{\partial S} = q * \frac{\partial Q}{\partial \omega} \quad (10)$$

Для среднего течения Амударьи получена зависимость:

$$\frac{\partial Q}{\partial \omega} = 1.2 V \quad (11)$$

Здесь: $\frac{\partial Q}{\partial \omega}$ - скорость волнового расхода.

$\frac{\partial \omega}{\partial t}$ - скорость потока воды в реке, полученная в предложении $V=Q/B*h$.

Подставляя (11) в уравнение (10) получим:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 1.2 * V \frac{\partial Q}{\partial S} = \frac{1}{2} * V * q \quad (12)$$

Уравнение (12) хорошо аппроксимируется существующими разностными схемами и известно в литературе как одномерное уравнение кинематической волны (такое волновое движение называют также квазиустановившимся). Здесь q – боковой приток (на единицу длины) включает в себя также: водозабор, потери (с обратным знаком), КДС и фильтрационный русловой приток в реку.

Численная реализация модели сводилась к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих баланс и движение воды при известных начальных и граничных условиях явной разностной схемой. Явная схема удобна для реализации на ЭВМ, но устойчива при выполнении определенного условия по соотношению шагов пространственно-временной сетки ($\Delta S * \Delta t$). В алгоритме для устойчивости разностной схемы при шаге времени $\Delta t = 2$ часа длина расчетного участка принята $\Delta S = 20$ км. Русло реки разделено на 25 расчетных участка, а весь период расчета (10 дней) на 120 шагов продолжительность в 7200 сек. Временной интервал расчета, выводимый для пользователя – сутки.

Компьютерная программа обеспечивает расчет трансформации стока реки в среднем течении на участке Керки-Дарганата при заданных значениях гидрографа среднесуточных расходов воды в створе Керки, заданных начальных расходов реки (на начало расчета) в расчетных створах (Чарджоу, Ильчик, Дарганата), а также значениях водозабора и сброса коллекторных вод по участкам.

Информация для отладки модели и имеющиеся фактические характеристики гидрологического, наносного и водно-солевого режимов реки, водозаборов в ирригационные каналы и сбросов коллекторного стока в реку (данные БВО «Амударья», Управления эксплуатации Тюямуянского гидроузла).

Оценивая возможность использования данного подхода (кинематическая волна) для реки Амударьи были определены по фактическим данным значения времени добегания для водомерных постов на участках Керки-Ильчик и Ильчик-Дарганата. Время добегания определялось по моментам поступления экстремальных значений среднесуточных уровней на постах.

Полученные фактические значения $t_{\text{фак}}$ сравнивались с расчетными $t_{\text{рас}}$.

$$t_{\text{рас}} = L / 1.2 \quad (13)$$

где: $t_{\text{рас}}$ – расчетное значение времени добегания, сек; L – длина расчетного участка, м; V – скорость потока, м/с.

При изменении средних расходов воды на участках в пределах $Q = 500\text{--}3500 \text{ м}^3/\text{с}$ значения расчетного времени добегания составили:

- для участка Керки-Ильчик $t_{\text{рас}} = 3.5\text{--}1.5$ суток;
- для участка Ильчик-Дарганата $t_{\text{рас}} = 2.5\text{--}1.0$ суток.

Таким образом, от Керки до Дарганата паводковая волна проходит за 2.5-6 суток. По фактическим данным значения этой характеристики изменяются от 1 до 7 суток.

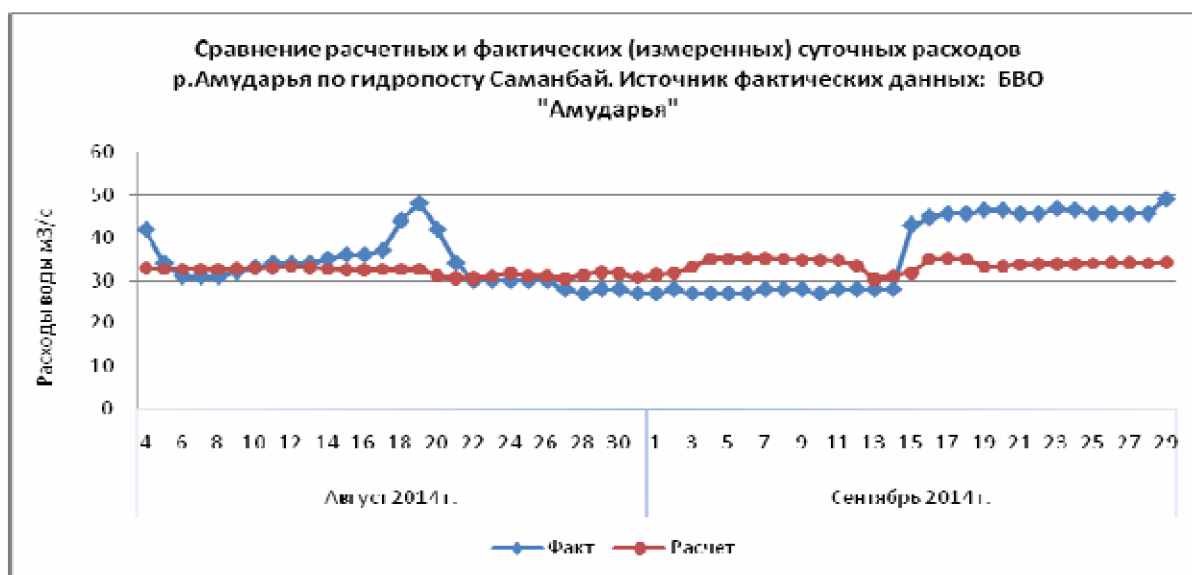
Интенсивность распластывания волны (отношение максимальных значений расхода в нижнем и в верхнем створах) наблюдается только на первом участке (Керки-Ильчик). На втором участке (Ильчик-Дарганата) вследствие небольшого водозабора и фильтрационного притока в русло максимальный расход паводковой волны мало изменяется, что характерно для движения кинематических волн на транзитных участках.

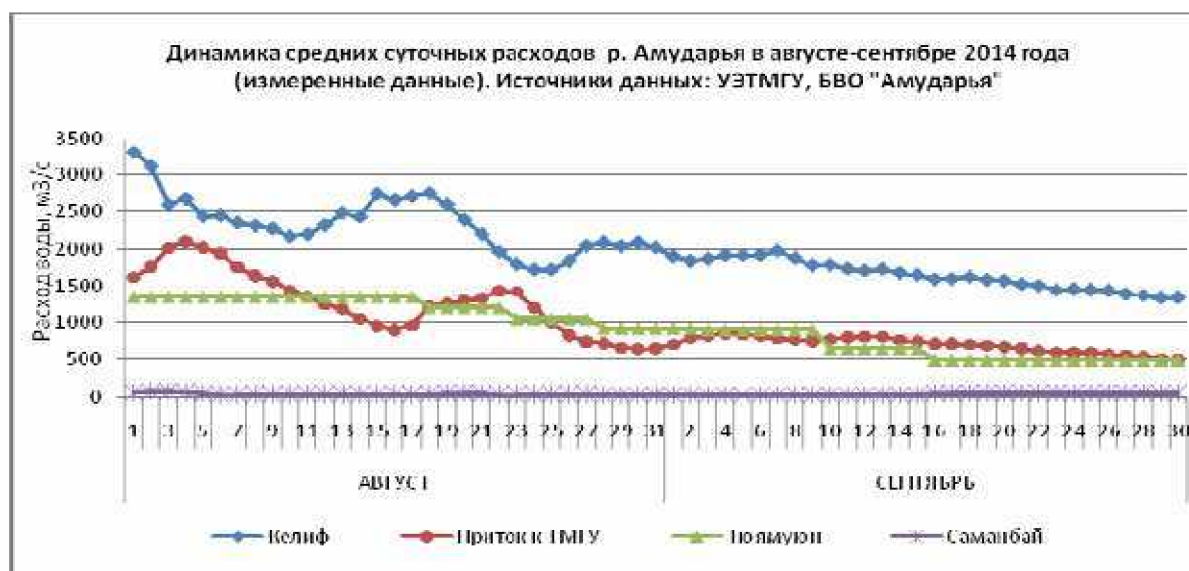
Балансовый метод

Другой подход, реализованный НИЦ МКВК в 2014 году – расчет трансформации стока реки методом баланса, учитывающим время добегания, с корректировкой (приближением) к фактическому гидрографу предыдущего периода. Данная схема консервативна (без погрешности закона сохранения) с некоторым сдвигом (лагом) по времени, включает расчет потерь стока (по функциям от расходов воды), использует результаты исследования ГГИ по времени добегания реки (предоставлена БВО «Амударья»). Закон сохранения выполняется для «элементарных объемов», из которых формируются гидрографы воды. Схема реализована в системе GAMS, что позволяет одновременно с расчетом трансформации стока реки по руслу решать оптимизационные задачи управления – распределения водных ресурсов между потребителями и регулирования стока водохранилищными гидроузлами с ГЭС. Тестирование модели выполнено для двух участков Амударьи: Келиф – Дарганата (Бирата) и Тюямуюн – Саманбой.

Программа разработана на языке математического моделирования GAMS – использована базовая студенческая версия, доступная через Интернет для всех. В расчетах применен метод нелинейного программирования. Вычисления данной задачи происходят с помощью решателя MINOS5. Исходные данные поступают в GAMS в текстовом масштабе, после расчета - выводятся в Excel.

Результаты тестирования модели показаны ниже на графиках.





Тестирование модели на участке Келиф – Бирата (приток к Тюямуюнскому водохранилищу) на фактических данных августа-сентября 2014 года показывает (смотрите графики), что только в 7 случаях из двух месяцев (61 случай) отклонение расчетов составляет больше 10 %, из этого

следует вывод, что с вероятностью 0.89 расчеты находятся в пределах условной нормы (10 %). Коэффициент детерминации 0.88, что показывает довольно хорошее приближение к фактическим данным. Для участка нижнего течения реки Амударьи (Тюямуюн-Саманбай) отклонение расчетных значений от фактических – не более 3 %.

Таким образом, данную модель можно рекомендовать для применения на практике при расчетах динамики расходов реки вдоль русла на месяц вперед, а также для анализа фактической ситуации РВБ.

Модель регулирования стока

Моделируемая система представляет из себя стволы основных рек бассейна Амударьи, разбитые на балансовые участки, с расположенными на них озёрами, водохранилищами, ГЭС, присоединёнными зонами планирования, которые имеют взаимосвязь по водозаборам и сбросам возвратных вод. Метод представления речной системы – метод графов. Речная система разбивается на расчетные участки и створы, водохранилища, озера, с агрегированными на них водозаборами в каналы и коллекторные сбросы, которые в алгоритме имитируются сетью дуг-узлов.

Граф $G(J,I)$ определен как два множества: $J=\{1, \dots, j\}$ - вершин (узлов) и $I=\{1, \dots, i\}$ - дуг. Каждая дуга i характеризуется двумя узлами (j,k) : начальным j и конечным k , где $j \in J, k \in J, i \in I$

Модель основывается на уравнении сохранения количества воды. Уравнение решается для каждого узла для фиксированного временного шага $t \in \{0:T\}$ за период T (шаг – месяц, период – 300 месяцев или 25 лет, начало расчета – октябрь 2010 года, конец расчета – сентябрь 2035 года).

$$\frac{dW_j}{dt} = \sum_{(k,j) \in I_j^+} Q_{k,j} - \sum_{(j,k) \in I_j^-} Q_{j,k} \quad (14)$$

Задача заключается в поиске управления $W_u(t)^*$, $t \in \{0:T\}$, которое удовлетворяет критерию качества управления и ограничениям. В качестве критерия может выступать различные условия, в частности – максимум суммарного годового чистого дохода от использования водных ресурсов в водохозяйственных районах (далее – зонах планирования - ЗП):

$$\sum_{z \in J} [P_z * \int_0^T \sum_{(j,z) \in I_z^+} Q_{j,z} dt] \rightarrow \max$$

Основные ограничения

$$\begin{aligned} \max \quad & \min \\ Q_{j,k} \geq Q_{j,k} \geq Q_{j,k} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \max \quad & \min \\ W_u \geq W(t)_u \geq W_u \end{aligned} \quad (16)$$

где:

W_j – объем воды в j -ой вершине (m^3), $Q_{j,k}$ - расход между вершинами j и k (m^3/c); $Q_{k,j}$ - расход между вершинами k и j ($m^3/сек$); $Q_{j,z}$ - расход между вершинами j и z (m^3/c); Q_z – требуемый приток к узлу z (m^3/c); $z \in J$ - узел потребления (ЗП), $z \in Z$; Z – количество ЗП; W_u – объем воды в u -ой вершине (m^3), $u \in J$ - узел управления (водохранилище), $u \in U$; U - количество узлов управления, I_j^+, I_j^- – множества дуг входящих в вершину j и выходящих из нее; P_z – продуктивность оросительной воды ($\$/m^3$), t – текущая координата времени ; 0 и T – начало и конец расчетного периода времени.

Модель реализована как отдельный блок комплекса ASBmm (www.asbmm.uz). Программа разработана на языке математического моделирования GAMS – использована базовая версия, доступная через интернет; вычисления проводились с помощью решателя MINOS5. Результаты вычислений выводятся в Excel, обмен данными между GAMS и Excel осуществляется посредством текстовых файлов.



Комплекс моделей ASBmm – коллективный труд, разработан в кооперации НИЦ МКВК (проф. В.А.Духовный, А.Г.Сорокин и др.) с UNESCO IHE, Нидерланды (Dr.J. de Schooter, Dr.Maskey), с привлечением ведущих специалистов БВО “Сырдарья”, БВО “Амударья”, Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии Академии наук Республики Таджикистан (Dr.Petrov G.N), Агенства GEF, Института прогнозирования и макроэкономических исследований Республики Узбекистан (Dr.Cherel S.V). Информационное обеспечение: региональная база данных НИЦ МКВК, включая данные филиалов НИЦ МКВК в странах Центральной Азии, Гидрометов стран ЦА, БВО, Министерств водного хозяйства и других организаций.

Использованная литература

1. Шульц В.Л. Реки Средней Азии. Гидрометеиздат, 1965.
2. Х.Исмагилов, 1988. “Сел ва ундан сакланиш”, Т., “Мехнат”
3. Генеральная схема комплексного использования водных ресурсов р. Амударьи. САО Гидропроект. Ташкент, 1971.
4. Уточнение схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов р. Амударьи. Средазгипроводхлопок. Ташкент, 1984.
5. Сорокин А.Г. Разработать научно-технические основы повышения эффективности комплексного ирригационно-энергетического регулирования водных ресурсов рек и водохозяйственных систем Сырдарьи и Амударьи. Отчет о научно-

исследовательской работе. НПО САНИИРИ. Ташкент, 1994.

6. Кунин В.И., 1947. Происхождение подземных вод Кара-Кумов. Известия ВГО. Том 79, вып. 1.

7. Проскуряков А.К., 1953. Водный баланс р. Амударьи на участке от г. Керки до г. Нукус. Гидрометеиздат.

8. Светитский В.П., 1985. Провести исследования и составить современный и на перспективу до 2000 года водохозяйственный баланс бассейна Аральского моря. Отчет о научно-исследовательской работе. САНИИРИ. Ташкент.

9. Кривошей М.И., 1997. Арал и Каспий (причины катастрофы). Санкт-Петербург.

10. Сорокин А.Г. Моделирование процессов управления водными ресурсами трансграничных рек бассейнов Сырдарьи и Амударьи. Мелиорация и Водное хозяйство. № 1. Москва, 2002.

11. Анализ использования водных ресурсов в бассейне Аральского моря. Бюллетень МКВК. № 1 (21), НИЦ МКВК, Ташкент, 1999.

12. Анализ маловодья 2000 года и меры на 2001 год по бассейну реки Амударья. Бюллетень МКВК. № 1 (26), НИЦ МКВК, Ташкент, 2001.

13. О принятых мерах по смягчению последствий маловодья 2001 года. Бюллетень МКВК. № 1 (29), НИЦ МКВК, Ташкент, 2002.

14. Sorokin D., Sorokin A., 2001. Report on the work conducted for the application of the hydrological model to wards the assessment of scenarios of the Aral Sea basin development. UNDP and SIC ICWC. Tashkent.

15. М.С. Грушевский, 1982. Неустановившееся движение воды в реках и каналах, Гидрометеиздат, Ленинград, 289 стр.

16. А.Г.Сорокин, О.А.Каюмов, 2002. Динамическая модель трансформации стока р.Амударьи в среднем течении. Водные ресурсы Центральной Азии (Материалы научно-практической конференции, посвященной 10-летию МКВК). Алтаты, стр. 154 – 158.

17. А.Г.Сорокин, 2005. Проблемы управления бассейном реки Амударья. Материалы центральноазиатской международной научно-практической конференции, Алмааты – Ташкент, стр. 132 – 339.

18. Сорокин А.Г., 2016. Моделирование русловых потерь р. Амударьи. Сборник научных трудов НИЦ МКВК, № 15.

19. Сорокин А.Г., Кадыров Т., Кац А.В., Сорокин Д.А., 2014. Численное моделирование динамики стока реки Амударья. Сборник научных трудов НИЦ МКВК, № 14, стр. 86 – 92.