

УДК 502/504: 556.18

Л. Д. РАТКОВИЧ, В. А. НЕЕЗЖАЛОВ

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Московский государственный университет природообустройства»

ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО АНАЛИЗА В ТРАНСГРАНИЧНЫХ СТОРАХ

Рассмотрена задача разработки водохозяйственного баланса как в общей ситуации, так и применительно к трансграничным створам. Освещены вопросы совершенствования методики и структуры балансов, а также особенности их составления в условиях специфических водохозяйственных систем. Показаны характерные примеры трансграничных бассейнов. Даны методические предложения для назначения ступенчатых пусков из водохранилищ с учетом прогноза предстоящей водности.

Трансграничный створ (бассейн), пуски из водохранилищ, критерии удовлетворения требований водопользователей, водохозяйственный баланс, имитационные и стохастические модели, совместное управление водными ресурсами.

There is considered a task of development of water economy balance both in the general situation and as applied to transboundary sections. The improvement questions of the method and structure of balances are clarified as well as singularities of their calculation under the conditions of specific water economy systems. There are shown characteristic examples of transboundary reservoirs. Methodical proposals are given for assigning stepped releases from reservoirs taking into consideration forecasting of the forthcoming water content.

Transboundary section (reservoir), releases from reservoirs, criteria of meeting requirements of water users, water economy balance, simulation and stochastic models, joint control of water resources.

Водохозяйственный баланс – это основа проектирования всех типов водохозяйственных и водоохраных мероприятий, поэтому его структура должна учитывать суть этих мероприятий и отражать особенности исследуемых водохозяйственных систем [1–3]. При наличии трансграничных створов проблема осложняется в связи с необходимостью согласованного режима совместного водопользования и управления водными ресурсами государственными образованиями, претендующими на воду рассматриваемых водных объектов. К сожалению, во многих случаях к водохозяйственному балансу относятся как к некой формальной составляющей проектирования, не играющей особой роли в самом процессе принятия решения. Авторами сделана попытка изменить формальное отношение к балансу.

Немало рек протекает по территории двух и более государств. Наиболее

известная трансграничная река Дунай, на примере которой разработаны различные методические приемы. Распад СССР в конце XX века привел к тому, что многие реки стали трансграничными, поскольку республиканские границы превратились в государственные. Образовавшиеся страны, ограниченные сложившимися правилами распределения водных ресурсов, не могут строить водную политику безоглядно, с чистого листа. Очевидные принципы совместного использования водных ресурсов – это мирное сосуществование субъектов водodelения и сохранение экологии водных объектов.

Россия граничит с 14-ью государствами, при этом 7141 км границ проходит по рекам (Амур, Аргунь, Уссури, Самур, Неман, Туманная), 475 км – по озерам (порядка 30 озер, наиболее крупные – Псковско-Чудское и Ханка), общее количество трансграничных водных объектов более тысячи. Данные

водные объекты интенсивно используются для водо- и электроснабжения, судоходства, орошения и рыбного хозяйства.

Основные проблемы в бассейнах трансграничных водных объектов следующие: загрязнение вод; дефицит водных ресурсов в отдельные годы и периоды года; наводнения; слабо развитая сеть пунктов мониторинга и недостаток информации. Бассейны трансграничных рек в основном являются густонаселенными, с развитым промышленным и сельскохозяйственным производством. Они подвержены значительной антропогенной нагрузке, как и большинство водных бассейнов России. Таким образом, основой для решения пограничных проблем является корректное разрешение водохозяйственных и экологических проблем, а для этого требуется проведение вариантных водохозяйственных расчетов, результаты которых определяют водохозяйственный баланс рассматриваемого объекта [4].

Для Российской Федерации характерными трансграничными бассейнами, где водохозяйственные проблемы тесно переплетаются с проблемой территориального водodelения и совместного управления водными ресурсами, являются реки Иртыш, Самур и Селенга.

На Иртыше расположены четыре трансграничных створа, на Самуре – вся река фактически и является пограничным створом, поскольку протекает по границе Азербайджана и Дагестана. На Селенге, одном из основных притоков Байкала, имеется один пограничный (на притоке) и один трансграничный створ в верхнем течении.

В бассейне реки Иртыш, самого крупного левобережного притока Оби, Российская Федерация имеет три трансграничных створа с Казахстаном – один непосредственно на Иртыше и два на его притоках – Тоболе и Ишиме. Кроме того, сток реки поступает на территорию Казахстана из КНР (река Черный Иртыш). Каскад Бухтарминского и Шульбинского водохранилищ выше трансграничного створа был построен

в СССР для обеспечения энергетических и транспортных попусков, удовлетворения требований многоотраслевого водохозяйственного комплекса, ежегодного обводнения плодородной Иртышской поймы специальными попусками. Данный каскад осуществляет многолетнее компенсированное регулирование стока Иртыша по отношению к створу города Омска, где необходимо выдерживать минимальный санитарный расход, обеспечивающий нормальную работу водозаборных сооружений города.

Однако в настоящее время деградирует пойма, фактические уровни воды в Омске недостаточны для водозаборных сооружений (строится Нижне-Омская система), нарушено трансграничное судоходство. Причин этому множество, в частности доминирующее энергетическое регулирование и несовершенство правил управления каскадом. Кроме того, российская часть бассейна находится в наиболее неудобном положении приемника зарегулированного стока с территории, располагающей значительным ирригационным фондом. Наиболее неприятным моментом является потенциальный запрос на воду со стороны КНР в пределах Черного Иртыша, который прогнозируется в объеме 4,5 км³ в год (около 25 % стока в створе Бухтарминской ГЭС). Гарантированная водоотдача каскада складывается из отраслевого водопотребления и весьма водоемких попусков – транспортно-энергетических и пойменного. Урезка требований в размере вышеназванного объема означает отказ от обводнения поймы либо от транзитного судоходства по Иртышу.

Во избежание развала водохозяйственного и энергетического баланса крупнейшего региона необходимы активные совместные действия трех заинтересованных сторон в части совместного использования речного стока.

Сток верхнего Тобола, самого крупного притока Иртыша, поступает на территорию России из Кустанайской области Казахстана, зарегулирован

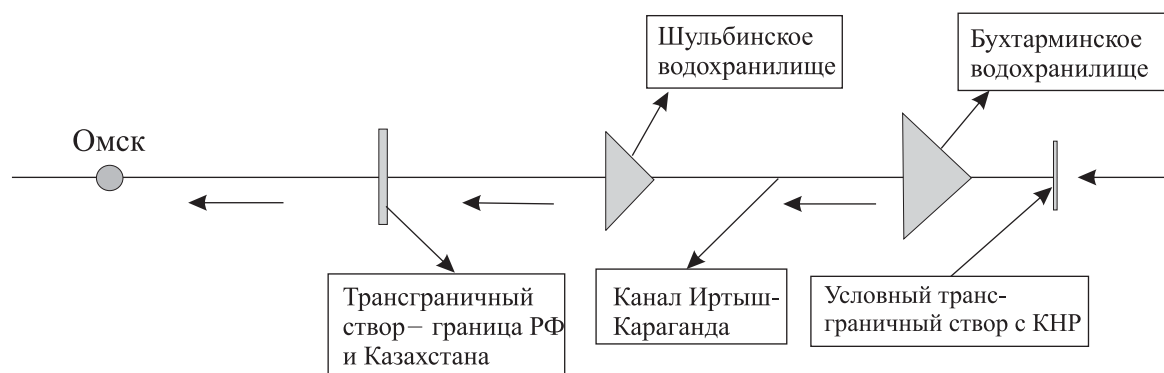


Рис. 1. Водохозяйственная система среднего Иртыша

двумя водохранилищами многолетнего регулирования стока (рис. 2).

Методические особенности расчета водохозяйственного баланса. Водохозяйственные балансы – это количественное сопоставление располагаемых водных ресурсов с объемом и режимом требований к ним со стороны водохозяйственного комплекса, а также результат этого сопоставления. Не следует забывать, что водохозяйственный баланс – это специфическая

составляющая обосновывающих водохозяйственных расчетов, которая содержит множество неопределенностей, связанных с исходной информацией и принципами ее использования. Балансы всегда варианты, поскольку отражают соотношение гарантированных объемов воды и расчетного водопотребления при соответствующем уровне развития отраслей экономики и комплекса водохозяйственных и природоохранных мероприятий. Они служат

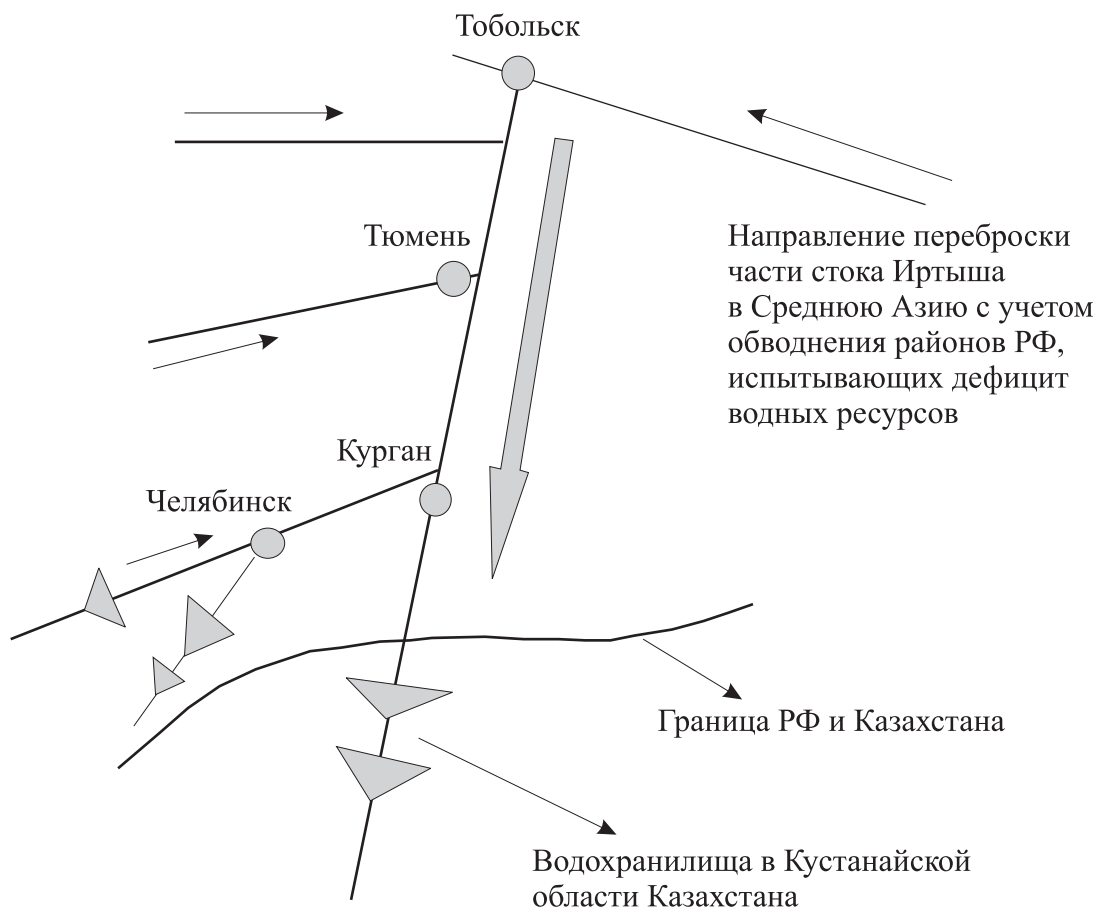


Рис. 2. Схема поступления вод Тобола из Казахстана

для анализа работы водохозяйственных систем в течение ретроспективного периода, фиксируют рост водопотребления, соблюдение лимитов водопользования, режима эксплуатации водохозяйственных установок, определяют необходимость перераспределения водных ресурсов между потребителями.

Учет подземных вод при составлении балансов производится посредством включения в приходную часть водозабора из подземных вод, а в приходную часть – водопотребления в комплексе с величиной ущерба речному стоку. Обычно водохозяйственные балансы составляются для маловодных лет высокой обеспеченности от 75 до 95 % в соответствии с принятыми значениями критериев покрытия водопотребления. Особо ответственным потребителям, например АЭС, балансы могут выполняться для экстремального маловодья 97...99 % обеспеченности.

Можно выделить несколько позиций, свойственных трансграничным бассейнам: нестандартная структура баланса; «размытые» критерии удовлетворения требований и несовершенство самой системы критериев, необходимость их согласования при различии методических подходов;

корректное сочетание водохозяйственных, экологических, экономических и политических факторов в процессе принятия решений;

необходимость оценки водных ресурсов не только по расчетным маловодным годам, а по всему спектру водности;

выбор формы представления совместного баланса ресурсов и режима использования стока для составления международных соглашений;

необходимость использования в ряде случаев не только имитационного и оптимизационного моделирования, но и стохастических моделей для генерирования длительных гидрологических рядов стока, служащих прототипом будущего режима.

Последнее обстоятельство может быть обусловлено недостаточно репре-

зентативными данными наблюдений либо стремлением к более объективной разработке совместных правил управления водными ресурсами субъектами водodelения. В качестве стохастической модели стока обычно принимается та или иная модификация авторегрессии первого порядка с последующим переходом к трехпараметрическому гамма-распределению [3].

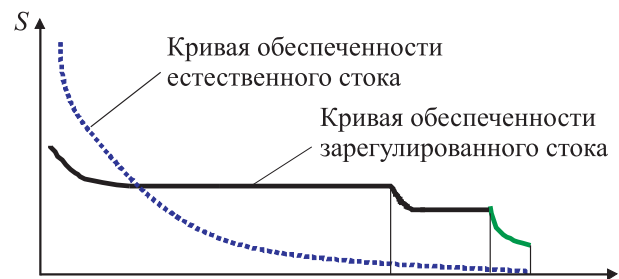


Рис. 3. Кривые обеспеченности естественного и зарегулированного стоков

Особенности терминологии. На практике применяются разные названия и формы водохозяйственных балансов (ВХБ) [2, 3]. Встречаются сочетания: ВХБ участка реки, ВХБ в створе гидроузла (водохранилища), ВХБ бассейна или части бассейна. Каждое несет определенный смысл сообразно поставленной проектной задаче. Наиболее часто используется баланс водохозяйственного участка (ВХУ). Более существенным является правильность составления баланса. Если баланс разрабатывается в целом для бассейна или значительной части, то его следует собирать из отдельных балансов участков. Непосредственный расчет ВХБ большой территории неизбежно приведет к возникновению «скрытых дефицитов». Нельзя покрыть водопотребление верхнего бассейна стоком, формирующимся в нижней его части, если, конечно, не предусматривать насосные станции перекачки стока на дефицитные участки реки.

Если проблема не сосредоточена в одном створе, то неотъемлемой частью большинства водохозяйственных расчетов являются постворные балансы реки,

характеризующие водохозяйственную обстановку в разных частях бассейна. Благодаря компьютерным технологиям составление таких балансов не представляет особого труда. Большое значение в этом случае имеет разработка корректного алгоритма расчета водохозяйственного баланса, в основе которого лежит уравнение водохозяйственного баланса. Кроме того, важным обстоятельством является учет возвратных вод, при этом учитывается та часть объема водоотведения, которая поступает непосредственно на водохозяйственный участок.

Уравнение и структура водохозяйственного баланса. Такое уравнение может быть записано различными способами в зависимости от того, какие именно составляющие являются определяющими для водохозяйственного анализа конкретной проектной задачи. Постворный водохозяйственный баланс не может быть составлен без четкой методики расчета проектного стока в створе, замыкающем водохозяйственный участок. В свою очередь, проектный сток в замыкающем створе не может быть получен без предварительного распределения дефицита между отраслевыми потребителями и комплексным попуском [2, 6].

Распределение дефицита между участниками водохозяйственного комплекса – самостоятельная водохозяйственная задача, которая решается либо на основе согласованных приоритетов, либо путем технико-экономического обоснования.

Уравнение водохозяйственного баланса участка реки, где расположено водохранилище для регулирования стока, описывается примерно так:

$$S_{\text{пр}} + S_{\text{бок}} + W_{\text{подз}} \pm \Delta S + TR + W_{\text{вв}} \pm \Delta V = W_{\Sigma} + КП + UR + D + ПОТ, \quad (1)$$

где $S_{\text{пр}}$ – проектный приток сверху, учитывающий изъятие выше входного створа; $S_{\text{бок}}$ – боковая приточность на участке, иначе – сток, формируемый на участке; $W_{\text{подз}}$ – водозабор грунтовых вод (подземный водозабор); ΔS – изменение стока, образовавшееся в результате антропогенной деятельности человека; TR – переброска стока извне (из других бассейнов); $W_{\text{вв}}$ – возвратные воды на участке; ΔV – регулирование стока на водохозяйственном участке (ВХУ); W_{Σ} – суммарный водозабор на участке; КП – комплексный попуск, построенный

по верхней огибающей санитарно-экологического и энерго-транспортного попусков; UR – ущерб речному стоку в результате осуществления подземного водозабора; D – дотация стока в другие бассейны или створы данного бассейна (либо переброска стока извне со знаком минус); ПОТ – потери на фильтрацию, дополнительное испарение и ледообразование, связанные с регулированием стока на участке.

Приведенное уравнение – не единственный способ математического описания водохозяйственного баланса, возможно сокращение и увеличение количества членов уравнения в зависимости от конкретных особенностей рассматриваемого водного объекта.

В ряде случаев требуются вспомогательные и обобщающие водохозяйственные балансы. Первые служат для детализации укрупненных составляющих водохозяйственного баланса, вторые, наоборот, для обобщения полученных результатов водохозяйственных расчетов и составления общей картины функционирования водохозяйственной системы.

Форма представления баланса зависит от принятой расчетной схемы движения воды и регулирования стока. Традиционная структура включает приходную и расходную части, а также результат баланса. Ответственным моментом является выбор расчетного интервала времени, так как расчет баланса, как правило, дискретная процедура. При этом следует принимать во внимание категорию реки, неравномерность стока, наличие водохранилищ, несоответствие водного режима, режима водопотребления и специальных весенних попусков. В зависимости от указанных факторов устанавливаются месячные, декадные, пентадные или даже суточные расчетные интервалы. Чаще всего на малые интервалы разбивается период половодья, паводка.

Относительно стандартная форма водохозяйственного баланса, используемая в расчетах и удобная для компьютерных балансовых моделей, рассмотрена на примере реки Дон в створе Цимлянского гидроузла, построенного в 1959 году в СССР (рис. 4). При составлении баланса сложной водохозяйственной системы существенным

моментом является порядок представления материалов. По опыту проектирования оптимальным вариантом является многолетний водохозяйственный баланс в годовых объемах стока и водопотребления, а также баланс характер-

ных по водности лет. В указанных балансах учтены правила управления водными ресурсами водохранилища, рассчитанные авторами при разработке версии имитационной водохозяйственной модели [6, 7].

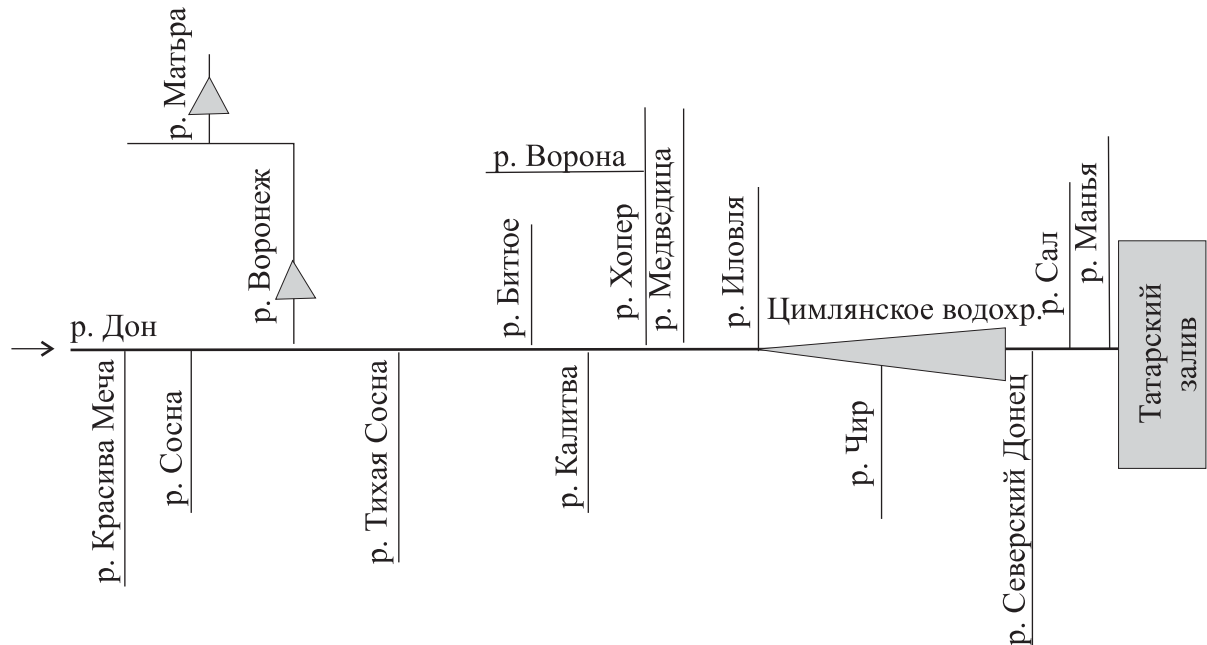


Рис. 4. Линейная расчетная схема реки Дон:

— существующие водохранилища; —●— расчетные створы

Водохранилище гидроузла осуществляет многолетнее регулирование нижнего Дона и является гарантом водообеспечения всего водохозяйственного комплекса, включая регулярное орошение, промышленность, изъятие стока в Волго-Донской канал, обводнение притоков Дона — рек Сал и Маныч, энергетические попуски и транспортное судоходство до села Раздорское в устьевой части Дона.

Особенность гидроузла — ступенчатый график энерготранспортных и рыбохозяйственных попусков в зависимости от наполнения водохранилища на начало половодья и прогноза стока на второй квартал, когда проходит основная часть половодья.

Назначаемый объем попуска, а точнее, его превышение ΔU над гарантированным в рамках диспетчерского графика, принимается как функция

двух переменных — обеспеченности паводка P и наполнения на начало водохозяйственного года v :

$$\Delta U = F(P, v). \quad (2)$$

Однако во многих случаях структура баланса может существенно отличаться от стандартной формы, отражая существо принимаемых проектных решений и реализации инженерно-технических, адаптационных и организационно-предупредительных мероприятий. Эффективным дополнением к расчетным балансовым таблицам, используемым при оформлении, является иллюстративный ВХБ, дающий графическую интерпретацию произведенных балансовых расчетов (рис. 5).

Окончательный водохозяйственный баланс должен быть «сведенным», т. е. не содержащим дефицитов. Рекомендуемый вариант баланса должен быть увязан с учетом необходимых

водохозяйственных и водоохранных мероприятий, для обоснования которых он и предназначен.

Напряженным и необычным трансграничным бассейном является бассейн реки Самур, среднемноголетний сток которой несколько превышает 2 км^3 . Река протекает практически по границе Дагестана (Россия) и Азербайджана, несколь-

ко раз пересекая границу этих стран.

Особенностью водохозяйственной системы бассейна является наличие около 20 малых рек, протекающих параллельно Самуру и впадающих в Каспийское море. Сток этих рек, в силу дождевого режима питания, мало доступен для изъятия без осуществления регулирования.

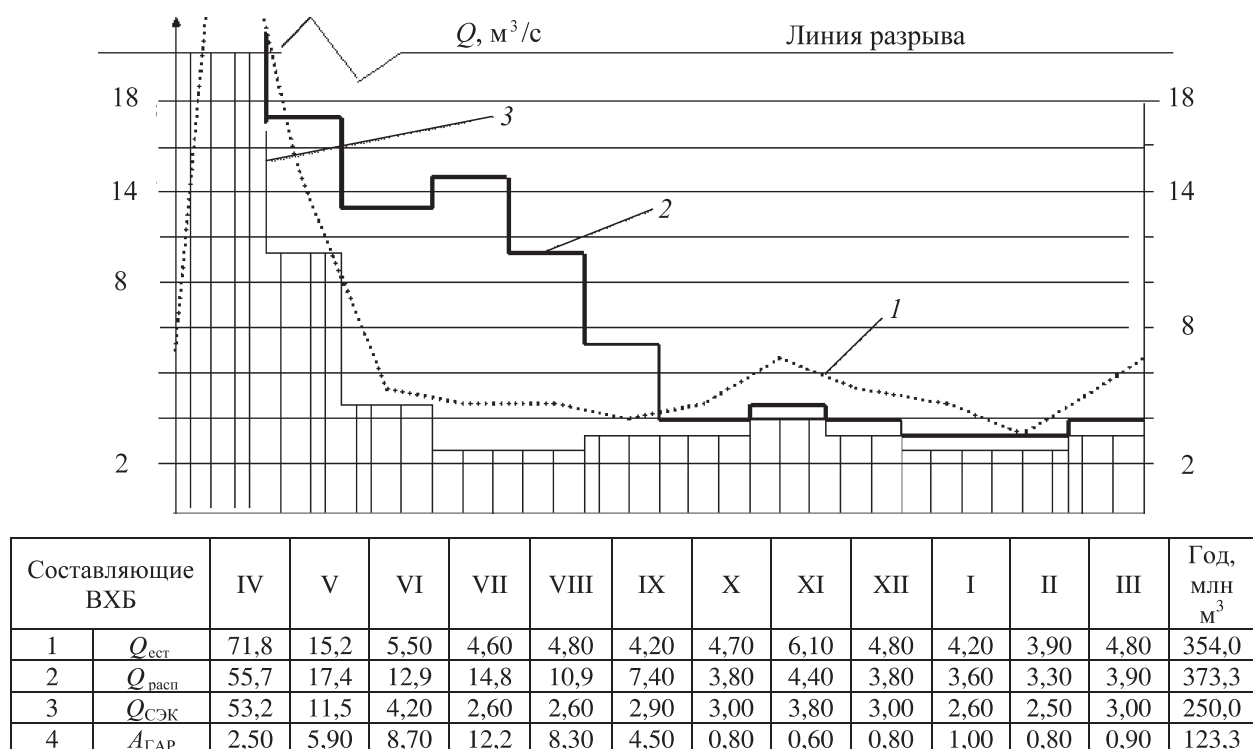


Рис. 5. Схема иллюстративного водохозяйственного баланса (к проектной перспективе 2005 года): $Q_{\text{ест}}$ – естественный сток в створе гидроузла; $Q_{\text{расп}}$ – зарегулированные располагаемые ВР с учетом дотации из внешнего речного бассейна; $Q_{\text{СЭК}}$ – санитарно-экологический попуск; $A_{\text{ГАР}}$ – гарантированное водопотребление брутто в расчетном сырье

Сам Самур – река ледникового типа питания, с умеренной изменчивостью стока, служит одним из основных источников водообеспечения для обширного региона от города Дербента до городов Баку и Сумгаит, расположенных на Апшеронском полуострове.

Распределение воды между республиками осуществляется по двум магистральным каналам – Самур-Апшеронскому (САК) и Самур-Дербентскому (СДК). Самур-Апшеронский (в прошлом Самур-Дивичинский канал в Азербайджане) канал протяженностью около 200 км проложен в земляном русле. Перебрасываемый сток исполь-

зуется для орошения в долинах малых рек бассейна Самура и частично для водоснабжения Апшеронского полуострова. В концевой части канала расположено наливное Джейран-Батанское водохранилище, необходимое для перерегулирования расходов канала в график водопотребления.

Воды Самура питают большое количество оросительных каналов непосредственно в долине Самура и используются в уже упоминавшихся магистральных водоводах для целей водоснабжения. Даже до распада СССР проблема вододеления и совместного использования стока стояла достаточно остро. Основой водных

отношений служил протокол 1967 года, задающий процент распределения примерно 1:3 в пользу Азербайджана. Это было связано с большими объемами водоподачи Самурской воды на Апшеронский полуостров для водоснабжения городов Баку и Сумгаит, а также для орошения земель в долинах малых рек бассейна.

По схеме комплексного использования и охраны водных ресурсов 1982 года в качестве гаранта водообеспечения региона выдвигалось Ахтынское водохранилище непосредственно на Самуре. По разным причинам решение не было реализовано. Требования к стоку Самура предъявляются как со стороны субъектов водodelения, так и со стороны природного комплекса, который представлен самурским лесом с уникальной флорой.

Строительство Самурского гидроузла (гидроузел-вододелитель) в свое время привело к резкому изменению гидравлического режима дельты реки. Как следствие, нарушился баланс поверхностного и подземного притоков, возникла проблема исчезновения объекта, занесенного в Красную книгу. Кроме того, прибавились чисто технические проблемы, требующие реконструкции Самурского гидроузла. Таким образом, водохозяйственные и политические проблемы усугубились проблемами экологическими и инженерно-техническими.

В настоящее время каждая из республик проявляет намерения независимо разрешать свои проблемы. По существу, изыскиваются возможности регулирования стока каждым из соседей, в то время как Ахтынское водохранилище могло стать центральным и эффективным звеном для совместного использования и управления водными ресурсами Самура.

Построение водохозяйственного баланса описанной системы требует учета множества факторов, перечисленных выше. В связи с этим для анализа ситуации со стороны России необходимы два баланса: первый – ориентированный на оценку ресурсов Самура и каждой из стран (баланс деления водных

ресурсов), второй (баланс водопользования) – ориентированный на использование своей доли стока для хозяйственного использования, в данном случае для ирригационных целей. Баланс водопользования имеет относительно стандартную структуру, а баланс деления представляет самостоятельный интерес.

При оценке ресурсов каждого из субъектов водodelения рассматриваются два подхода. Основной принцип первого периода – паритетное водodelение (юридический), второй ориентирован на протокол 1967 года, который долгие годы был основой взаимоотношений в области деления водных ресурсов [8]. На чем остановиться – это вопрос дипломатов и политиков, доминантой поведения которых должен быть принцип мирного сосуществования двух стран.

К вопросу назначения критериев покрытия водопотребления. В условиях совместного использования водных ресурсов необходимо согласование критериев удовлетворения требований водопользователей. В отечественной практике используются следующие понятия обеспеченности: по числу бесперебойных лет, по сумме бесперебойных месяцев календарного года. Оценивается обеспеченность сокращенной водоотдачи, регламентируется максимальная величина дефицита.

В зарубежной практике, в частности английской, определяющей является вероятность того, что гарантированное водопотребление не упадет ниже заданного предела. По сути, регламентируется обеспеченность диапазона водоотдачи. Такой подход является менее жестким по сравнению с российским, что обусловлено меньшими водными запасами. В новых методических указаниях по расчету водохозяйственных балансов, помимо обеспеченности, прописан показатель надежности R :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (A - D_i)}{AN} \cdot 100 \% =$$

$$= \left(1 - \frac{D_{cp}}{A}\right) \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где A – проектная гарантированная отдача водохранилища; D_i – величина дефицита в i -м году; $D_{\text{ср}}$ – среднеегодегний дефицит; N – продолжительность расчетного ряда.

Выводы

Совместное использование водных ресурсов трансграничных бассейнов требует многофакторного анализа водохозяйственной обстановки, согласования методических аспектов и в качестве безусловной доминанты – соблюдения требований водной экологии.

Представляется, что использование оптимизационных математических методов при решении вопросов, затронутых в статье, должно быть очень осторожным, чтобы математический азарт не превалировал над серьезными исследованиями в области генетики стока с учетом вероятностных изменений климата, изучения экологического состояния водных объектов, объективного анализа располагаемых водных ресурсов при регулировании и территориальном перераспределении стока [8].

Особенностью трансграничных вод является создаваемая ими гидролого-водохозяйственная взаимозависимость системы водопользователей, расположенных в разных странах. Главная проблема заключается в оптимальном управлении этой взаимозависимостью.

1. **Бусалаев И. В.** Сложные водохозяйственные системы. – Алма-Ата: Наука, 1980. – 230 с.

2. Методика расчета водохозяйственных балансов водных объектов. – М.: Ми-

нистерство природных ресурсов Российской Федерации, 2007. – 38 с.

3. **Раткович Л. Д.** Методология обосновывающих водохозяйственных расчетов // Мелиорация и водное хозяйство. – 2007. – № 6. – С. 32–34.

4. **Раткович Л. Д.** Водохозяйственные проблемы трансграничных бассейнов // Природообустройство. – 2008. – № 4. – С. 41–47.

5. **Крицкий С. Н., Менкель М. Ф.** Гидрологические основы управления водохозяйственными системами. – М.: Наука, 1982. – 271 с.

6. **Раткович Л. Д., Русакова П. А.** Водохозяйственные аспекты правил управления водохранилищами комплексных гидроузлов : сборник материалов Международной научной конференции МГУП. – М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2006. – С. 57–165.

7. **Исмаилов Г. Х., Прошляков И. В., Раткович Л. Д.** Методология управления большими водохозяйственными системами на примере Волжско-Камского каскада водохранилищ // Мелиорация и водное хозяйство. – 2006. – № 4. – С. 17, 18.

8. **Шахов И. С.** Водные ресурсы и их рациональное использование: учеб. пособие. – Екатеринбург, 2000. – 173 с.

Материал поступил в редакцию 17.12.09.

Раткович Лев Данилович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Комплексное использование водных ресурсов»

Тел. 8 (495) 976-21-56

Неезжалов Владимир Александрович, аспирант

Тел. 8 (495) 976-21-56