06
КК144



МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР
КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ

06
КК 144
9

ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

ВЫПУСК 7

ИЗДАТЕЛЬСТВО «КАЗАХСТАН»
Алма-Ата — 1970

06+621.22.+627.1+333.9+551.48

РЕДАКЦИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Сборник содержит статьи по оптимизации режимов водноэнергетического и энерготранспортного комплексов, по вопросам оценки экономической эффективности капиталовложений в водном хозяйстве и другим теоретическим проблемам гидроэнергетики.

Ряд статей посвящен теории регулирования речного стока, гидрологическим и топографическим характеристикам.

Значительное место занимают статьи по гидравлике сооружений и открытых русел, а также по приемам регулирования мощности гидротурбин.

Сборник рассчитан на инженеров, работающих по проектированию и эксплуатации водохозяйственных систем и установок, на научных работников и аспирантов, специализирующихся в области гидроэнергетики и водного хозяйства.

Редакционная коллегия

А. П. Браславский, доктор технических наук, И.В. Бусалаев, кандидат технических наук (ответственный секретарь», В. П. Захаров, академик АН КазССР, Р. Ж. Жулаев, член-корреспондент АН КазССР, Н. С. Калачев, доктор технических наук, В. А. Кикте нко, доктор технических наук, Ш. Ч. Чокин, академик АН КазССР (ответственный редактор).

202080

Всесоюзная ордена Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная библиотека

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
1970 *ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА* вып.7

I. ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ

В. П. ЗАХАРОВ

ВОПРОСЫ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАПИТАЛЬНЫХ ВЛОЖЕНИЙ В ВОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

За последнее десятилетие (1959—1968) широко и остро обсуждаются вопросы экономической эффективности капитальных вложений во всех отраслях народного хозяйства и особенно в таких, в которых производство совпадает по времени с потреблением продукции или услуг. К таким отраслям относится, в частности, водное хозяйство и связанные с ним электроэнергетическое хозяйство и транспорт.

Причиной такого активного рассмотрения явилась прежде всего высокая капиталоемкость этих отраслей, что вызвало к жизни большое число официальных работ нормативно-методического характера. Сюда прежде всего следует отнести «Типовую методику определения экономической эффективности капитальных вложений и новой техники в народном хозяйстве СССР», разработанную в Академии наук СССР [2]. Почти одновременно, а частично и на основе этой Типовой методики появился ряд отраслевых нормативно-методических материалов [1, 3—6 и др.]. Эти материалы включали в себя некоторые дискуссионные положения, что и стимулировало обсуждение этих вопросов.

Второй причиной острого их обсуждения явилось постепенное формирование сложных комплексных производственных систем в этих отраслях. В энергетическом хозяйстве к ним относятся объединенные системы электроэнергетические и тепло- и газоснабжения. В транспортном хозяйстве страны формируются сложные системы, объединяющие железнодорожный, водный, автомобильный и воздушный виды транспорта.

Особенно остро стоят вопросы комплексности при объединении в системе разнородных отраслей производства в водном хозяйстве. Если раньше речь шла о комплексных гидроузлах, отвечающих интересам ирригации, гидроэнергетики, водного транспорта и других отраслей водного хозяйства, то в настоящее время во многих бассейнах рек ряд гидроузлов комплексного назначения превращается в единую водохозяйственную систему со всеми сопряженными с ними отраслевыми подсистемами (ирригационно-мелиоративными, электроэнергетическими, транспортными и т. д.). Формирование комплексных водохозяйственных систем на таких реках, как Волга с Камой, Сыр-Дарья, Аму-Дарья и многие другие, приводит к тому, что вопросы экономической эффективности любого крупного мероприятия (водозабора, регулирования стока, водоотведения и др.) не могут рассматриваться без учета влияния этих мероприятий на все или почти все другие элементы данной водохозяйственной системы. Еще большую сложность взаимосвязей в таких системах создают мероприятия по территориальному перераспределению водных ресурсов, по межбассейновым переброскам стока. В настоящее время такие мероприятия получают все более широкое распространение.

В этих условиях появились и были опубликованы конкретные методические предложения и дискуссионные выступления, к сожалению, эти выступления носят преимущественно отраслевой характер. В области

гидроэнергетики к ним можно отнести работы В. Г. Айвазяна [7, 8, 9, 10], М. П. Фельдмана [8], Д. С. Щавелева [7, 10, 12], Е. А. Елохина [12] и др. В области водных мелиораций следует отметить выступления Д. Т. Зузика [12, 13], М. Н. Лойтера [12], Б. Г. Коваленко [12] и др. В области водного транспорта — Г. М. Матлина [12] и др.

Для всех этих выступлений и публикаций характерен чрезвычайный разнобой. Анализу этих расхождений многих авторов и посвящается настоящая статья.

* * *

1. В области энергетического и транспортного хозяйства, как и во всех отраслях промышленности, для технико-экономических расчетов уже давно общепризнанным является принцип оценки относительной эффективности капитальных вложений при сравнении вариантов и оптимизации проектируемых объектов. Характеризующим этот принцип является определение удельной величины дополнительных капитальных вложений в более капиталоемкий вариант на единицу годовой экономии текущих издержек производства. При этом сравниваемые варианты производственных объектов должны обеспечивать одинаковый объем продукции одного и того же (или взаимозаменяемого) вида. Этот показатель, выражаемый

$$T_{ок} = \frac{К_1 - К_2}{И_2 - И_1} = -\frac{\Delta К}{\Delta И}, \quad (1)$$

получил условное название «срока окупаемости». Здесь $К_1$, $И_1$ соответственно величины капитальных вложений и годовых издержек производства более капиталоемкого варианта, $К_2$ и $И_2$ — такие же величины сопоставляемого менее капиталоемкого варианта одного и того же производственного назначения. Однако в условиях высоких темпов развития социалистического народного хозяйства, несмотря на то, что размерность этого показателя — годы, он не является каким-либо конкретным сроком, да и «окупаемость» не есть для нашего хозяйства основная цель развития его отраслей. Такой целью может считаться лишь повышение темпов развития народного хозяйства в целом.

Критерием оптимальности более капиталоемкого варианта является соотношение $T_{ок} \leqslant T_н$ — нормативного «срока окупаемости», т. е. действительные удельные дополнительные капитальные вложения в более капиталоемкий вариант на единицу экономии годовых текущих издержек производства должны быть не больше норматива $T_н$, в рублях на рубль в год.

В связи с тем, что общепринятый термин «срок окупаемости» может приводить к некоторым ошибочным заключениям, в последнее время в технико-экономических расчетах большее распространение получил обратный показатель — «коэффициент эффективности»

$$E = \frac{1}{T_{ок}} = \frac{И_2 - И_1}{К_1 - К_2} = -\frac{\Delta И}{\Delta К},$$

который представляет удельную экономию годовых издержек производства на единицу дополнительных капитальных вложений в более капиталоемкий вариант. В соответствии с критерием «срока окупаемости» критерием «коэффициента эффективности» является соотношение

$$E = -\frac{\Delta И}{\Delta К} \geqslant e = \frac{1}{T_н}. \quad (1')$$

Недостатком изложенных критериев «срока окупаемости» и «коэффициента эффективности» является то, что они пригодны для экономическо-

го сопоставления только двух сравниваемых вариантов. Поэтому для сопоставления нескольких проектируемых вариантов одного и того же производственного назначения в настоящее время применяется критерий «расчетных затрат».

$$РЗ = \varepsilon К + И = \min. \quad (2)$$

Это критериальное соотношение является прямым следствием критерия «коэффициента эффективности» и получается из него путем разделения затрат по вариантам. Несмотря на то, что в этом соотношении нормативный коэффициент эффективности (ε) умножается на полную величину капитальных вложений, он относится только к дополнительной их части, так как общая, одинаковая для всех сравниваемых вариантов часть этих вложений не играет никакой роли для оценки минимума «расчетных затрат».

В сельском хозяйстве, в частности в ирригационно-мелиоративном хозяйстве, принцип относительной эффективности капитальных вложений не получил широкого распространения. В этих отраслях как в материалах нормативно-методического характера [4, 5], так и во многих опубликованных работах [13] в основу принимается принцип абсолютной эффективности всех капитальных вложений (а не дополнительных). Оценка последней производится на основе чистого дохода, равного разности реализационной цены продукции и текущих издержек производства. В этих материалах и работах в качестве критерия принимается показатель, именуемый также «сроком окупаемости», но имеющий совершенно иной смысл, чем «срок окупаемости», при оценке относительной эффективности капитальных вложений.

$$Т^{а}_{ок} = \frac{К}{Ц \cdot П - И} = \frac{1}{R}, \quad (3),$$

где Ц — цена реализации единицы продукции, а П — объем годовой продукции данного предприятия.

Во-первых, этот показатель является обратной величиной коэффициента рентабельности R капитальных вложений в целом, а не дополнительных. Во-вторых, эта величина является действительно сроком окупаемости для частного предпринимателя или для кооперативного (колхозного) хозяйства. Но он может быть лишь показателем уровня рентабельности проектируемого мероприятия, но не критерием оптимизации.

Такое разнообразие принципов оценки экономической эффективности капитальных вложений для тех или иных отраслей водного хозяйства является совершенно неприемлемым для объектов комплексного использования водных ресурсов, а тем более для комплексных водохозяйственных систем. Но так как последние в условиях советского народного хозяйства не могут основываться на частной или кооперативной собственности, а, безусловно, являются в основном общегосударственными системами, то применение для них, как мы покажем в следующем пункте, принципа абсолютной эффективности капитальных вложений является неприемлемым. Следовательно, для расчетов эффективности капитальных вложений в сложных комплексных водохозяйственных системах необходимо применять единый принцип относительной их эффективности.

* * *

2. Экономическая сущность капитальных вложений состоит в том, что эти вложения в основные фонды производства в той или иной форме повышают производительность общественного труда. Количественное значение повышения производительности труда на еди-

ницу капитальных вложений и должно являться мерилом экономической эффективности этих вложений.

Соответственно описанным выше (в п. 1) двум принципам оценки экономической эффективности капитальных вложений (абсолютной и относительной) повышение производительности общественного труда может по-разному оцениваться в двух принципиально отличных случаях.

При увеличении объема производства какой-либо продукции повышение производительности труда общества может оцениваться разностью стоимости этой продукции и количеством оплачиваемого живого и овеществленного труда (т. е. текущих издержек производства). А удельная величина абсолютной эффективности капитальных вложений в этом случае будет определяться отношением

$$\varepsilon_{ср} = \frac{Ст \cdot П - И}{К}. \qquad (4)$$

где Ст — стоимость единицы продукции предприятия, $\varepsilon_{ср}$ — средний коэффициент эффективности всех капиталовложений в данное предприятие. Остальные обозначения остаются прежними.

Это соотношение, во-первых, не может служить для оценки эффективности, поскольку в его состав входит величина стоимости продукции (Ст), которая не может быть достоверно определена. Этим соотношение (4) отличается от соотношения (3), где взамен этой величины принимается реализационная цена продукции (Ц). Последняя не отражает действительной стоимости продукции, так как она в значительной мере связана с политикой цен, зависящей не только от экономических факторов, но и от политических, социальных и т. п.

Во-вторых, в социалистическом государстве определяющее значение для решений о производстве увеличенного объема той или иной продукции имеет не рентабельность данного производства, а закон планомерного (пропорционального) развития социалистического хозяйства. Поэтому объем каждого вида продукции определяется планированием и оптимизацией материальных балансов по стране в целом и по районам с учетом транспортировки до мест потребления. В этих условиях возможно установление экономической целесообразности увеличения производства отдельных видов продукции с величиной среднего коэффициента эффективности $\varepsilon_{ср}$ весьма незначительной и даже отрицательной (например, в случае исключительной дефицитности ресурсов сырья для этого вида продукции).

В этих условиях едва ли возможно нормирование коэффициента абсолютной эффективности капитальных вложений.

Таким образом, экономическое обоснование проектируемых объектов должно вестись в два этапа. На первом необходимо экономическое обоснование объема дополнительно производимой продукции на проектируемом предприятии (всех видов при комплексности производства) и требуемых объемов производства сырья для него. Это возможно произвести лишь методами балансовых расчетов и оптимизации материальных балансов соответствующих видов продукции.

На втором этапе экономического обоснования должно проводиться сопоставление всех возможных вариантов производства указанных видов продукции, в определенных на первом этапе объемах. При этом возможна лишь оценка относительной эффективности дополнительных капитальных вложений в экономически оптимальный вариант проектируемого объекта.

Это наиболее целесообразно провести по принципу критерия «расчетных затрат» (по соотношению 2).

* * *

3. Абсолютная эффективность капитальных вложений в различных отраслях имеет, совершенно очевидно, разные уровни. Есть отрасли весьма высокой средней эффективности капитальных вложений, а есть отрасли со значительно более низкими показателями средней эффективности. Но в условиях планового социалистического хозяйства это обстоятельство не играет существенной роли для планирования производства в различных отраслях народного хозяйства. Объясняется это тем, что материальный баланс страны и отдельных экономических ее районов должен удовлетворять требованиям экономического закона планомерного (пропорционального) развития социалистического хозяйства в целом.

Но это различие фактических коэффициентов средней эффективности капитальных вложений ($\varepsilon_{ср}$) в тех или иных отраслях явилось причиной предположения об отраслевом характере нормативов эффективности. Такое предположение высказывается как в материалах нормативно-методического характера, так и во многих статьях и докладах, посвященных этим вопросам.

Это положение нам представляется совершенно неправильным. Действительно, дополнительные капиталовложения при сравнении вариантов одинакового производственного назначения не связаны с экономическим значением продукции в народном хозяйстве, так как она не изменяется ни в количественном, ни в качественном отношении. В таких условиях для народного хозяйства естественно требование, чтобы эти дополнительные капиталовложения обеспечивали эффективность (в отношении экономии годовых издержек производства, т. е. снижения себестоимости продукции) не меньшую, чем на любом другом участке народного хозяйства. А это приводит нас к убеждению в целесообразности единого для всех отраслей народного хозяйства норматива, относительной экономической эффективности дополнительных капитальных вложений при сравнении вариантов — ε.

Следует заметить, что единство этого норматива является в то же время необходимым для оптимизации как отдельного гидроузла комплексного назначения, так и комплексной водохозяйственной системы в целом.

4. Во всех имеющихся в настоящее время нормативно-методических материалах [1—6 и др.] рекомендуемые или предписываемые как обязательные нормативы эффективности капитальных вложений предлагаются без каких-либо обоснований, в чисто «волевом порядке». В то же время устанавливаемый уровень норматива относительной эффективности капитальных вложений (коэффициент ε) совершенно не безразличен для развития народного хозяйства в целом.

В случае занижения этого норматива при выборе вариантов проектируемых объектов появится возможность принятия весьма капиталоемких производств с относительно низким уровнем повышения производительности труда. Это может привести к истощению материальных и трудовых ресурсов социалистического хозяйства, что в свою очередь вызовет снижение темпов его развития.

В случае же завышения норматива ε при выборе оптимального варианта получат преимущество варианты с низкой структурой капитала и, как правило, относительно невысокого уровня технического оснащения. Это также приведет в дальнейшем к истощению трудовых ресурсов социалистического хозяйства на текущее производство продукции. Кроме того, как показывает анализ производственного использова-

ния всевозможных природных или производственных ресурсов, повышение уровня их продуктивного использования приводит все к большим и большим капитальным вложениям на каждый дополнительный процент их использования. Эта закономерность является почти всеобщей для использования всех видов ресурсов. В связи с этим завышение норматива эффективности приведет к весьма неполному, иными словами хищническому использованию природных ресурсов. Это в конечном счете опять-таки вызовет снижение темпов развития социалистического хозяйства в целом.

А поскольку отклонения норматива в обе стороны приводят к одним и тем же отрицательным последствиям, можно судить, что существуют наиболее благоприятные значения норматива относительной эффективности капитальных вложений, соответствующие максимальным темпам развития социалистического хозяйства в целом. В этом отношении норматив эффективности должен соответствовать критерию быстродействия в отношении темпов развития социалистического хозяйства в целом. Следует высказать сожаление, что наши ведущие экономические институты (институты экономики АН СССР и Госплана СССР, СОПС и другие) не уделяют внимания исследованиям по установлению оптимального норматива относительной эффективности капитальных вложений в современных условиях развития народного хозяйства СССР и тенденций его изменений.

До проведения таких исследований можно лишь предположительно судить о зоне оптимальных значений норматива эффективности. Для этого можно ориентироваться на два показателя развития народного хозяйства в СССР за прошлые годы: отношение приростов национального дохода к приросту производственных фондов и относительная величина годового прироста продукции народного хозяйства СССР в целом. При этом следует учитывать, что рост национального дохода в значительной мере зависит от количественного и качественного (по квалификации) роста трудовых ресурсов и что средняя эффективность капитальных вложений, как правило, существенно выше, чем оптимальное значение норматива относительной эффективности дополнительных капитальных вложений по изложенным выше соображениям.

Исходя из этих приближенных прикидок, можно предполагать, что оптимальное значение норматива эффективности должно находиться в интервале 6—10% в год, а «волевые» нормативы ГНТК СССР — 12,5% (1) и ГК СМ СССР по науке и технике — 15% (6) являются, очевидно, завышенными.

* * *

5. В последние годы ряд авторов (Е. А. Елохин, Д. С. Щавелев и другие) выдвинули предположение, что норматив эффективности капитальных вложений и норматив учета «фактора времени» должны быть различными. В обоснование этого выдвинуты два соображения.

Во-первых, по аналогии с условиями капиталистического хозяйства при омертвлении (неиспользовании в производстве) капитальных вложений следует учитывать лишь «плату за кредит», а при использовании их в качестве основных производственных фондов надо учитывать «полную норму прибыли». Быть может, это до некоторой степени может учитываться в условиях капиталистического хозяйства, где имеет место распределение прибавочной стоимости продукции между финансовым («плата за кредит») и предпринимательским капиталом. Но в условиях социалистического хозяйства такого распределения нет, так как мы имеем единое народное хозяйство. Кроме того, сами авторы непоследовательно рас-

пространяют действие заниженного норматива учета «фактора времени» не только на период «омертвления» капитальных вложений, но и на период их производственного использования.

Во-вторых, этими авторами (Е. А. Елохиным и др.) выдвигается предположение, что при неиспользовании капитальных вложений как действующих производственных фондов в качестве ущерба от этого должна учитываться только та доля нормативной эффективности их использования, которая идет на накопление производственных фондов, а доля возможной эффективности этих вложений, идущая на общественное потребление, может не учитываться в ущербе от омертвления капитальных вложений в незавершенном строительстве. Они распространяют такое суждение за пределы периода строительства на временную эксплуатацию, когда эти капитальные вложения уже частично действуют как производственные фонды.

В своих суждениях авторы предложения о снижении норматива учета «фактора времени» совершенно не учитывают того обстоятельства, что в формулах «расчетных затрат», применяемых для сравнения вариантов одного и того же производственного назначения, по существу, все коэффициенты ε и $(1+\varepsilon)^t$ относятся только к дополнительным вложениям (или другим затратам). Они, как известно, не относятся к основной части затрат, одинаковой для всех сравниваемых вариантов, поскольку последняя не играет никакой роли в их минимизации.

Относительная эффективность дополнительных капитальных вложений не связана с изменением объема продукции, а следовательно, эта часть затрат не влияет на материальный баланс народного хозяйства. Это определяет возможность направления дополнительных затрат в любую отрасль народного хозяйства. Поскольку дополнительные вложения для одного из рассматриваемых вариантов не обеспечивают эффективности на данном производстве, такое положение равносильно полному ущербу в размере нормативной эффективности, так как при использовании этих дополнительных вложений в другом производстве, не требующем длительного строительства, они могли бы дать повышение производительности труда не ниже нормативного.

В период строительства, по существу, следовало бы учитывать несколько повышенный норматив эффективности дополнительных капиталовложений, так как кроме ущерба от бездействия этих фондов они еще амортизируются при длительном сроке строительства, не давая продукции. А эта амортизация фондов без перенесения ее на стоимость продукции является также прямым народнохозяйственным ущербом.

При учете «фактора времени» за пределами строительного периода также вполне обоснованно применение полного норматива эффективности дополнительных капитальных вложений, если учитывается и эффективность экономии текущих издержек производства. Дело в том, что при одинаковом объеме продукции вариант, требующий дополнительных затрат, на всем протяжении использования его фондов должен обеспечить нормативную эффективность затрат всех видов.

Поэтому нет никаких оснований для снижения норматива при учете «фактора времени» по сравнению с нормативом экономической эффективности капитальных вложений при сопоставлении вариантов одинакового производственного назначения, то есть при расчетах по принципу относительной эффективности затрат.

* * *

6. В литературе, посвященной экономической эффективности капитальных вложений, имеется довольно большое количество формул

расчетных затрат, выражающих различные принципиальные концепции в этой области.

Наибольшее распространение получила группа формул, которые построены на принципе оценки относительной эффективности и при известных условиях являются тождественными. Сюда относятся формулы

В. В. Болотова $$РЗ_т = \varepsilon \sum_1^т (К_t + И_t)(1+\varepsilon)^{т-} + И_{нэ} \quad (5)$$

Д. С. Щавелева $$РЗ_т = \sum_1^т (\varepsilon К_t + \Delta И_t)(1+\varepsilon)^{т-t}, \quad (6)$$

М. А. Чернина $$РЗ_т = \varepsilon \sum_2^т З^c_t (1+\varepsilon)^{т-t} + З^c_{т+1}. \quad (7)$$

Наиболее ясной по своему содержанию является формула В. В. Болотова. Сущность ее заключается в том, что «расчетные затраты» на год «нормальной эксплуатации» одного из вариантов проектируемого объекта должны состоять: а) из нормативной эффективности всех затрат (вложений в основные и оборотные фонды и издержек производства) за все предшествующие годы, приведенные к году «нормальной эксплуатации», б) из годовых издержек производства в год «нормальной эксплуатации». Мы полагаем, что в принципе такой состав «расчетных затрат» при отнесении их к одному году является вполне правильным.

Однако в построении формулы заложены некоторые предпосылки, требующие, с нашей точки зрения, критических замечаний. Прежде всего само понятие «нормальной эксплуатации» может относиться только к одному объекту, взятому вне системы, в которой он работает. В настоящее время при развитии сложных водохозяйственных (а также энергетических) систем невозможна оценка экономической эффективности капитальных вложений в отдельный объект. Всякое изменение состава системы вызывает изменение производственной роли большинства объектов в системе.

Поэтому нельзя рассматривать и сопоставлять варианты отдельных объектов, а следует сравнивать работу всей системы с включением в нее различных альтернативных вариантов развития (строительство различных объектов).

А отсюда следует, что нельзя выделять периоды строительства, временной и «нормальной эксплуатации». Непрерывно развивающаяся система почти непрестанно включает в себя строительство или расширение тех или иных объектов и также перманентно в ней происходят переходные процессы эксплуатации. Это и является «нормальной эксплуатацией» развивающейся системы. В ней почти не существуют периоды, когда $К_t = 0$, а $И_t = \text{const}$, как предполагают авторы перечисленных выше формул.

Кроме того, в формуле В. В. Болотова, а следовательно, и в аналогичных с ней формулах, имеется формальная некорректность: затраты лет строительства и временной эксплуатации от 1 до Т-го приведены к Т-му году, а текущие издержки года «нормальной эксплуатации», то есть Т+1 года, приняты без приведения в натуральном исчислении этого года.

Для исключения этого недочета формулы В. В. Болотова мы предлагаем следующую ее модификацию:

$$РЗ_m = \varepsilon \sum_1^{m-1} (К_t + И_t)(1+\varepsilon)^{m-t} + И_m. \quad (8)$$

Формула Д. С. Щавелева является изящным преобразованием формулы В. В. Болотова лишь при условии, что ΔИ является приращением $И_{-1} — И_t$. Но в ряде статей автора формулы эта величина определяется как «приращение текущих издержек производства по сравнению с предыдущим годом». Это является нарушением корректной формы преобразования. Более последовательным было бы преобразование этой формулы в виде

$$РЗ_т = \sum_{1}^{т-1} (\varepsilon К_t + \Delta И_{t+1})(1 + \varepsilon)^{т-t}. \qquad (6')$$

В последних статьях и докладах Д. С. Щавелева он вводит в эту формулу сниженную норму для учета «фактора времени», а именно:

$$РЗ_т = \sum_{1}^{т} (\varepsilon К_t + \Delta И_t)(1 + \sigma)^{т-t}. \qquad (6'')$$

Такое изменение формулы будет не совсем корректным, так как преобразование составляющей текущих затрат из $И_t$ к $\Delta И_t$ может быть вполне корректным лишь при условии $\varepsilon = \sigma$.

И уже совсем нелогичным в статьях и докладах Д. С. Щавелева является утверждение, что «суммарные расчетные затраты» могут быть получены путем умножения «расчетных затрат» на нормативный «срок окупаемости» — $Т_н$.

$$\sum_{т} РЗ = \sum_{1}^{т} (К_t + Т_н \cdot \Delta И_t)(1 + \sigma)^{т-t}. \qquad (6''')$$

Мы предлагаем (14) для исключения недочетов в модификации формулы Д. С. Щавелева внести следующий корректив, чтобы исключить сдвиг приведения затрат, который нами отмечен в формуле В. В. Болотова. При этом исходная формула примет вид

$$РЗ_m = \varepsilon \sum_{1}^{m-1} К_t (1 + \varepsilon)^{m-t} + \varepsilon \sum_{1}^{m-1} И_t (1 + \varepsilon)^{m-t} + И_m,$$

а исправленная формула Д. С. Щавелева с приведением всех затрат к т-му году будет выглядеть

$$РЗ_m = \sum_{1}^{m-1} (\varepsilon К_t + И_{t+1})\ (1 + \varepsilon)^{m-t} — \varepsilon (И_m — И_t). \qquad (9)$$

Вторым изящным и имеющим практические преимущества преобразованием формулы В. В. Болотова является упомянутая выше формула М. А. Чернина. Преимущество формулы этого автора заключается в том, что в ней «расчетные затраты» с учетом «фактора времени» даются в зависимости от «расчетных затрат» в статике и в номинальном значении капиталовложений (без учета «фактора времени»). А именно в ней $РЗ^c_t = \varepsilon К^c_{t-1} + И_t$, а $К^c_t = \sum_{1}^{t} К_t$. Для исключения в этой формуле недочета, упомянутого выше для формулы В. В. Болотова, мы предлагаем нижеследующую ее модификацию.

$$РЗ_m = \varepsilon \sum_{2}^{m-1} РЗ^c_t (1 + \varepsilon)^{m-t} + РЗ^c_m + \varepsilon^2 К^c_{m-1}). \qquad (10)$$

* * *

7. В ходе развития водохозяйственных (а также и энергетических) систем неоднократно происходят такие изменения в затратах и в режиме производства ее компонентов, которые нарушают плавность развития системы. Таковы ввод в эксплуатацию крупных водозаборов и гидроузлов, периоды первоначального наполнения крупных водохранилищ и тому подобное. При этом происходят резкие колебания экономических показателей как отдельных составляющих системы, так и ее в целом.

В этих условиях расчеты экономической эффективности капитальных вложений в систему в целом на один какой-либо срок и даже на два-три статических уровня не могут характеризовать действительной роли проектируемых мероприятий и экономической целесообразности выбираемых вариантов. В действительности при «произвольном выборе» расчетного срока (или двух-трех расчетных уровней) многие осложняющие моменты, упомянутые выше, могут для некоторых вариантов не найти отражения в показателях на этот срок (или на эти уровни).

Таким образом, динамика развития водохозяйственных систем не может быть отражена экономическими показателями на один «расчетный срок» (или на два-три статических уровня).

Некоторые авторы (М. П. Фельдман, А. А. Бесчинский и др.) предполагают, что динамика развития системы может быть отражена суммарными экономическими показателями за «расчетный срок», в частности, «суммарными расчетными затратами». Но это неверно. «Суммарные расчетные затраты» даже при их вполне корректной оценке ничего не говорят о динамике «расчетных затрат» внутри «расчетного срока». А ведь для правильной экономической характеристики весьма важно, имеет ли выбираемый вариант относительное снижение «расчетных затрат» внутри «расчетного срока» (прогрессивность варианта) или, наоборот, относительное повышение «расчетных затрат» (регрессивность варианта) при сопоставлении с другими альтернативными вариантами. Эта сторона динамики развития не может быть определена оценкой «суммарных расчетных затрат» за «расчетный срок».

Мы полагаем, что единственным путем для учета динамики развития систем при оценке эффективности капитальных вложений является отказ от некоторого постоянного для каждого из сравниваемых вариантов «расчетного срока» и переход оценки на переменный срок как основной аргумент.

В этом случае расчетные затраты m-го года в соответствии с предлагаемыми нами модификациями формулы В. В. Болотова будут определяться формулой

$$\text{РЗ}_m = f(m) = \varepsilon \sum_{1}^{m-1} (\text{К}_i + \text{И}_i)(1+\varepsilon)^{m-i} + \text{И}_m. \qquad (8)$$

Модификация формулы Д. С. Щавелева может быть представлена в виде

$$\text{РЗ}_m = f_1(m) = \sum_{1}^{m-1} (\varepsilon \text{К}_i + \triangle \text{И}_{i+})(1+\varepsilon)^{m-i} - \varepsilon(\text{И}_m - \text{И}_i). \qquad (9)$$

Точно так же модификацию формулы М. А. Чернина возможно выразить в функции m

$$\text{РЗ}_m = f_2(m) = \varepsilon \sum^{m-1} \text{РЗ}_i^c (1+\varepsilon)^{m-1} + \text{РЗ}_m^c + \varepsilon^2 \text{К}_{m-1}^c. \qquad (10)$$

Таким образом, выбор варианта может быть осуществлен не на основе сопоставления вариантов на один заданный срок, а на основе сопо-

ставления «расчетных затрат» на протяжении значительного числа лет, для которых возможно прогнозирование развития водного хозяйства с некоторой степенью достоверности.

В этих условиях решающее значение получает не только более низкое значение «расчетных затрат» по выбираемому варианту, но и тенденция относительного их снижения по сравнению с другими вариантами. Это создает, правда, некоторые осложнения для объективности выбора вариантов. Так, например, при выборе варианта параметров объектов, могущих изменяться непрерывно, такой учет динамики развития не дает возможности установить объективно одно оптимальное значение этого параметра, а позволяет лишь выявить зону оптимальных решений. Окончательный же выбор того или иного значения параметра должен приниматься с учетом не только экономических соображений.

В тех случаях, когда в начале расчетного периода капиталоемкий вариант дает повышение «расчетных затрат», а затем они через несколько лет становятся существенно ниже таковых у альтернативных вариантов, представляет большой интерес сопоставление «суммарных расчетных затрат» за период от 1-го года строительства до m-го года (при переменности m).

Суммарные расчетные затраты за m лет, приведенные к 1-му году, могут быть выражены по модификации формулы В. В. Болотова.

$$\sum_{m} \text{РЗ} = \varepsilon \sum_{1}^{m-1} \text{К}_i \frac{m-i}{(1+\varepsilon)^{i-1}} + \sum_{1} \text{И}_i \frac{\varepsilon (m-i)+1}{(1+\varepsilon)^{i-1}}, \tag{11}$$

по модификации формулы Д. С. Щавелева

$$\sum_{m} \text{РЗ} = \varepsilon \sum_{1}^{m-1} \text{К}_i \frac{m-i}{(1+\varepsilon)^{i-1}} + \sum_{2}^{m} \triangle \text{И}_i \frac{m-i}{(1+\varepsilon)^{i-2}} + \frac{\text{И}_m - \text{И}_1}{(1+\varepsilon)^{m-1}}, \tag{12}$$

по модификации формулы М. А. Чернина

$$\sum_{m} \text{РЗ} = \sum_{2}^{m} \text{РЗ}_i^c \frac{\varepsilon (m-i)+1}{(1+\varepsilon)^{i-1}} + \varepsilon^2 \sum_{1}^{m-1} \text{К}_i^c \frac{1}{(1+\varepsilon)^i}. \tag{13}$$

* * *

8. Многие авторы (Е. А. Елохин, Д. С. Щавелев и др.) к вопросам экономической эффективности капитальных вложений относят методику распределения затрат по комплексным объектам между компонентами (отраслями водного хозяйства). Это не совсем верно.

Во-первых, экономическая эффективность затрат на водохозяйственный комплекс определяется целесообразностью данного комплексного объекта в целом по сравнению с суммарными затратами по альтернативным комплексным решениям всех компонентов. Поскольку в условиях советского народного хозяйства все компоненты водохозяйственной системы являются отраслями единого социалистического хозяйства, для последнего важно повышение производительности труда во всем комплексе, и несущественно, в какой из отраслей формально выявится экономия трудозатрат.

Во-вторых, все методы распределения затрат являются сугубо условными, поскольку в «расчетные затраты» всегда входят в той или иной мере общие затраты, одинаковые и для комплексного и для альтернативных решений.

Поэтому распределение затрат между компонентами может иметь некоторое значение в следующих трех направлениях:

1. При утверждении финансирования строительства, при котором Госпланом СССР намечается распределение его объема по ведомствам и министерствам. Но это обычно имеет чисто формальное значение, так как практически объем финансирования утверждается окончательно по комплексным объектам в целом, а строительство объектов поручается какому-либо одному ведомству, часто не имеющему прямого отношения к использованию водных ресурсов данного объекта. Так, например, каналы им. Москвы, Волго-Донской, и канал Иртыш — Караганда строились разными Министерствами и ведомствами.

2. Распределение затрат по отраслям необходимо при проектировании отраслевых систем, поскольку для экономических обоснований внутриотраслевых объектов и их параметров требуется оценка стоимости их продукции.

3. Наиболее существенное значение это распределение затрат имеет при последующей эксплуатации отраслевых систем для оценки себестоимости продукции и расчетов рентабельности их эксплуатации.

Можно согласиться с большинством авторов, что если суммарные «расчетные затраты» по комплексному объекту снижают сумму «расчетных затрат» по сравнению с альтернативными вариантами, то наиболее целесообразным принципом распределения их по отраслям является пропорциональное снижение «расчетных затрат» по таковым. Но так как распределению подлежат два вида затрат— капитальные вложения и текущие издержки производства, то необходимо одновременно использование двух принципов. Е. А. Елохин и Д. С. Щавелев предлагают в качестве второго принципа равенство «срока окупаемости» по отраслям, входящим в комплекс. Правда, Д. С. Щавелев дает этому принципу витиеватую формулировку «одинакового для всех компонентов процента снижения расчетных затрат на рубль дополнительных капиталовложений», хотя он в сочетании с одинаковым снижением «расчетных затрат» в целом идентичен равенству «срока окупаемости». Е. А. Елохин выявляет, что этот второй принцип приводит в ряде случаев к неопределенности (при приближении $T_{ок}$ к $T_н$) или к абсурдным результатам (при абсолютной эффективности комплексного объекта, т. е. при $T_{ок}<0$). Поэтому он для всех подобных случаев предлагает три различных дополнительных принципа.

В связи с тем, что наибольшее значение распределение затрат между компонентами водохозяйственной системы имеет при последующей эксплуатации или при проектировании отраслевых систем, мы полагаем наиболее целесообразным принять в качестве второго принципа одинаковое снижение себестоимости продукции для всех компонентов.

Экспериментальные расчеты показывают, что сочетания принципов, рекомендуемых указанными авторами, приводят к необоснованно высокому снижению текущих издержек производства по комплексным объектам и по сопряженным с ними отраслевым объектам для компонентов, имеющих замещающие варианты с более высокой структурой капиталов. Так, в примере, приводимом Д. С. Щавелевым (12), для отрасли с высокой структурой капиталов себестоимость снижается в 8 раз, а для другой отрасли — только в 3 раза. В ряде случаев получается, что эксплуатационные издержки по сопряженным с комплексом объектам данной отрасли должны оплачиваться другими отраслями, а в отдельных случаях эта доля приобретает отрицательный знак. Так происходит в тех случаях, когда другие компоненты, входящие в комплекс, должны принимать на себя часть эксплуатационных издержек по чисто отраслевым объектам компонента, имеющего замещающий вариант со значительно более высо-

кой структурой капиталов. Таким образом, рекомендации этих авторов могут приводить к абсурдным результатам даже при условии $T_н > T_{ок} > 0$.

В случае принятия нашего предложения подобные несуразности в расчетах распределения затрат исключаются.

* * *

9. В существующих методах оценки эффективности капитальных вложений путем сопоставления «расчетных затрат» по сравниваемым вариантам учитываются только три вида затрат: 1) капитальные вложения на образование основных, 2) на создание оборотных производственных фондов и 3) текущие издержки производства. Но существуют еще вполне реальные затраты народного хозяйства в целом, которые связаны с производственной работой комплексных водохозяйственных объектов и систем. Остановимся на трех видах таких затрат, которые следовало бы учитывать в «расчетных затратах», если они различаются для сравниваемых вариантов.

Прежде всего спецификой для всех отраслей водного хозяйства является стохастическая изменчивость главным образом поверхностных водных ресурсов. Стремление максимально использовать наличные ресурсы речных бассейнов приводит к тому, что обеспеченность (или вероятность) удовлетворения потребности оказывается всегда существенно ниже 100%. Это приводит к тому, что для всех объектов возможно возникновение перебойных периодов (или годов), в которые та или иная часть компонентов не получает удовлетворения их плановых потребностей. В результате возникают дополнительные затраты (ущербы) как в самих отраслях водного хозяйства, так и у потребителей их продукции. Эти ущербы зависят от глубины недодачи водных ресурсов по компонентам. А так как недодачи могут изменяться в определенных пределах (по вероятности), но в неопределенное время, то мы полагаем необходимым учитывать в «расчетных затратах» математическое ожидание годовой величины этих ущербов по всем отраслям, входящим в комплексную водохозяйственную систему, и по всем альтернативным вариантам.

Вторым видом неучитываемых народнохозяйственных затрат является дифференциальная земельная рента. Затапливание и подтапливаемые площади земель, а также площади, занимаемые другими отраслями, выпадают из сельскохозяйственного их использования. В результате народное хозяйство теряет возможность получения прибавочного продукта (или повышения производительности труда) по сравнению с другими наихудшими, но используемыми сельскохозяйственными угодьями.

Такое положение также наносит определенный ущерб народному хозяйству, который следовало бы учесть «в расчетных затратах» в форме дифференциальной земельной ренты.

Для районов, в которых по климатическим условиям земледелие может развиваться преимущественно в форме орошаемого, а водные ресурсы имеют оросительную способность, существенно уступающую фондам пахотно-пригодных земель, дифференциальная рента должна относиться не только к земельным фондам, но и к водным ресурсам. В этих районах безвозвратные потери водных ресурсов должны оцениваться по дифференциальной ренте, определяемой по повышению производительности труда на орошаемых землях с площадью, соответствующей этим потерям.

Третьим видом неучитываемых народнохозяйственных затрат следует считать косвенную оплату государством труда всех работающих на сопоставляемых комплексных и сопряженных с ними объектах и на альтернативных вариантах. Сюда следует отнести затраты социалисти-

ческого государства, приходящиеся в среднем на каждого трудящегося в области народного просвещения, здравоохранения, культуры и быта (обеспечения жильем и др.). Этот вид народнохозяйственных затрат должен учитываться по некоторой средней величине на одного трудящегося и пропорционально числу работающих по сравниваемым вариантам.

* * *

10. Особое место в текущих издержках производства занимают так называемые амортизационные отчисления. Мы исключаем из рассмотрения ту их часть, которая идет на производство капитальных ремонтов и по которой нет никаких разногласий.

Для остальной части амортизационных отчислений последнее время получил распространение термин «реновационных отчислений», то есть отчислений на возобновление. В современных условиях высоких темпов развития техники всех видов производств этот термин не соответствует реальности. Амортизационные отчисления в этих условиях имеют назначение не возобновления тех элементов основных фондов, на стоимость которых они начисляются. Они идут, как правило, на дальнейшее развитие производства и могут использоваться в народном хозяйстве на его развитие не только в той отрасли, где были начислены.

Основной целью амортизационных отчислений является перенесение на себестоимость продукции овеществленного труда, расходуемого в ходе использования и изнашивания (амортизации) основных фондов производства. Таким образом, амортизационные отчисления являются вполне реальными трудовыми затратами овеществленного труда наравне с затратами сырья, топлива и т. д. Поэтому совершенно неправильными являются предложения некоторых авторов (например, В. Г. Айвазяна [7]) исключить амортизационные отчисления из текущих издержек производства.

Столь же неправильными будут предложения некоторых авторов (например, Х. А. Аманова [12] и др.) включать амортизационные отчисления в доходность производств при исчислении рентабельности. Внесение амортизационных отчислений в государственный бюджет становится лишь возвратом части стоимости основных фондов, вложенных государством в данное производственное предприятие и израсходованных последним на выработку продукции.

Последнее время появилось большое количество статей и докладов (например, И. И. Файна [12] и др.), в которых предлагается исчислять амортизационные отчисления не по формуле равномерного распределения стоимости элементов основных фондов на срок их наиболее вероятной службы T_a по формуле $A = \frac{K}{T_a}$ в год, а по формуле срочных взносов, принимая в качестве процентов на капитал нормативный коэффициент относительной эффективности капитальных вложений:

$$A = \frac{\varepsilon K}{(1+\varepsilon)^{T_a} - 1}.$$

Это неверно по следующим соображениям. Во-первых, амортизационные отчисления определяются от полной величины стоимости элемента основных фондов, к которой этот норматив не имеет никакого отношения. Правда, мы применяем такой норматив при исчислении «расчетных затрат» ко всем капитальным вложениям, но это правомерно лишь при условии сопоставления вариантов, когда общая величина капиталовложений, одинаковая для всех сравниваемых вариантов, будучи умноженной на любые, но одинаковые множители, никакого влияния на оптимум (минимум «расчетных затрат») не имеет.

Во-вторых, при таком определении нормы амортизационных отчислений на стоимость продукции переносится только часть, а для долговечных элементов основных фондов, каковыми являются гидротехнические сооружения, совершенно ничтожная часть стоимости основных фондов. Таким образом, это предложение, по своему существу, ведет к безвозвратной растрате овеществленного труда, заключенного в основных фондах производств.

Совершенно неубедительны соображения этих авторов, будто бы амортизационные отчисления, переданные государству, могут быть вложены в основные фонды каких-либо предприятий и должны дать соответствующую эффективность не ниже нормативной. Ведь эта эффективность выразится в повышении производительности труда на тех предприятиях, в которые будут вложены указанные средства. А какое же отношение имеют к этому те предприятия, на которых произошла амортизация основных фондов? Ведь собственником этих фондов является государство, а не отдельное предприятие. Нужно заметить, что даже экономисты капиталистических стран, привыкшие к начислению процентов, все же не додумались до такого искажения существа амортизационных отчислений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основные методические положения технико-экономических расчетов в энергетике. М., Металлургиздат, 1959.
2. Типовая методика определения экономической эффективности капитальных вложений и новой техники в народном хозяйстве СССР. М., Госпланиздат, 1960.
3. Методика определения экономической эффективности гидроэлектростанций. М., Госэнергоиздат, 1961.
4. Указания по методике определения экономической эффективности капитальных вложений и новой техники в мелиорации. М., 1961.
5. Экономическая эффективность капитальных вложений в сельское хозяйство. М., Экономиздат, 1962.
6. Методика технико-экономических расчетов в энергетике. М., 1966.
7. Технико-экономические вопросы проектирования энергосистем и электростанций. М., «Энергия», 1964.
8. Технико-экономические расчеты в энергетике. М., «Наука», 1965.
9. Выбор энергетических параметров и размеров сооружений гидроэлектростанций. М., «Наука», 1965.
10. Оптимальные режимы работы гидроэлектростанций в энергосистемах, ч. I, II. М., 1966.
11. Доклады научной сессии по воспроизводству и использованию основных фондов промышленности СССР. Ереван, «Наука», 1966.
12. Доклады по экономике водного хозяйства, ч. I, II и III. М., 1967.
13. Зузик Д. Т. Экономика водного хозяйства. М., «Колос», 1964.
14. Захаров В. П. и Лойтер Э. Э. Учет динамики затрат при развитии энергетических и водохозяйственных систем. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 3. Алма-Ата, «Наука», 1965.

SUMMARY

The paper is dedicated to the theoretically justified methods of calculation of the capital investment economic effectiveness. For this purpose the author deals with problems of the nature of economic effectiveness, indexes of absolute and relative effectiveness of capital investments, aspects of distribution of capital expenditures among branches of multipurpose water system as well problems of amortization assignments.

Moreover the authors suggests practical recommendations and design equations for determination of the most advantageous parameters of the multipurpose water system taking into account the dynamics of its development.

202080

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
1970 *ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА* вып. 7

М. Н. ВАГАПОВ

МЕТОД РАСЧЕТА ОРОСИТЕЛЬНОЙ НОРМЫ С УЧЕТОМ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ВЫПАДАНИЯ ОСАДКОВ

Установление оптимальной подачи воды на орошение имеет исключительно важное значение в планировании развития сельскохозяйственного производства. Правильно найденная величина оросительной нормы и своевременное за вегетационный период распределение воды на поля орошения способствуют не только повышению урожайности сельскохозяйственных культур, но и предотвращают выход из хозяйственного оборота в результате засоления и необеспеченности водой ирригационно-подготовленных земель.

Предлагаемый прием учета обеспеченности осадками (основы естественной увлажненности растений) уточняет величину оросительной нормы, определяемой известными в настоящее время методами. Структуру существующих формул расчета оросительной нормы можно представить в виде равенства

$$M = E - W.$$

Физический смысл его заключается в том, что растение нуждается в искусственном поливе, если биологическая потребность E превышает естественное увлажнение W. Первый член, представляющий расходную статью, определяется в основном величиной транспирации воды растением за вегетационный период, а второй складывается из продуктивной части осадков вегетационного периода и запасов воды в почве перед посевом, т. е. представляет собой приходную статью.

Методы оценки биологической потребности растений в настоящее время еще недостаточно теоретически разработаны. Существующие в этом направлении предложения (1—5, 7, 9) исходят главным образом из анализа опытных данных, и результаты их дают приближенные решения. Кроме того, опытные данные, как правило, имеют локальное значение и обобщение их на значительные территории вносит определенные условности. При использовании указанных предложений в каждом конкретном случае требуется предварительное обоснование.

Естественная увлажненность, или, иначе, запас естественной влаги, доступный растению для освоения в период вегетации, зависит от водно-физических свойств почвы, климатических и рельефных условий района. В ряде случаев при оценке естественной увлажненности помимо осадков вегетационного периода и запасов почвенной влаги, зависящей от количества зимних осадков, учитывают продуктивно используемую часть грунтовых вод. Включение их возможно на сравнительно незначительных участках с близким залеганием уровня грунтовых вод (меньше 3 *м* от поверхности).

Влияние атмосферных осадков на увлажнение почвы вызывает непостоянство оросительной нормы, меняющейся в зависимости от засушливости года. Неучет изменчивости климатических условий приводит к неправильной оценке оросительной способности источника, полезной ем-

кости регулирующего водохранилища, урожайности сельскохозяйственных культур и т. д. При этом ошибка будет тем значительнее, чем резче колебания величины осадков и увлажнения почвы.

В проектной практике полезно используемая часть осадков вегетационного и зимнего периодов определяется с помощью поправочных коэффициентов $m_л$ и $m_з$ к среднемноголетним значениям осадков соответствующих периодов. При этом найденная величина оросительной нормы соответствует примерно 50% обеспеченности. Если учесть, что нормативная обеспеченность для правильного орошения принимается в настоящее время 75% и более, то становится очевидным, что указанный путь приводит к занижению оросительной нормы, завышению оросительной способности водоисточника и снижению гарантированных урожаев сельскохозяйственных культур.

Таким образом, существующие приемы определения величины E, W и в целом оросительной нормы имеют известные условности и приближения и естественно нуждаются в дальнейшем совершенствовании.

Как было уже отмечено, оросительная норма — величина переменная и характеризуется изменчивостью элементов как приходной, так и расходной частей. Ежегодные колебания биологической потребности растений не столь значительны по сравнению с изменениями естественной увлажненности. И потому при соблюдении достаточной строгости расчетов величину E для определенных физико-географических условий можно принять постоянной.

В этом случае закономерности колебания оросительной нормы можно выразить в функции изменчивости (обеспеченности) суммы продуктивно используемых растением запасов естественной влаги за вегетационный период.

Исходя из того, что продуктивно используемая часть естественной влаги составляет определенную долю ($m_л$, $m_з$) осадков вегетационного

Таблица 1

Коэффициенты вариации (C_v) летних и зимних осадков при разных вариантах продолжительности вегетационного периода

Наименование метеостанции	I вариант		II вариант	
	IV—X	XI—III	IV—VIII	IX—III
Петропавловск	0,28	0,47	0,35	0,41
Кустанай	0,30	0,44	0,33	0,36
Целиноград	0,35	0,69	0,39	0,55
Михайловка	0,30	0,36	0,35	0,44
Уральск	0,35	0,48	0,39	0,50
Гурьев	0,45	0,51	0,57	0,46
Актюбинск	0,20	0,45	0,47	0,40
Челкар	0,36	0,47	0,45	0,55
Тургай	0,33	0,53	0,44	0,63
Форт-Шевченко	0,46	0,56	0,60	0,51
Казалинск	0,45	0,40	0,63	0,36
Чулак-Курган	0,36	0,32	0,45	0,54
Кзыл-Орда	0,50	0,32	0,60	0,51
Семипалатинск	0,30	0,32	0,37	0,39
Чарская	0,30	0,35	0,37	0,35
Бахты	0,40	0,30	0,46	0,35
Зыряновск	0,10	0,30	0,35	0,42
Уш-Тобе	0,33	0,30	0,37	0,30
Алма-Ата	0,30	0,25	0,32	0,28
Баканас	0,40	0,37	0,42	0,32
Джезказган	0,48	0,56	0,54	0,50
Бетпак-Дала	0,35	0,36	0,44	0,44
Джамбул	0,42	0,32	0,48	0,30
Чардара	0,45	0,30	0,60	0,30

и зимнего периодов, каждую составляющую приходной части можно выразить в виде кривой обеспеченности.

Анализ проведенных исследований показывает, что распределение суммы осадков за соответствующие сезоны в многолетнем разрезе с достаточной точностью подчиняется закону распределения вероятностей Пирсона III типа с соотношением $c_s = 2c_v$ (рис. 1).

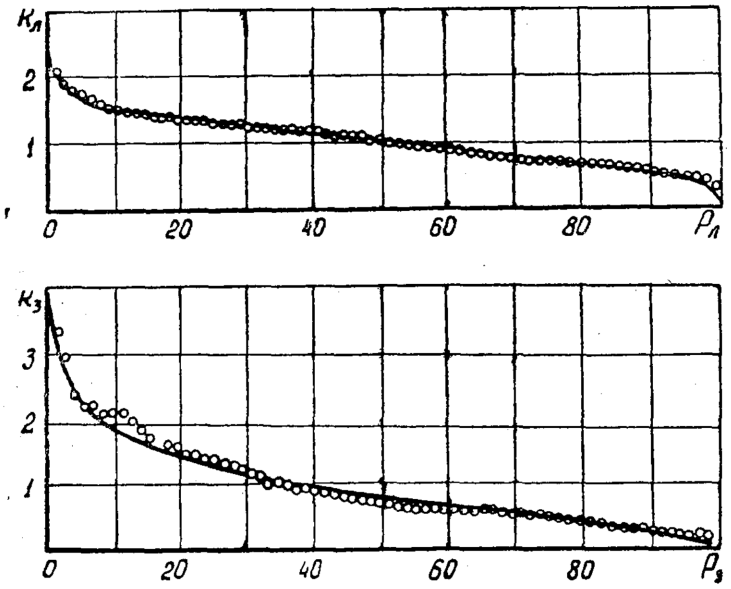


Рис. 1. Кривые обеспеченности осадков за летний (IV—VIII) и зимний (IX—III) периоды при $C_s = 2\,C_v$ (м. с. Целиноград).

В таблице 1 приводятся значения коэффициентов вариации летних и зимних осадков для двух вариантов продолжительности вегетационного периода по 24 метеорологическим станциям Казахстана. Как нетрудно заметить, эти же данные определяют вариации продуктивно используемой части летних и зимних осадков.

Суммарная величина продуктивной части осадков за весь вегетационный период может быть установлена путем композиции [8] вышеуказанных кривых. Причем задача композиции в данном случае значительно упрощается, поскольку между осадками летнего и зимнего периодов корреляционная связь отсутствует (рис. 2). Графическое решение ее показано на рисунке 3.

На взаимноперпендикулярных сторонах квадрата строятся кривые обеспеченности продуктивной части летних и зимних осадков в единицах нормы осадков соответствующих периодов. Затем на поле квадрата обеспеченности определяются положения линий равных значений суммы модульных коэффициентов $k_л$ и $k_з$. Для этого при заданной ординате одной кривой $k_л$ и сумме $k_Σ$ находят ординату другой $k_з = k_Σ - k_л$. Продолжение их на поле дает искомую точку пересечения. Аналогично этому для заданной суммы $k_Σ$ определяется еще ряд точек и по ним проводится линия, которая отсекает часть площади квадрата (равной 100%), определяющую соответствующую обеспеченность суммы $k_Σ$.

По результатам таких расчетов для ряда значений $k_Σ$ строится кри-

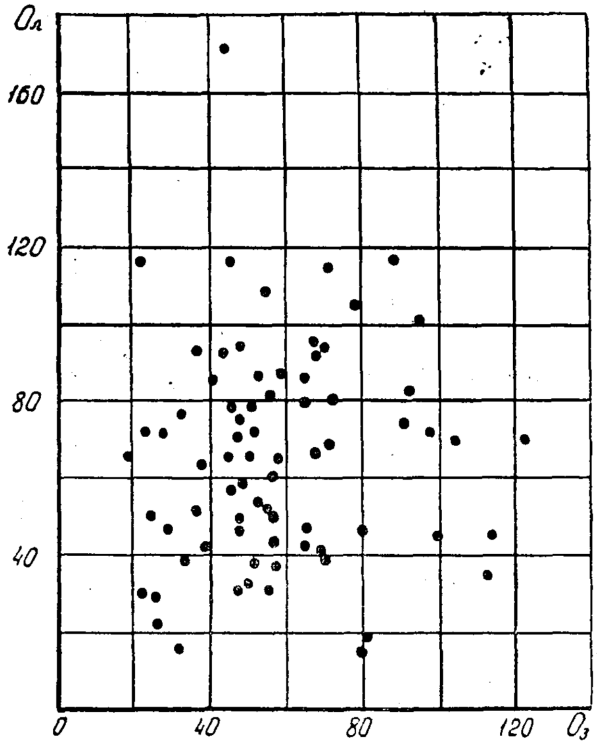


Рис. 2. Зависимость осадков летнего (IV—VIII) и зимнего (IX—III) периодов (м. с. Казалинск).

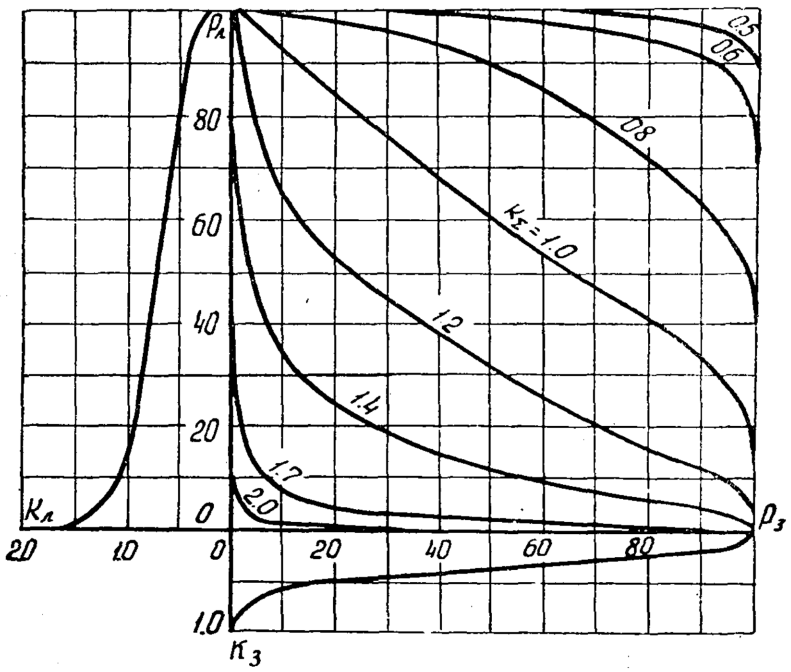


Рис. 3. Композиция кривых обеспеченности осадков летнего и зимнего периодов (м. с. Петропавловск).

вая обеспеченности продуктивной части осадков (рис. 4) в единицах суммарной нормы $\bar{O}_{\Sigma} = m_{л}\bar{O}_{л} + m_{з}\bar{O}_{з}$.

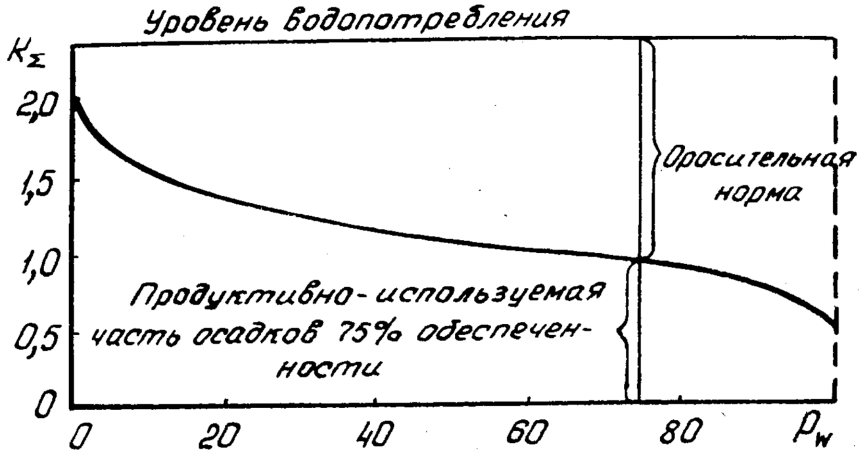


Рис. 4. Схема к расчету оросительной нормы.

При задании продуктивной части естественной влаги в виде кривой распределения оросительная норма (нетто) находится по разности между биологической потребностью (горизонтальная линия) и ординатой кривой любой нужной обеспеченности (рис. 4). В этом случае становятся очевидными существенные различия в результатах расчета по среднемноголетним величинам осадков и по кривой распределения осадков с учетом обеспеченности.

Пример*. Необходимо определить оросительную норму для пшеницы в районе Целинограда при заданнной обеспеченности осадков Р = 75%.

В рассматриваемой орошаемой зоне более достоверные результаты (в сравнении с опытными данными) для определения оросительной нормы дает балансовый метод (А. Н. Костякова). При этом биологическая потребность сельскохозяйственных культур может быть найдена по формуле $E = \varepsilon У$. Коэффициент водопотребления ε в данных условиях для пшеницы принимаем равным 150 *м³/ц*. При планируемой урожайности У = 25 *ц/га* величина биологической потребности определяется равной E = 3750 *м³/га* (375 *мм*).

По данным наблюдений метеорологической станции Целинограда (за 75-летний период), естественная увлажненность характеризуется следующими показателями:

1. Норма осадков
   - а) летняя — $\bar{O}_{л} = 159$ *мм*
   - б) зимняя — $\bar{O}_{з} = 109$ *мм*
2. Коэффициенты вариации осадков
   - а) летних — $C_{v} = 0{,}39$
   - б) зимних — $C_{v} = 0{,}35$
3. Коэффициенты продуктивного использования осадков
   - а) летних — $m_{л} = 0{,}5$
   - б) зимних — $m_{з} = 0{,}6$

* Расчеты оросительных норм для сельскохозяйственных культур в различных районах Казахстана выполнены Сахариевым С.

С помощью известных таблиц Фостера-Рыбкина для указанных характеристик на сторонах квадрата строим кривые обеспеченности продуктивно используемой части осадков летнего и зимнего периодов.

На поле квадрата площадь, оконтуренная линией равных значений суммы летних и зимних осадков и осями координат ($P_л$, $P_з$), представляет собой обеспеченность этой суммы. Построениями для ряда значений

Таблица 2

Оросительная норма для сельскохозяйственных культур с учетом обеспеченности выпадения осадков в различных районах Казахстана

Район	Культура	Плановая урожайность (У), *ц/га*	Коэффициент водопотребления (ε), *м³/ц*	Водопотребление $E=\varepsilon У$, *м³/га*	Оросительная норма (*м³/га*) при обеспеченности		
					50%	75%	95%
1	2	3	4	5	6	7	8
Северо-Казахстанская обл., Мамлютский р-н (метеостанция Петропавловск, $\overline{O}_{\Sigma}$=178,6 *мм*)	Пшеница	25	150	3750	1875	2143	2590
	Кукуруза	40	125	5000	3126	3393	3840
	Картофель	250	18	4500	2590	2858	3304
Кустанайская обл., Кустанайский р-н (метеостанция Кустанай, $\overline{O}_{\Sigma}$=155,8)	Пшеница	25	150	3750	2103	2649	2727
	Кукуруза	40	125	5000	3497	3583	3973
	Картофель	250	18	4500	2882	3116	3506
Целиноградская обл., Целиноградский р-н (метеостанция Целиноград, $\overline{O}_{\Sigma}$=145,0)	Пшеница	25	150	3750	2246	2510	2970
	Кукуруза	40	125	5000	3550	3840	4275
	Картофель	250	18	4500	2970	3260	3695
Карагандинская обл., Джездинский р-н (метеостанция Джезказган, $\overline{O}_{\Sigma}$=65,2)	Пшеница	25	150	3750	3130	3325	3456
	Кукуруза	40	120	4800	4173	4368	4499
	Просо	40	110	4400	3716	3912	4042
	Картофель	250	18	4500	3847	4042	4173
Алма-Атинская обл., Каскеленский р-н (метеостанция Алма-Ата, $\overline{O}_{\Sigma}$=311,5)	Пшеница	30	120	3600	311	935	1558
	Кукуруза	40	125	5000	1558	2181	2804
	Просо	40	115	4600	1246	1869	2492
	Сах.свекла	300	18	5400	1869	2492	3115
	Картофель	250	18	4500	935	1558	2181
	Сады и виноградники	100	60	6000	2492	3115	3738
Восточно-Казахстанская обл., Зыряновский р-н (метеостанция Зыряновск, $\overline{O}_{\Sigma}$=292,8)	Пшеница	30	120	3600	293	878	1610
	Кукуруза	40	125	5000	1757	2342	3074
	Просо	40	115	4600	1464	2050	2782
	Сах.свекла	300	18	5400	2050	2635	3367
	Картофель	250	18	4500	1171	1757	2489
Чимкентская обл., Кзылкумский р-н (метеостанция Чардара, $\overline{O}_{\Sigma}$=130,7)	Хлопчатник	25	210	5250	3790	4052	4313
	Пшеница	25	150	3750	2353	2614	2875
	Кукуруза	40	120	4800	3398	3660	3921
	Просо	40	110	4400	3790	3268	3529
	Рис	40	400	16000	14509	14769	15031
	Сах. свекла	300	18	5400	3921	4182	4444
	Картофель	250	18	4500	3006	3268	3529
	Сады и виноградники	100	60	6000	4575	4836	5097
Талды-Курганская обл., Каратальский р-н (метеостанция Уш-Тобе, $\overline{O}_{\Sigma}$=126,7)	Пшеница	30	135	4050	2661	2914	3168
	Кукуруза	40	120	4800	3421	3674	3928
	Просо	40	110	4400	1774	3294	3548
	Рис	40	400	16000	14570	14824	15077
	Сах. свекла	300	18	5400	4054	4308	4561
	Картофель	250	18	4500	3041	3294	3548
	Сады и виноградники	100	60	6000	4561	4815	5068

суммы определяем необходимые сведения о кривой обеспеченности продуктивно используемых осадков за весь вегетационный период. По ней находим ординату, соответствующую заданной величине обеспеченности удовлетворения орошения. В данном случае для P=75% она равна W_p=1240 *м³/га*. Затем оросительная норма для пшеницы определяется по разности:

$$M = E - W_p = 3750 - 1240 = 2510 \text{ м}^3/\text{га}.$$

Аналогичным образом выполнены расчеты по определению оросительных норм для ряда сельскохозяйственных культур, выращиваемых в отдельных районах Казахстана. Результаты их сведены в таблице 2. Как видно, оросительная норма, найденная по среднемноголетней величине осадков (50% обеспеченности) на территории республики, оказывается заниженной на 10—25% по сравнению с вычисленной для нормативной обеспеченности — 75%. При более высокой гарантии в подаче оросительной воды погрешность становится еще значительней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев В. И., Данильченко Н. В. Расчет поливного режима сельскохозяйственных культур методом дефицита испаряемости. «Гидротехника и мелиорация». М., 1960, № 8.

2. Костяков А. Н. Основы мелиорации. М., Сельхозгиз, 1958.

3. Марков Г. Из опыта проектирования поливных режимов сельскохозяйственных культур в условиях Народной Республики Болгарии. «Гидротехника и мелиорация». М., 1961, № 12.

4. Материалы к техническим условиям и нормам проектирования оросительных систем. Режим орошения сельскохозяйственных культур. М., «Гипроводхоз», 1958.

5. Миркин С. Л. Водные мелиорации в СССР и пути их развития. М., изд-во АН СССР, 1960.

6. Нормативы водопотребления основных сельскохозяйственных культур в различных орошаемых зонах СССР. М., «Гипроводхоз», 1963.

7. Израэльсен У. Теория и практика ирригации. М., ИЛ, 1956.

8. Потапов М. В. Соч., т. 3. М., Сельхозгиз, 1951.

9 .Труды Всесоюзного научно-исследовательского и проектно-изыскательского института «Гипроводхоз», вып. 21. М., 1962.

SUMMARY

According to the method suggested by the author, irrigation rate is determined as a difference between the biological requirements of plants and the ordinate of the curve of distribution of productive share of precipitation of the summer and winter seasons with any required frequency.

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
1970 *ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА* вып. 7

Ш. Ч. ЧОКИН, А. И. ГАЛЫНСКИЙ, Н. И. АНОЙКИН

ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА РАБОТЫ ЭНЕРГОВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

При комплексном использовании водотока основное внимание должно быть уделено разработке оптимальных режимов работы, отдельных компонентов энерговодохозяйственного комплекса (ЭВХК). Это условие имеет важное значение для гидроэнергоузлов с водохранилищами многолетнего регулирования стока, когда гарантированная отдача приближается к среднемноголетней его величине. В этом случае, когда водохранилище срабатывается до уровня мертвого объема и наступает критическое маловодье, могут возникнуть исключительно тяжелые по своим экономическим последствиям глубокие и продолжительные дефициты энергии и мощности на гидроэлектростанциях и существенные ограничения в подаче воды другим отраслям водного хозяйства. Это обстоятельство повлечет за собой возникновение дополнительных народнохозяйственных затрат как в энергопроизводственной системе, так и у неэнергетических водопотребителей и водопользователей.

Непроизводительные затраты труда в энергопроизводственной системе, или так называемые народнохозяйственные ущербы, вызываемые снижением гарантированной выработки электроэнергии на ГЭС, могут быть двух видов [6]. Первый вид ущербов — это дополнительные затраты, возникающие при сохранении плана выпуска промышленной продукции. К этой группе ущербов следует отнести дополнительные затраты на всевозможные мероприятия по энергопроизводственной системе, позволяющие компенсировать недовыработку электроэнергии ГЭС. Так, например, для сохранения плановой выработки электроэнергии в системе недопроизводство энергии ГЭС компенсируется дополнительной выработкой на тепловых электростанциях, которая может быть получена за счет форсированного режима работы и использования резервных мощностей ТЭС. Аварийный резерв энергосистемы в данном случае сосредоточивается на ГЭС.

Эти дополнительные затраты приближенно могут быть оценены по топливной составляющей себестоимости дополнительно выработанной электроэнергии, которая в этом случае будет существенно выше, чем при нормальном режиме работы ТЭС.

К этой же группе народнохозяйственных ущербов можно отнести дополнительные затраты, обусловливающиеся различными мероприятиями по уплотнению графика нагрузки; снижению потребления электроэнергии на промышленных объектах. Однако при современном уровне изученности вопроса эти затраты едва ли практически можно определить. Поэтому первую группу ущербов в настоящее время представляется возможным оценить лишь по величине дополнительных затрат на топливо.

Вторым видом народнохозяйственных ущербов являются дополнительные затраты, которые имеют место в энергопроизводственной системе при снижении ее плановой продукции. Этот вид ущербов возникает при

относительно большой недовыработке электроэнергии и существует как в энергосистеме, так и у промышленных потребителей.

При этом ущербы промышленных потребителей зависят не только от объема снижения плановой продукции, но и от возможного выхода из строя оборудования и т. д.

В этом случае следует учитывать сумму ущербов по каждому элементу системы, участвующему в сведении энергобаланса в периоды дефицита энергии или мощности.

Экономическая оценка народнохозяйственных ущербов по производственно-энергетической системе в целом является одним из важнейших вопросов энергоэкономических исследований.

При разработке этого вопроса большое значение имеет экономически допустимая глубина ограничения в потреблении электроэнергии каждым компонентом. Очевидно, возможная глубина ограничения графика нагрузки промышленных предприятий в каждом конкретном случае будет зависеть от структуры энергопроизводственной системы (резервные мощности ТЭС, энергоемкие или электрорегулируемые производства и т. п.).

Таким образом, обобщенной исходной информацией о народнохозяйственных ущербах в энергопроизводственной системе является дифференциальная характеристика, которая представляет собой зависимость суммы удельных ущербов на единицу недоданной энергии в зависимости от глубины дефицита. Эта характеристика может быть выражена в интегральной форме. Она дает возможность определить суммарные народнохозяйственные ущербы энергопроизводственной системы при различной глубине дефицита.

$$И_{уэ} = \int_0^{Э_д} y_{эi}\, d\, Э_д; \qquad (1)$$

где $y_{эi}$ — удельные ущербы, i -го потребителя энергопроизводственной системы,

$Э_д$ — дефицит электроэнергии.

Уменьшение водоносности реки может привести к снижению подачи воды другим отраслям водного хозяйства, что в свою очередь сопряжено с дополнительными затратами в этих отраслях. Так, снижение навигационного попуска вызовет дополнительные затраты по водному транспорту (увеличение объема дноуглубительных работ, снижение посадки судов за счет их недогруза и т. д.). Сокращение количества воды, подаваемой на орошение, сопряжено с возникновением ущербов в сельском хозяйстве и т. д.

Народнохозяйственные ущербы по неэнергетическим компонентам ЭВХК должны также определяться с учетом глубины дефицита от недодачи воды и оцениваться путем конкретного анализа экономических и режимных особенностей каждой отрасли водного хозяйства. На основании такого анализа можно получить зависимость народнохозяйственных ущербов для каждого рассматриваемого участка комплекса. В общем виде эту зависимость можно представить выражением:

$$И_{ун} = \int_0^{Q_д} y_{нi}\, d\, Q_д, \qquad (2)$$

где $y_{нi}$ — удельный ущерб, i -го — неэнергетического водопотребителя или водопользователя.

$Q_д$ — расход воды, недоданный неэнергетическому потребителю.

Таким образом, при дефиците воды (обусловленном гидрологической изменчивостью стока) возникает задача оптимального распределения

его между участниками комплекса, расположенными в данном бассейне реки, исходя из условия достижения суммарного минимума народнохозяйственного ущерба по энерговодохозяйственному комплексу в целом. Это условие можно представить следующим выражением:

$$И_{ук}=M(\Sigma И_{уэ})+M(\Sigma И_{ун})=min. \qquad (3)$$

Анализ существующих энерговодохозяйственных комплексов и их взаимосвязей показывает, что создание общего алгоритма для решения поставленной задачи практически невозможно. Поэтому задачу оптимального режима работы всего комплекса возможно решать блочным методом, т. е. поэтапно.

На первом этапе оптимизируется режим работы энергопроизводственной части комплекса при заданном ряде уровней потребления воды.

Второй этап заключается в оптимизации распределения воды между неэнергетическими компонентами для того же ряда уровней.

Третий, заключительный этап расчета представляет собой минимизацию функционала (3), т. е. устанавливается минимум-миниморум дополнительных расчетных затрат по энерговодохозяйственному комплексу в целом.

Указанные выше этапы в свою очередь разбиваются на ряд вспомогательных, конечной целью которых является эквивалентизация исходной информации. Для получения этой информации используется метод динамического программирования [2].

Как известно, основная идея динамического программирования заключается в замене оптимизации функций многих переменных поэтапной оптимизацией функции двух переменных. Это достигается путем сведения рассматриваемой оптимизационной задачи к решению определенных рекуррентных функциональных уравнений. Особенность их заключается в том, что они содержат, кроме обычных переменных состояния системы, группу управляющих параметров, осуществляющих функцию обратной связи в процессе поиска оптимального решения. Посредством надлежащего управления на каждом шаге процесса из всех возможных путей достижения цели выбираются наиболее эффективные.

Таким образом, динамическое программирование предназначается для многошагового анализа непрерывных процессов и позволяет решать сложные инженерные задачи больших размерностей.

Ниже излагается оптимизация режима работы энерговодохозяйственного комплекса методом динамического программирования.

При решении указанной задачи считаются заданными.

1. Структура энерговодохозяйственного комплекса.
2. Параметры отдельных компонентов комплекса.
3. Годовой график электропотребления, заданный рядом характерных для сезонов года суточных графиков (рис. 1).
4. Расходные (энергетические) характеристики агрегатов тепловых электростанций системы:

$$B_i=B(P_{ti}), \qquad i=1,2,3,\ldots,m \qquad (4)$$

и расходные характеристики гидроагрегатов ГЭС

$$Q_i=Q(P_{ri}), \qquad i=1,2,3,\ldots,n. \qquad (5)$$

Причем на соотношения (4) и (5) могут быть наложены ограничения в виде неравенств:

$$\begin{aligned} P_{т\,min} \leqslant P_{ti} \leqslant P_{т\,max} \\ P_{г\,min} \leqslant P_{ri} \leqslant P_{г\,max} \end{aligned} \qquad (6)$$

Нижний предел ограничений обусловливается или теплофикационной мощностью (для ТЭЦ), или мощностью техминимума (для ТЭС), или требованиями НЭВ в нижнем бьефе (для ГЭС), а верхний предел — номинальной мощностью агрегата.

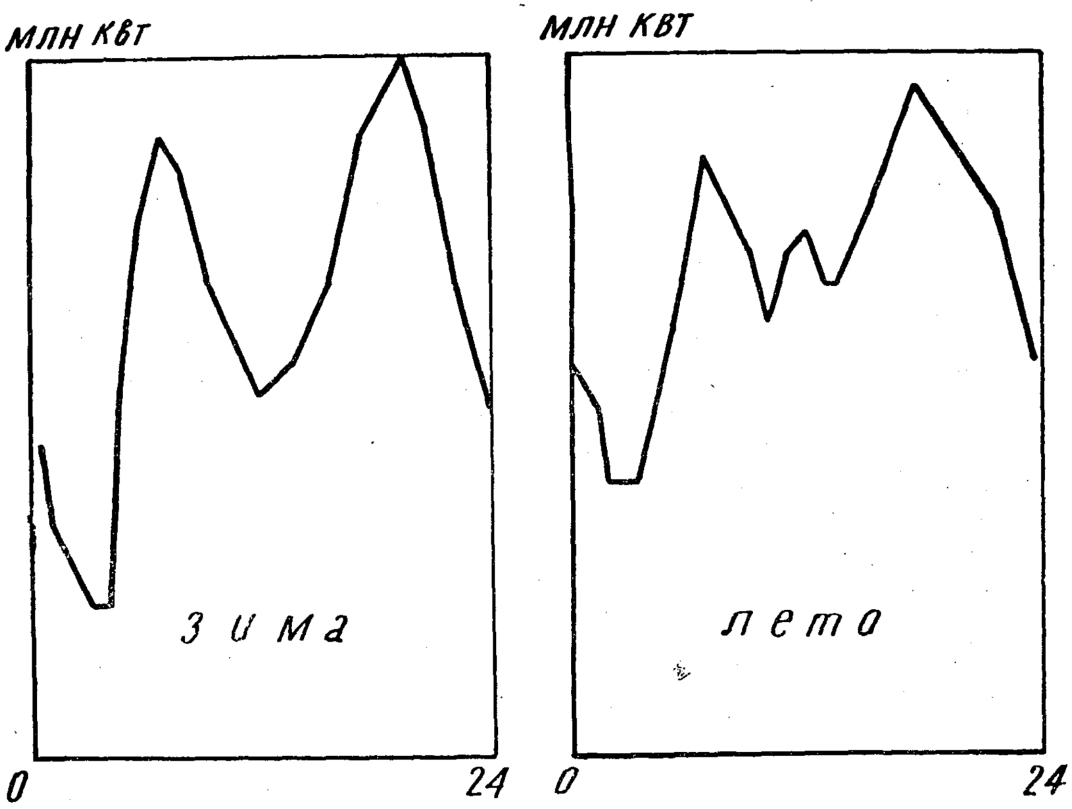


Рис. 1. Характерные графики нагрузки энергосистемы.

5. Требования неэнергетических компонентов комплекса задаются в виде характерных технологических графиков потребления воды и водопользования.

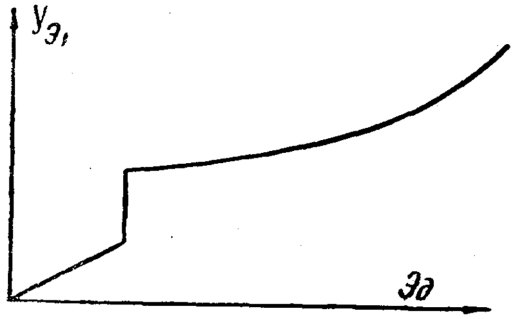
6. Характеристики дополнительных затрат по компенсации ущербов для каждого компонента комплекса от недодачи воды (энергии) (рис. 2, 3).

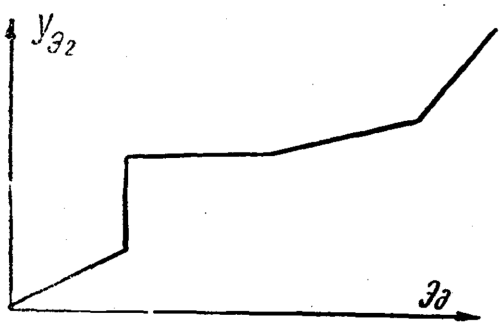
Располагая исходной информацией, приведенной выше, можно приступить к первому этапу оптимизации энерговодохозяйственного комплекса, т. е. к установлению минимальных народнохозяйственных ущербов по энергопроизводственной системе. Эти ущербы определяются на основании оптимального распределения нагрузки энергосистемы в условиях пониженной отдачи ГЭС.

Как известно, наиболее распространенным методом оптимального распределения нагрузок в энергосистеме является метод равенства относительных приростов [3, 4]. Однако этот метод может быть использован только тогда, когда зависимость расхода энергоносителя от нагрузки является непрерывной, строго выпуклой, монотонно возрастающей функцией, и поэтому реальные расходные характеристики агрегатов приходится сглаживать, устранять разрывы и т. п. Это может привести к существенным ошибкам при оптимизации режимов работы энерговодохозяйственного комплекса.

Поэтому для оптимального диспетчерского распределения нагрузки в настоящее время широко используется метод динамического программирования [5, 7, 8, 9]. Этот метод гораздо проще с точки зрения расчетного алгоритма, свободен от указанных выше недостатков, свойственных методу относительных приростов, не требует предварительной обработки исходной информации, например дифференцирования расходных (энергетических) характеристик, и легко может быть реализован при машинном счете.

Для решения поставленной задачи методом динамического программирования непосредственно используются данные натурных испытаний электромеханического оборудования, представленные в виде протабулированной зависимости расхода энергоносителя от нагрузки агрегата.





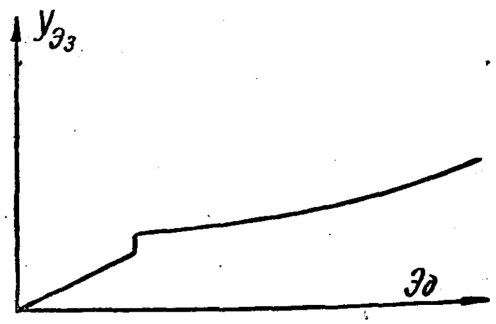
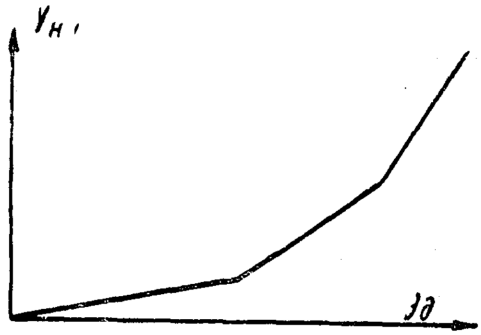
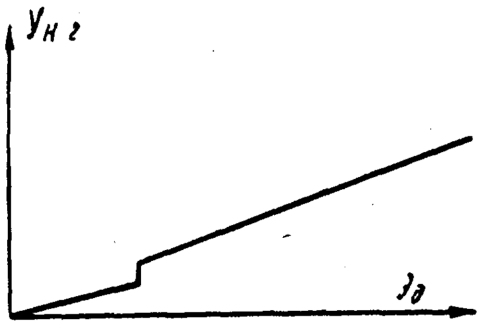


Рис. 2. Принципиальные характеристики ущербов энергетических компонентов комплекса.





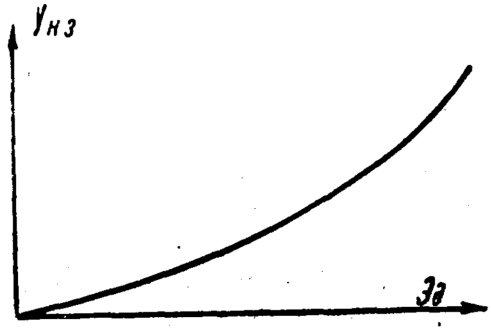


Рис. 3. Принципиальные характеристики ущербов неэнергетических компонентов комплекса.

Оптимальное распределение нагрузки энергосистемы осуществляется по схеме многошагового процесса. Первоначально оптимизируется режим работы некоторой пары агрегатов, участвующих в покрытии графика нагрузки энергосистемы. В этом случае функциональное уравнение оптимальности с учетом ограничений (6) можно записать в следующем виде:

$$F_{1,2}(B)=min[f_2(N_2)+f_1(P_c-N_2)], \quad 0 \leqslant N_2 \leqslant P_c, \tag{7}$$

где P_c — мощность энергосистемы.

N_2 — нагрузка 2-го турбоагрегата.

Поиск минимума функции (7) целесообразно производить в табличной форме (см. таблицу 1).

В верхней строке таблицы приводится нагрузка энергосистемы P_c с определенным интервалом, или, как говорят, с принятым шагом квантования. В следующей строке выписываются расходы топлива первого агрегата B_1, соответствующие этой мощности, т. е. по существу функция (4) записывается в табличной форме. Затем в первом слева столбце таблицы с тем же шагом квантования выписываются мощности второго агрегата N_2 и по диагонали соответствующие этой мощности расходы топлива B_2.

Суммируя B_1 и B_2 при всевозможных комбинациях участия N_1 и N_2 в покрытии графика нагрузки P_c, последовательно заполняются все строки таблицы.

После того как вычислена таблица 1, не составляет особого труда установить оптимальное распределение нагрузки между двумя турбоагрегатами. Для этого достаточно просмотреть каждый столбец таблицы 1 и выбрать из него наименьшее значение суммы (B_1+B_2). Результатом этой операции является таблица 2, в которой выписаны наименьшие величины суммарного расхода топлива двух турбоагрегатов при различных значениях нагрузки энергосистемы и соответствующие этим расходам нагрузки 1-го и 2-го агрегатов.

Далее выполняются аналогичные расчеты для случая, когда потребность энергосистемы удовлетворяется мощностью (выработкой) трех турбоагрегатов. В этом случае функциональное уравнение будет иметь вид:

$$F_{1,2,3}(B) = min\,[F_{1,2}(N) + f_3(P_c-N_3)], \quad 0 \leqslant N_3 \leqslant P_c. \tag{8}$$

Таким образом, решая функциональное уравнение общего вида

$$F_n(B) = min\,[g_1(N_1)+f_{n-1}(P_c-N_n)], \quad 0 \leqslant N_3 \leqslant P_c, \quad g_1(N_1) = f_1(N_1), \tag{9}$$

можно получить оптимальное распределение нагрузки между турбоагрегатами и по результатам этих расчетов построить функцию минимальных расходов топлива эквивалентной ТЭС.

$$B_{min} = B\left(\sum_{i=1}^{n} P_{Ti}\right), \tag{10}$$

где P_{Ti} — мощность i-го турбоагрегата.

Аналогичным образом может быть установлено оптимальное диспетчерское распределение нагрузки между гидроагрегатами ГЭС с водохранилищем многолетнего регулирования, по результатам которого строится эквивалентная расходная характеристика ГЭС.

Таблица 1

N_2 \ P_c	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
0	(2,5) 5,5	(4,0) 7,0	(6,0) 9,0	(8,5) 11,5	(11,0) 14,0	(13,0) 16,0	M										
5		(4,5) 7,0	8,5	10,5	13,0	15,5	17,5	M									
10			(6,3) 8,8	10,3	12,3	14,8	17,3	19,3	M								
15				(8,3) 10,8	12,4	14,3	16,8	19,3	21,3	M							
20					(10,7) 13,2	14,7	16,7	19,2	21,7	23,7	M						
25						(13,0) 15,5	17,0	19,0	21,5	24,0	26,0	M					
30							(15,3) 17,8	19,3	21,3	23,8	26,3	28,3	M				
35								(17,3) 19,8	21,4	23,3	25,8	28,3	30,3	M			
40									(19,5) 22,0	23,5	25,5	28,0	30,5	32,5	M		
45										(22,5) 25,0	26,5	28,5	31,0	33,5	35,5	M	
50											(25,0) 27,5	29,0	31,0	33,5	36,0	38,0	M

Таблица 2

P_c	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
N_1	0	5	5	5	10	10	10	10	10	10	10	15	25	25	25	25	
N_2	0	0	5	10	10	15	20	25	30	35	40	40	35	40	45	50	
B_{min}	5,5	7,0	8,5	10,3	12,3	14,3	16,7	19,0	21,3	23,3	25,5	28,0	30,3	32,5	35,5	38,0	

$$Q_{\min} = Q(\sum_{i=1}^{n} P_{гi}), \tag{11}$$

где $P_{гi}$ — единичная мощность i-го гидроагрегата, рассматриваемой ГЭС.

Затем производится наивыгоднейшее распределение нагрузки между ГЭС и эквивалентной ТЭС. Для этого ординаты расходной характеристики ГЭС умножаются на некоторый коэффициент λ, называемый неопределенным множителем Лагранжа, который подбирается итерационным путем.

Таким образом, реализация оптимального распределения нагрузки между ГЭС и эквивалентной ТЭС позволяет определить дополнительные затраты, связанные с компенсацией ущербов в энергосистеме, которые будут зависеть от величины дополнительного расхода топлива (ущербы первого вида).

$$И_э = b_i \Delta Э_т, \tag{12}$$

где $\Delta Э_т$ — дополнительная выработка ТЭС,

b_i — топливная составляющая себестоимости электроэнергии.

При более глубоких дефицитах энергии на гидроэлектростанции возникает необходимость в ограничении промышленных потребителей. Это обстоятельство, как было указано выше, сопряжено со снижением плана выпуска продукции, т. е. с дополнительными непроизводительными затратами в энергопроизводственной системе (ущербы второго вида).

Исследованию этого вопроса посвящен ряд работ [1, 6, 10, 11], на основании которых можно построить характеристики ущербов по каждому элементу энергопроизводственной системы (рис. 2).

Следует отметить, что при заданной структуре энергосистемы изменение ущербов первого вида для всех элементов системы будет одинаковым. Ущербы же от недодачи электроэнергии промышленным предприятиям по своей абсолютной величине гораздо больше, чем ущербы от дополнительного расхода топлива. Поэтому при переходе от ущербов первого вида ко второму неизбежно скачкообразное изменение указанных функций (рис. 2).

Так как структура энергопроизводственного комплекса является многокомпанентной взаимосвязанной системой, то в результате последовательного, многошагового процесса нахождения частных минимумов, на основе метода динамического программирования получим суммарную характеристику минимальных суммарных ущербов в энергопроизводственной системе при различных уровнях дефицита энергии.

$$\Sigma И_{уэ\,min} = \varphi(Э_д). \tag{13}$$

Следующим этапом расчета является оптимальное распределение заданного количества воды между отдельными компонентами НЭВ.

Допустим, что в составе ЭВХК имеется несколько неэнергетических водопользователей и водопотребителей, суммарная потребность которых в воде определяется некоторой величиной расхода

$$\sum_{i=1}^{n} Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \ldots + Q_n. \tag{14}$$

Характеристики ущербов по каждому из рассматриваемых компонентов НЭВ однозначно определяются величиной недополученного ими количества воды.

$$И_{ун1} = f_1(Q_i);\ И_{ун2} = f_2(Q_i);\ И_{унn} = f_n(Q_i). \tag{15}$$

Графическая интерпретация ущербов НЭВ приведена на рис. 3.

Располагая исходной информацией, изложенной выше (15), требу-

ется распределить суммарную величину недодачи воды между неэнергетическими компонентами комплекса так, чтобы суммарные ущербы по НЭВ в целом были минимальны. Иными словами, необходимо минимизировать функционал

$$\sum_{i=1}^{n} И_{ун}\ (Q_1,\ Q_2,\ldots,Q_n) \to min. \tag{16}$$

Причем на минимизируемую функцию (17) наложена система ограничений, которая может быть записана в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^{n} Q_n = Q_1 + Q_2 + \ldots + Q_n \tag{17}$$

$$Q_i \geqslant 0.$$

В такой постановке указанная задача также представляет собой частный случай оптимальности Р. Беллмана [2] и может быть реализована с помощью функционального уравнения общего вида:

$$F(\Sigma Q_н) = min\,[g_1(Q_i) + f_{n-1}\ (\Sigma Q_н - Q_i)] \tag{18}$$
$$Q_i \geqslant 0;\quad g_1(Q_1) = f_1(Q_1).$$

Аналогично уравнению (9) функциональное уравнение (18) решается по схеме многошагового процесса. Так, например, для минимизации ущербов двух компонентов при всех возможных $Q_1 + Q_2 = \Sigma Q_н$ используется соотношение следующего вида:

$$F_{1,2}(\Sigma Q_н) = min\,[g_1(Q_2) + f_2(\Sigma Q_н - Q_2)] \tag{19}$$
$$0 \leqslant Q_2 \leqslant Q_\Sigma$$

Затем вычисляется минимум функций $F_{1,2}$ и f_3 трех компонентов для различных значений Q_1, Q_2 и Q_3, при которых $Q_1 + Q_2 + Q_3 = \Sigma Q_н$. В этом случае функциональное уравнение будет выглядеть так:

$$F_{1,2,3}(\Sigma Q_\Sigma) = min\,[F_{1,2}\ (\Sigma Q_н) + f_3(\Sigma Q_н - Q_3)], \tag{20}$$
$$0 \leqslant Q_3 \leqslant Q_\Sigma$$

Продолжая расчет в принятом порядке, путем последовательного нахождения частных минимумов определяется суммарная характеристика минимальных ущербов для любого числа компонентов НЭВ.

Таким образом, предлагаемый метод оптимального распределения дефицита воды между компонентами НЭВ основан на достижении минимума суммарных народнохозяйственных ущербов по НЭВ.

На основании изложенной выше поэтапной оптимизации народнохозяйственных ущербов строится оптимальная стратегия использования водных ресурсов каждым компонентом энерговодохозяйственного комплекса.

На рис. 4 приводится оптимальная стратегия использования водных ресурсов тремя компонентами ЭПС (а) и тремя компонентами НЭВ (в).

На оси абсцисс откладывается ряд значений дефицита $Э_д$ в целом по ЭВХК. На оси ординат в тех же единицах измерения откладываются значения $Э_{дi}$ каждого компонента, т. е. та часть общего дефицита, которая падает на данный компонент в результате оптимального распределения суммарного дефицита. Для любого фиксированного значения $Э_д$, очевидно, должно соблюдаться условие:

$$\Sigma Э_{дi} = Э_д. \tag{21}$$

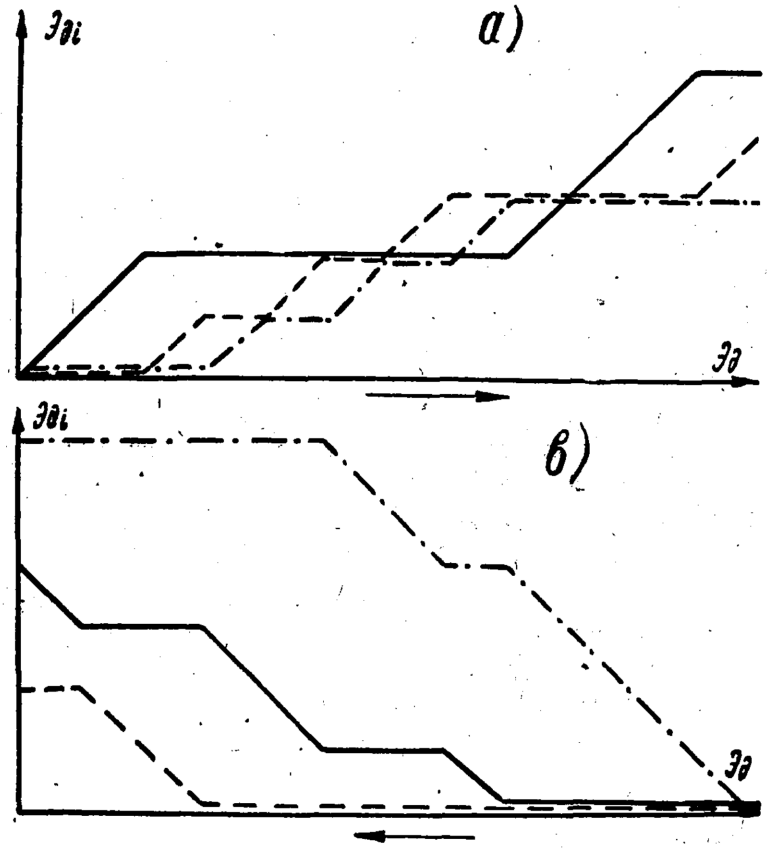


Рис. 4. Оптимальная стратегия использования водных ресурсов участниками ЭВХК.

Таким образом, располагая суммарными ущербами по энергопроизводственной системе и ущербами по НЭВ, можно определить минимум-миниморум народнохозяйственных затрат по энерговодохозяйственному комплексу в целом (рис. 5).

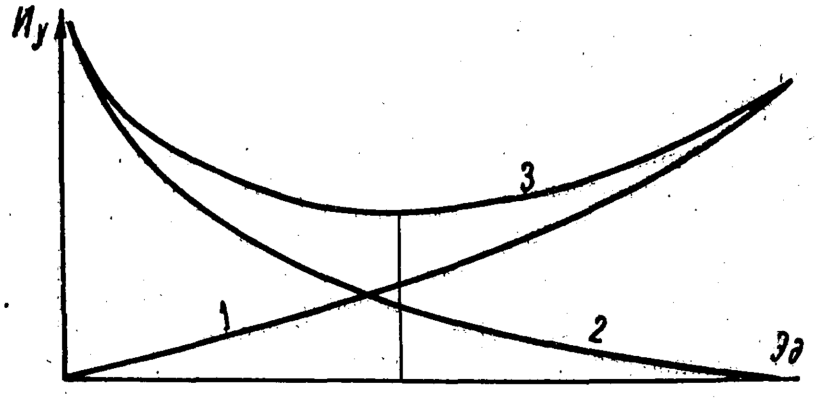


Рис. 5. Распределение дефицита по ЭВХК в целом.

Вполне понятно, что результаты оптимизации режима работы энерговодохозяйственного комплекса справедливы только для конкретной структуры ЭВХК в рассматриваемый период времени. Однако в эксплуатационной практике все элементы энерговодохозяйственного комплекса находятся в стадии непрерывного развития, меняются параметры компонентов, могут появиться новые компоненты. Некоторые исходные данные имеют вероятностный характер (стохастическая изменчивость речного стока, случайный характер выхода в аварийное состояние отдельных элементов энергосистемы и т. п.). Все это приводит к необходимости периодически, по мере изменения или уточнения исходной информации, корректировать оптимальный режим работы энерговодохозяйственного комплекса.

Резюмируя изложенное выше, следует отметить, что оптимизация режимов работы энерговодохозяйственного комплекса в общем виде является сложной многоэкстремальной задачей со многими неизвестными, имеющими между собой нелинейные взаимосвязи. Необходимо использование всевозможных энергетических водохозяйственных, экономических, комплексных режимных показателей, на которые, в свою очередь, оказывают большое влияние такие факторы, как режим сработки водохранилищ, колебания уровней нижнего бьефа, работа ГЭС в каскаде, поддержание нормального технологического процесса и т. д. В настоящей статье, естественно, не рассматриваются все аспекты проблемы, а предлагаются общие пути подхода к решению задачи с использованием метода динамического программирования. Практическая реализация поставленной задачи возможна лишь поэтапным методом, а привлечение аппарата динамического программирования как раз позволяет производить оптимизационные расчеты, охватывающие все этапы процесса, начиная с оптимизации режимов отдельных элементов (агрегатов электростанций) и кончая всем процессом в целом.

Наиболее эффективно аппарат динамического программирования может быть использован с применением современных вычислительных машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афонин Н. С. Надежность энергоснабжения промышленных предприятий. М., Госэнергоиздат, 1958.

2. Беллман Р. Динамическое программирование. М., Изд-во иностранной литературы, 1960.

3. Горнштейн В. М. К вопросу о выборе наивыгоднейшего сочетания работающих агрегатов (распределение резерва) в системе. Труды ВНИИЭ, вып. XIII, Госэнергоиздат, 1961.

4. Горнштейн В. М. Наивыгоднейшие режимы работы гидростанций в энергетических системах. М., Госэнергоиздат, 1959.

5. Журавлев В. Г., Злотник С. Г. Применение метода динамического программирования для выбора наивыгоднейшего состава работающего оборудования тепловой энергосистемы. Изд-во АН СССР. «Энергетика и транспорт», 1966, № 4.

6. Захаров В. П., Чокин Ш. Ч. Основы методики определения расчетной обеспеченности ГЭС и гидроэнергосистемы. Изд-во АН КазССР. Серия энергетическая, вып. 10, 1956.

7. Злотник С. Г., Журавлев В. Г. Оптимизация внутристанционных режимов ГЭС с учетом пусковых расходов. «Электрические станции», 1967, № 8.

8. Саркисян С. М. Выбор наивыгоднейшего режима работы ГЭС в сложной энергосистеме методом динамического программирования, сборник трудов ЕрПИ, 1964.

9. Сафаров Е. Д. Основы водохозяйственных и энергоэкономических расчетов гидроэлектрических станций. Ереван, изд-во «Айстан», 1965.

10. Чокин Ш. Ч. Расчетная обеспеченность работы гидроэлектростанций. Алма-Ата, Изд-во АН КазССР, 1958.

11. Чокин Ш. Ч. Методика определения народнохозяйственного ущерба при недодаче гидроэнергии. Проблемы регулирования речного стока, вып. 7. М., Изд-во АН СССР, 1958.

SUMMARY

The authors deal with the problem of optimization of working regime of a multipurpose power and water system under operating conditions, i. e. with a power and water system structure specified for a given period. During drought seasons, water yield of a storage reservoir decreases compared with the safe yield, which causes deficits, or insufficient water delivery to some components of the system so' disadvantageous to the M.P.P.W.S. Minimum of losses occurs under conditions of optimal regimes of utilization of water resources.

The optimality criterion is the minimum-minimorum of national economic losses on the whole of the system. To determine this minimum-minimorum, a stage method of optimization has been used involving the dynamic programming apparatus.

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
1970 *ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА* вып. 7

II. РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА

Ш. Ч. ЧОКИН, В. Я. КИМ, В. К. РЕДЬКИН

ВЛИЯНИЕ ТАКТНОСТИ РАБОТЫ ВОДОХРАНИЛИЩА НА ПАРАМЕТРЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

1. Общие положения

Общей основой расчетно-методических построений ранее опубликованных работ [8, 9, 10] являлась концепция, согласно которой годовой гидрограф характеризовался одним периодом превышения расходов воды над уровнем потребления α, т. е. режим работы водохранилища принимался однотактным. Соответственно этому, обобщенный прием расчета водохранилища длительного регулирования был применим лишь для рек подобного типа внутригодового распределения стока.

Цель данной работы на основе произведенной оценки степени влияния более сложных форм годового гидрографа показать практическую допустимость принятия в некоторых случаях расчетов длительного регулирования модели гидрографа с одним паводковым периодом.

Под однотактным режимом работы водохранилища обычно понимается цикл регулирования, который состоит из одного периода превышения и одного периода недостатка стока (по отношению к уровню регулирования α). Тактность работы водохранилища обусловливается внутригодовыми режимами стока и водопотребления. При постоянстве потребления в течение года, как это принято в настоящей работе, тактность определяется только гидрологическим режимом водотока и уровнем использования водных ресурсов α. При однотактном режиме работы расходы источника в паводковый период больше расходов воды из водохранилища. В результате этого на протяжении всего паводкового периода объем воды в водохранилище непрерывно растет, а на протяжении межени наоборот уменьшается. Но не все реки имеют такой характер стока в течение года. Все это зависит от типа питания и физико-географических условий формирования стока. Так, для рек смешанного питания (снегового и дождевого) в отдельные годы наблюдается повышение расходов воды над среднемноголетним даже в период межени. К ним относятся некоторые реки европейской части СССР (северные), Западной Сибири и Дальнего Востока (реки Тихоокеанского побережья).

То обстоятельство, что в течение года возникает несколько паводковых периодов, позволяет уменьшить полезный объем водохранилища. Появляющиеся сезонные дефициты в период между двумя повышениями расходов частично покрываются предыдущим паводком. При этом суммарный сезонный дефицит за год не будет равен сумме дефицитов меженных периодов, а будет несколько меньше. Многотактность работы водохранилища уменьшает также и объемы холостых сбросов, тем самым повышая уровень использования стока. Это объясняется тем, что избытки стока над уровнем водопотребления частично используются на покрытие дефицитов в период межени между двумя паводками.

Если в качестве математической модели стока принимается непрерывный стохастический процесс, аппроксимируемый для решения прак-

тических задач дискретным рядом (временной интервал — сезон, месяц, декада и т. д.), то тактность режима работы водохранилища при этом автоматически учитывается [3—7]. Эту же задачу, но только для сезонно-годового регулирования В. Г. Андреянов решает путем введения в алгоритм расчета дополнительных параметров внутригодового распределения стока [1, 2].

Из этих двух направлений более приемлемым для решения поставленной задачи является второе. Оно позволяет, не изменяя и не усложняя расчетного алгоритма обобщенного приема расчета всей полезной емкости, произвести оценку степени влияния тактности режима работы водохранилища на основные водохозяйственные его показатели.

Метод В. Г. Андреянова заключается в том, что учет тактности или учет распределения избытка стока над среднегодовым расходом между весенним половодьем и летне-осенними паводками осуществляется с помощью специального параметра, названного им коэффициентом восстановления дефицита или избытка.

Коэффициент восстановления дефицита определяется из выражения [1, 2]:

$$\xi_{di} = \frac{Д_{ti}}{Д_i}, \tag{1}$$

где $Д_i$ — сезонный дефицит i-го года, равный сумме дефицитов меженних периодов при одном и том же уровне среднегодового расхода,

$Д_{ti}$ — дефицит с учетом восстановления.

Аналогично подсчитывается и коэффициент восстановления избытка стока [1, 2].

$$\xi_{ui} = \frac{И_{ti}}{И_i}, \tag{2}$$

где $И_{ti}$ — избыток стока i-го года при восстановлении,

$И_i$ — суммарный избыток стока i-го года по отношению к среднегодовому расходу.

В. Г. Андреянов указанные коэффициенты выражает в относительных единицах измерения, например:

$$\xi_{di} = \frac{d_{ti}}{d_i}, \tag{1'}$$

где d_i, d_{ti} имеют тот смысл, что и $Д_i$, $Д_{ti}$, но в относительных единицах измерения (нормы или стандарта годового стока);

$$\xi_{ui} = \frac{u_{ti}}{u_i}, \tag{2'}$$

здесь u_{ti}, u_i —то же, что и $И_{ti}$, $И_i$, но в относительных единицах измерения.

Практический способ определения дефицита и избытка стока с учетом восстановления, а также коэффициентов восстановления ξ_{di} и ξ_{ui} В. Г. Андреянов [1, 2] дает для случая, когда в течение года наблюдается два периода повышенных расходов воды над среднегодовым (рис. 1). Тогда $\Delta_1 u$ и $\Delta_2 u$ представляют собой величины избытка стока над среднегодовым расходом в отдельные периоды τ_1 и τ_2, а $\Delta_1 d$ и $\Delta_2 d$—величины дефицитов. Причем:

$$d_i = \Delta_1 d + \Delta_2 d, \tag{3}$$

$$u_i = \Delta_1 u + \Delta_2 u. \tag{4}$$

Величина суммарного дефицита с учетом восстановления d_t при любом уровне расхода считается не зависящей от значения $\Delta_1 u$ и определяется только соотношением величин $\Delta_1 d$, $\Delta_2 d$ и $\Delta_2 u$.

2. Предлагаемый способ оценки тактности работы водохранилища в расчетном алгоритме

Указанный выше метод учета тактности режима работы водохранилища для рассматриваемой нами схемы регулирования стока требует введения в него некоторых дополнений.

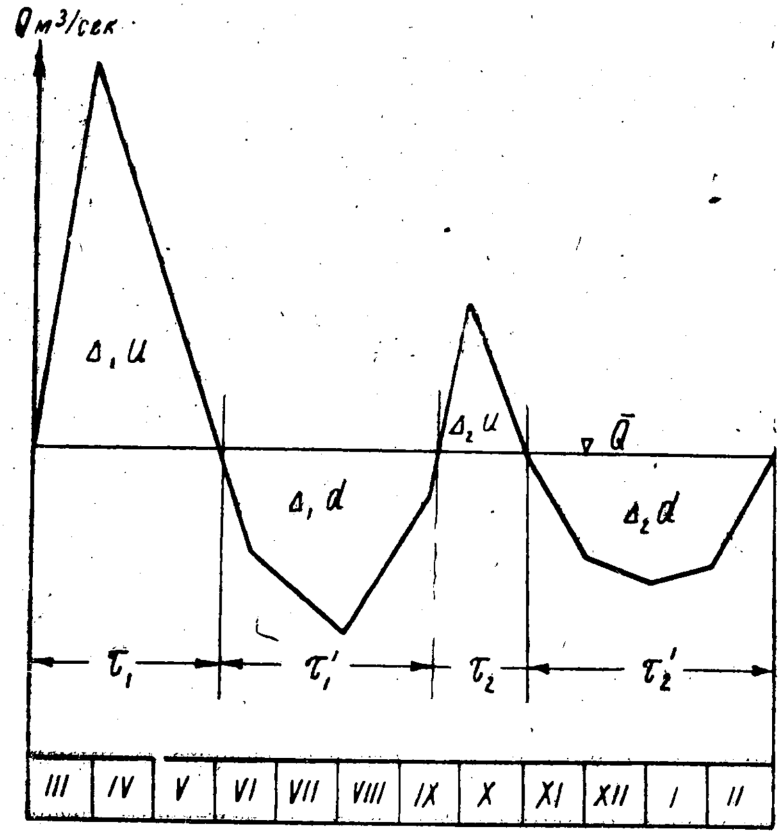


Рис. 1. Схема годового гидрографа.

При многолетнем регулировании нас интересуют не годовые коэффициенты восстановления, а их среднемноголетние значения, определенные при одном уровне использования водных ресурсов по всему гидрологическому ряду. Так как сток является по своей природе случайным, то величины годового избытка u_{ti} и дефицита стока d_{ti} также будут случайными. Характеризовать их только одним параметром, а именно коэффициентом восстановления ξ_u (или ξ_∂), по-видимому, будет не совсем правильно. Кроме коэффициентов восстановления, отражающих лишь объемные показатели годовых избытков и дефицитов, необходимо учитывать также и их многолетнюю изменчивость. Это может быть сделано с помощью отношений дисперсий указанных величин μ_u и μ_∂, а именно:

а) для избытка стока

$$\mu_u = \frac{D(u_{ti})}{D(u_t)}, \qquad (5$$

где $D(u_{ti})$ — дисперсия годового избытка стока с учетом восстановления,
$D(u_i)$ — дисперсия годового избытка стока,

б) для дефицита

$$\mu_д = \frac{D(d_{ti})}{D(d_i)}, \tag{6}$$

где $D(d_{ti})$, $D(d_i)$ — дисперсии суммарного годового дефицита стока соответственно с учетом и без учета восстановления.

Случай, когда второй избыток стока больше предшествующего дефицита, т. е. $\Delta_2 u > \Delta_1 d$, является нехарактерным, так как первый дефицит $\Delta_1 d$ будет полностью восстановлен последующим паводком $\Delta_2 u$. Другими словами, независимо от соотношения дефицитов $\Delta_1 d$ и $\Delta_2 d$ общий годовой дефицит с учетом восстановления будет равен $\Delta_2 d$.

Сезонная составляющая полезной емкости водохранилища многолетнего регулирования согласно обобщенному способу расчета определяется величиной сезонного дефицита в многоводные годы и величиной сезонного избытка в маловодные годы. Основываясь на этих предпосылках, найдем коэффициенты восстановления дефицита и избытка паводковой волны ε, а также коэффициента восстановления стандарта паводковой волны* μ:

$$\varepsilon = \frac{C_{пвt}}{C_{пв}}, \tag{7}$$

где $C_{пвt}$ — паводковая волна с учетом восстановления,
$C_{пв}$ — то же, но без восстановления.

$$\mu = \frac{k_{ct}}{k_c}. \tag{8}$$

Здесь k_{ct} — стандарт паводковой волны с учетом восстановления в единицах стандарта годового стока,
k_c — то же, но без восстановления.

Схему определения этих коэффициентов примем ту же, что и у В. Г. Андреянова, т. е. будем рассматривать гидрограф, имеющий в течение года два паводка.

В зависимости от соотношения первого меженного дефицита $\Delta_1 d$ и последующего избытка стока $\Delta_2 u$ возможны следующие два случая:

Первый случай — $\Delta_2 u < \Delta_1 d$.

Величина $\Delta_1 d$ уже представляет собой дефицит отдачи из водохранилища, так как рассечка гидрологического ряда производится по уровню использования водных ресурсов α, а не по среднегодовому или среднемноголетнему расходу.

Считаем, что на конец первого паводкового периода сезонная составляющая емкости водохранилища заполнена полностью. За время последующей межени емкость водохранилища срабатывается на некоторую величину, которая не будет восстановлена вторым паводком ввиду $\Delta_2 u < \Delta_1 d$.

Так как сезонная составляющая к концу второго паводка не будет восстановлена, то в i-м году возникает дефицит отдачи с учетом восстановления, равный

$$d_{ti} = (\Delta_{1i} d - \Delta_{2i} u) + \Delta_{2i} d. \tag{9}$$

* Под паводковой волной понимается избыток стока над уровнем потребления.

Математическое ожидание сезонного дефицита отдачи будет равно

$$M(d_t) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} d_{ti} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[(\Delta_{1i}d - \Delta_{2i}u) + \Delta_{2i}d], \qquad (9')$$

где n — число лет гидрологического ряда.

Аналогично

$$M(d) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} d_i = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\Delta_{1i}d + \Delta_{2i}d).$$

Тогда коэффициент восстановления дефицита будет равен

$$\varphi = \frac{M(d_t)}{M(d)} = 1 - \sum_{i=1}^{n}\frac{\Delta_{2i}u}{d_i}. \qquad (10)$$

Обозначим через λ отношение дисперсий дефицитов отдачи с учетом и без учета их восстановления. Тогда:

$$\lambda = \frac{D(d_t)}{D(d)} = \frac{M[d_{ti} - M(\Delta_{1i}d - \Delta_{2i}u + \Delta_{2i}d)]}{M[d_i - M(d_i)]}, \qquad (11)$$

где M — символ математического ожидания.

Ввиду того, что второй паводок полностью идет на восстановление дефицита отдачи $\Delta_1 d$, то паводковая волна с учетом восстановления в i-м году будет определяться следующим образом:

$$u_{ti} = \Delta_{1i}u = u_i - \Delta_{2i}u. \qquad (12)$$

Математическое ожидание объема паводковой волны с учетом восстановления будет

$$M(u_t) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} u_{ti} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(u_i - \Delta_{2i}u). \qquad (12')$$

Соответственно коэффициент восстановления паводковой волны

$$\varepsilon = 1 - \sum_{i=1}^{n}\frac{\Delta_{2i}u}{u_i}. \qquad (13)$$

Коэффициент восстановления стандарта паводковой волны в этом случае будет определяться по выражению:

$$\mu = \frac{M[u_{ti} - M(u_i - \Delta_{2i}u)]}{M[u_i - M(u_i)]}, \qquad (14)$$

где M — знак математического ожидания случайной величины.

Второй случай — $\Delta_2 u > \Delta_1 d$.

Как и раньше, считаем, что перед началом первой межени водохранилище полностью заполнено. Объем, срабатываемый в период первой межени, восстанавливается вторым паводком. Кроме того, в период второго паводка происходит холостой сброс из водохранилища, равный $\Delta_2 u - \Delta_1 d$. Сезонный дефицит отдачи в i-м году с учетом восстановления будет

$$d_{ti} = \Delta_{2i}d = d_i - \Delta_{1i}d,$$

а многолетний дефицит

$$M(d_t) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} d_{ti} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(d_i - \Delta_{1i}d). \qquad (9'')$$

Коэффициент восстановления дефицита отдачи определяется по формуле:

$$\varphi = 1 - \sum_{i=1}^{n}\frac{\Delta_{1i}d}{d_i}. \qquad (10)$$

Показатель λ при этом будет

$$\lambda = \frac{D(d_t)}{D(d)} = \frac{M[d_{ti} - M(d_i - \Delta_{1i} d)]}{M[d_i - M(d_i)]}. \qquad (11')$$

Суммарная паводковая волна с учетом восстановления в i-м году в этом случае будет равна

$$u_{ti} = \Delta_{1i} u + (\Delta_{2i} u - \Delta_{1i} d).$$

Математическое ожидание объема паводковой волны находится из выражения

$$M(u_t) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} u_{ti} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} [\Delta_{1i} u + (\Delta_{2i} u - \Delta_{1i} d)]. \qquad (12'')$$

Среднемноголетнее значение паводковой волны равно

$$M(u) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} u_i = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} (\Delta_{1i} u + \Delta_{2i} u).$$

Следовательно, коэффициент восстановления паводковой волны надо находить по формуле

$$\varepsilon = 1 - \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta_{1i} d}{u_i}. \qquad (13')$$

Выражение для определения коэффициента восстановления стандарта паводковой волны будет иметь вид:

$$\mu = \frac{D(u_t)}{D(u)} = \frac{M[u_{ti} - M(u_{ti})]}{M[u_i - M(u_i)]}. \qquad (14')$$

Эта схема в принципе может быть распространена на любое количество паводковых периодов в году.

В соответствии с полученными выше формулами были подсчитаны коэффициенты восстановления по фактическим гидрологическим рядам для двадцати пяти рек при отдаче водохранилища, равной норме годового стока. Все результаты подсчета представлены в таблице 1.

Как видно, коэффициенты восстановления паводковой волны ε и дефицита отдачи φ имеют примерно одинаковые значения. Значения коэффициента восстановления паводковой волны ε изменяются от 0,70 до 0,99, т. е. он меньше единицы. Это свидетельствует о том, что учет тактности работы водохранилища уменьшает объем паводковой волны, участвующей в регулировании. Другой коэффициент — коэффициент восстановления стандарта паводковой волны μ имеет пределы изменения от 0,84 до 1,09. Средневзвешенное значение его равно 0,99, т. е. он близок к единице.

3. Рекуррентные формулы расчетных водоносностей с учетом коэффициентов восстановления

С учетом параметров внутригодового распределения стока ε и μ выведены рекуррентные формулы для расчетных водоносностей.

Уравнение регрессии при однотактном режиме работы водохранилища имеет вид [9]:

$$C_{пв} = \bar{C}_{пв} + r k_c \Phi_w + \sqrt{1 - r^2}\, k_c \Phi_{пв}, \qquad (15)$$

где $\bar{C}_{пв}$, $C_{пв}$ — норма и текущее значение паводковой волны,

r — коэффициент корреляции между паводковой волной и годовым стоком;

Φ_w, $\Phi_{пв}$ — нормированные отклонения от норм соответственно годового стока и паводковой волны.

Таблица 1

№ п.п.	Река, пункт наблюдения	Период наблюдения	Число лет, n	Коэффициенты восстановления		
				φ	ε	μ
1	2	3	4	5	6	7
1	Амур, с. Покровка	1901—1950	49	0,991	0,992	1,09
2	Белая, г. Уфа	1878—1941	63	0,993	0,995	1,00
3	Березина, г. Бобруйск	1881—1958	40	0,949	0,994	0,98
4	Бурея, с. Николаевка	1911—1958	40	0,977	0,966	1,02
5	Волга, г. Ярославль	1877—1914	37	0,957	0,976	0,94
6	Волга, г. Горький	1877—1950	63	0,992	0,984	0,97
7	Вятка, г. Киров	1878—1959	71	0,968	0,983	0,99
8	Вишера, с. Митракова	1902—1959	49	0,973	0,969	1,01
9	Вычегда, г. Сыктывкар	1924—1958	34	0,967	0,986	1,01
10	Десна, г. Чернигов	1894—1959	63	0,994	0,914	0,99
11	Днестр, г. Бендеры	1881—1959	48	0,953	0,955	1,00
12	Зап. Двина, г. Витебск	1871—1957	74	0,941	0,947	0,96
13	Зея, г. Зея	1901—1954	52	0,990	0,993	1,00
14	Кама, г. Пермь	1881—1952	71	0,988	0,985	1,01
15	Молога, г. Весьегонск	1883—1935	52	0,940	0,937	1,04
16	Нарва, пр. Кулгу	1903—1954	45	0,961	0,960	1,01
17	Печора, с. Троицк-Печора	1915—1958	39	0,954	0,986	1,09
18	Припять, г. Мозырь	1882—1958	67	0,976	0,979	1,09
19	Сожь, г. Гомель	1900—1939	39	0,943	0,992	0,99
20	Сясь, г. Яхнова	1920—1959	37	0,890	0,718	0,84
21	Сухона, д. Камчуга	1880—1935	53	0,966	0,967	1,03
22	Сев. Двина, с. Усть-Пинега	1882—1935	53	0,970	0,974	0,94
23	Тихвинка, д. Горелуха	1882—1959	72	0,875	0,707	0,91
24	Томь, г. Новокузнецк	1894—1952	56	0,980	0,963	1,06
25	Уфа, г. Караидель	1913—1959	46	0,994	0,966	0,90

Введем в это уравнение параметры ε и μ. Тогда:

$$C_{\text{пв}t} = \varepsilon(C_{\text{пв}} + r\mu k_c \Phi_w + \sqrt{1-r^2}\,\mu k_c \Phi_{\text{пв}}). \qquad (16)$$

При $r=1$, т. е. при наличии функциональной зависимости это выражение обратится в следующее:

$$C_{\text{пв}t} = \varepsilon(\overline{C}_{\text{пв}} + \mu k_c \Phi_w). \qquad (16')$$

Применяя способ, изложенный в работе [9], запишем регрессионное уравнение (16) в такой форме:

$$C_{\text{пв}t} = \varepsilon \overline{C}_{\text{пв}} + \sigma_1 \Phi_1, \qquad (17)$$

где $\sigma_1 = \varepsilon\mu\kappa_c$.

При значениях коэффициентов ε и μ, равных единице, соотношение (17) вырождается в (15), которое было получено при однотактном режиме работы водохранилища [8, 9, 10].

Получение рекуррентных формул по определению расчетных водоносностей, как и раньше, основывается на уравнении годового баланса водохранилища.

$$x = y + \Phi_w - \alpha - x_c + x_\partial, \qquad (18)$$

где y — наполнение водохранилища на начало i-го года регулирования, x — то же, но на конец i-го года;

x_c, x_∂ — соответственно величины холостого сброса и дефицита отдачи.

Схема вывода искомых рекуррентных формул та же, что и при одно-

тактном режиме работы [8, 9, 10]. Поэтому, опуская все промежуточные выкладки, покажем окончательный вид выражений для всех режимных областей.

а) режимная область наполнения

В первой зоне:

$$\Phi_{1н} = \frac{x - y + \alpha}{\sigma_1 + \sigma_2'}, \tag{19}$$

где $\sigma_2 = \sqrt{1 - 2r\varepsilon\mu k_c + (\varepsilon\mu k_c)^2}$. (20)

Если в последнем выражении величины μ и ε будут равны единице, то

$$\sigma_2 = \sqrt{1 - 2r k_c + k_c^2}. \tag{20'}$$

Если перейти к функциональной зависимости между величинами паводковой волны и годового стока, то

$$\sigma_2 = 1 - \varepsilon\mu k_c. \tag{20''}$$

Во второй расчетной зоне водоносность определяется по такой формуле:

$$\Phi_{2н} = \frac{\alpha + \varepsilon\overline{C}_{пв} - \beta + x}{\sigma_2}, \tag{21}$$

где σ_2 определяется выражением (20).

Линия раздела этих двух зон определяется следующим уравнением:

$$x = \left(1 + \frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)(\beta - \varepsilon\overline{C}_{пв}) - \alpha - \frac{\sigma_2}{\sigma_1} y. \tag{22}$$

б) дефицитный режим

Расчетная водоносность в третьей зоне с учетом тактности работы водохранилища находится по следующей формуле:

$$\Phi_{1д} = \frac{\alpha - y - x_д}{\sigma_1 + \sigma_2}. \tag{23}$$

При функциональной зависимости между паводковой волной и годовым стоком последнее равенство примет вид

$$\Phi_{1д} = \alpha - y - x_д, \tag{23'}$$

так как $\sigma_1 + \sigma_2 = \varepsilon\mu k_c + (1 - \varepsilon\mu k_c) = 1$.

Для определения расчетной водоносности в четвертой зоне служит формула

$$\Phi_{2д} = \frac{\alpha + \varepsilon\overline{C}_{пв} - \beta - x_д}{\sigma_2}. \tag{24}$$

Если между величинами паводковой волны и годового стока существует функциональная зависимость, то выражение (24) преобразуется в следующее:

$$\Phi_{2д} = \frac{\alpha + \varepsilon\overline{C}_{пв} - \beta - x_д}{1 - \varepsilon\mu k_c}. \tag{24'}$$

Уравнение линии, разграничивающей две зоны данного режима работы, имеет вид

$$x_д = \alpha - \left(1 + \frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)(\beta - \varepsilon\overline{C}_{пв}) + \frac{\sigma_2}{\sigma_1} y. \tag{25}$$

в) избыточный режим

В пятой зоне расчетная водоносность находится по следующей рекуррентной формуле:

$$\Phi_{1c} = \frac{\alpha + \beta + x_c - y}{\sigma_1 + \sigma_2}. \tag{26}$$

Из нее можно получить формулу при любом характере режима работы и при других начальных условиях. Например, при наличии внутригодовой функциональной зависимости выражение (26) преобразуется в следующее:

$$\Phi_{1c} = \alpha + \beta + x_c - y. \tag{26'}$$

Расчетная водоносность в шестой с учетом тактности работы будет определяться по следующему равенству:

$$\Phi_{2c} = \frac{\beta - \varepsilon\overline{C}_{\text{пв}} - y + x_c}{\sigma_1}, \tag{27}$$

где σ_1 равно $\varepsilon\mu k_c$.

Линия, разграничивающая избыточную область работы водохранилища на две зоны, определяется следующим уравнением:

$$x_c = \frac{\varepsilon\overline{C}_{\text{пв}}(\sigma_1 + \sigma_2) + \alpha\sigma_1}{\sigma_2} - (\beta - y). \tag{28}$$

Как видно, учет тактности работы водохранилища по методу В. Г. Андреянова свелся к введению в расчетный алгоритм двух дополнительных параметров внутригодового распределения (ε и μ). Эти параметры несколько усложняют вид рекуррентных формул по определению расчетных водоносностей, хотя структура их осталась прежней.

4. Примеры расчетов

Основой обобщенного приема расчета всей полезной емкости водохранилища многолетнего регулирования стока является формула полной вероятности

$$P(z) = (s)\int_{\alpha}^{\beta} P(z/y)\,dP(y). \tag{29}$$

Данный интеграл понимается в смысле Стилтьеса.

Эта формула (29) сводит решение задачи по определению обобщенной водохозяйственной характеристики водохранилища к системам интегральных уравнений и соотношений [11] или же решается в конечных разностях [8—10].

Для оценки степени влияния тактности работы водохранилища на кривую обеспеченности наполнений, а также и на другие частные кривые были проведены расчеты при ряде значений параметров регулирования и стока. Для расчетов приняты следующие коэффициенты восстановления нормы и стандарта паводковой волны:

$$\varepsilon = 1{,}0 \text{ и } 0{,}90; \quad \mu = 0{,}95 \text{ и } 1{,}0.$$

В качестве исходной кривой распределения годового стока взята кривая Пирсона III типа:

$$F(k) = 1 - \frac{\gamma^{\gamma}}{\Gamma(\gamma)}\int_{0}^{k} k^{\gamma-1} e^{-\gamma k}\,dk, \tag{30}$$

где γ — параметр, равный $4 : C_s^2$.

Подсчеты производились при двух значениях коэффициента асимметрии C_s: 0,5 и 1,0.

Исходными данными являлись параметры регулирования: полезная емкость водохранилища β и отдача α, а также параметры паводковой волны: норма $\overline{C}_{пв}$ и ее стандарт κ_c. Расчеты производились при $\beta=1{,}0$; $\beta=2{,}0$; $\overline{C}_{пв}=1{,}07$ и $\overline{C}_{пв}=0{,}80$; $\kappa_c=0{,}80$ и $\alpha=0$.

При этих же значениях параметров регулирования и стока были сделаны расчеты по построению обобщенной водохозяйственной характеристики при однотактном режиме работы водохранилища [9, 10].

Полученные результаты явились основой для сопоставления их с данными расчетов, выполненных при многотактном режиме работы водохранилища.

Обобщенная водохозяйственная характеристика с учетом тактности работы водохранилища отражает:

а) учет только одного коэффициента восстановления ε,

б) то же, но только μ,

в) совместный учет коэффициентов восстановления паводковой волны ε и ее стандарта μ.

Для каждого из этих случаев принимались различные параметры регулирования и стока.

Результаты этих расчетов сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Влияние тактности работы водохранилища на параметры регулирования

	$\overline{C}_{пв}$	K_c	Значение параметров регулирования				
			$\theta_l(o)=1-P_l(o)$ $l=1,\ldots,4$	$\theta_l(o)-\theta_l(o)$ $(l=2,3,4)$	$E_l(x_\partial)$ $(l=\ldots,4)$	$E_l(x_c)$ $(l=1,\ldots,4)$	$\Delta=E_l(x_\partial)-E_l(x_c)$ $(l=1,\ldots,4)$
1	2	3	4	5	6	7	8
					для $\beta=1{,}0$,	$C_s=1{,}0$	
1	0,80	0,80	0,5054	—	0,3124	0,3144	0,64
2	0,72	0,80	0,5209	1,55	0,2966	0,3046	2,70
3	0,80	0,76	0,5103	0,49	0,3061	0,3060	0,03
4	0,72	0,76	0,5268	2,14	0,2918	0,2854	2,19
					для $\beta=2{,}0$,	$C_s=0{,}5$	
1	1,07	0,80	0,6626	—	0,2250	0,2300	2,82
2	0,96	0,80	0,6836	2,10	0,2056	0,2159	5
3	1,07	0,76	0,6684	0,58	0,2163	0,2159	1,85
4	0,96	0,76	0,6827	2,01	0,2069	0,2080	5,32
					для $\beta=2{,}0$,	$C_s=1{,}0$	
1	0,80	0,80	0,6778	—	0,2030	0,2026	0,20
2	0,72	0,80	0,6862	1,04	0,1868	0,1944	4,07
3	0,80	0,76	0,6817	0,39	0,1904	0,1826	4,20
4	0,72	0,76	0,6913	1,35	0,1850	0,1864	0,76

Учет тактности режима работы водохранилища, как это следует из таблицы 2, приводит к следующим выводам:

а) обеспеченность нулевого наполнения увеличивается примерно на 1—2 процента. Соответственно этому несколько уменьшается величина дефицита отдачи водохранилища,

б) математическое ожидание объема холостого сброса уменьшается,

в) степень влияния коэффициента восстановления паводковой волны ε на основные режимные характеристики водохранилища больше, чем коэффициента μ,

г) как правило, совместный учет коэффициентов восстановления ε и μ не превышает степени влияния одного коэффициента ε. Из этого следует, что значениями $\mu < 1{,}0$ в расчетах можно пренебречь.

д) в некоторых случаях уточнения, вносимые коэффициентами восстановления ε и μ, получаются примерно одного порядка погрешности расчетов.

Таким образом, влияние тактности работы водохранилища на основные показатели его обобщенной водохозяйственной характеристики в некоторых случаях регулирования незначительно. Поэтому в расчетах, имеющих предварительный характер, многотактность режима работы водохранилища может и не учитываться.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреянов В. Г. Обобщенный метод расчета сезонного регулирования стока. Труды ГГИ, вып. 43 (97). Л., 1954.

2. Андреянов В. Г. Внутригодовое распределение стока. Л., Гидрометеоиздат, 1960.

3. Захаров В. П., Ким В. Я. Непрерывная периодичность гидрологического процесса как методическая основа водохозяйственных расчетов. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 1. Алма-Ата, изд-во АН КазССР, 1963.

4. Картвелишвили Н. А. Теория вероятностных процессов в гидрологии и регулировании речного стока. Л., Гидрометеоиздат, 1967.

5. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. Водохозяйственные расчеты. Л., Гидрометеоиздат, 1952.

6. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. Расчет многолетнего регулирования речного стока с учетом коррелятивной связи между стоком смежных лет. Проблемы регулирования речного стока, вып. 8. Изд-во АН СССР, 1959.

7. Мониава А. Я. Параллельная работа ГЭС многолетнего и сезонного регулирования. Труды института энергетики АН ГССР, т. XV, 1961.

8. Чокин Ш. Ч. Комбинированная методика расчета регулирования стока. Труды совещания по изучению стока, регулированию стока и зимнему режиму (тезисы). Изд-во АН СССР, 1954.

9. Чокин Ш. Ч., Редькин В. К. Обобщенный метод расчета регулирования стока при однотактном режиме работы водохранилища. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 4. Алма-Ата, «Наука», 1966.

10. Чокин Ш. Ч. Комбинированная методика расчета регулирования при однотактном режиме работы водохранилища. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 6. Алма-Ата, «Наука», 1968.

11. Чокин Ш. Ч., Редькин В. К. Аналитическая интерпретация обобщенного расчета водохранилища многолетнего регулирования стока. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 4. Алма-Ата, «Наука», 1967.

SUMMARY

The paper deals with methods of the long-term stream flow control, when annual discharge hydrograph has two floods.

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
1970 *ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА* вып. 7

С. К. ДАВЛЕТГАЛИЕВ

РЕЖИМ ПРЕДПОЛОВОДНОЙ СРАБОТКИ ВОДОХРАНИЛИЩА

В статье рассматриваются вопросы выбора глубины и даты завершения предполоводной сработки водохранилища длительного регулирования стока с учетом прогноза времени наступления половодья и его объема.

Располагая однозначным прогнозом, мы имели бы возможность срабатывать водохранилище к моменту начала половодья наивыгоднейшим образом. Однако прогнозирование стока возможно лишь в вероятностной форме (в виде условной функции распределения). Поэтому предполоводная сработка водохранилища, вообще говоря, может намечаться самым различным образом. Каждому варианту сработки, очевидно, будет отвечать вполне определенное значение потерь энергии (или воды).

Недостаточная сработка водохранилища перед ранним и многоводным половодьем приводит к холостому сбросу воды. Может она вызывать и другие отрицательные последствия. Наоборот, ранняя и глубокая сработка при позднем начале половодья может нарушить гарантированный режим водоподачи (например, для ГЭС). При этом, если водность окажется меньше ожидаемой, то возможны не только дополнительные потери энергии на ГЭС, вследствие снижения напора, но и незаполнение водохранилища до нормального подпертого горизонта (НПГ) к концу половодья, что также будет приводить к потерям энергии или воды в период последующей его сработки *. Помимо этого увеличится вероятность перебоев гарантированной водоподачи, т. е. ущербов у потребителя.

Для наивыгоднейшего предполоводного режима сработки водохранилища необходимо оценивать последствия реализации всех возможных его вариантов. Вариант, дающий минимум математического ожидания дополнительных издержек, очевидно, будет оптимальным.

1. Принятая методика решения

Решение задачи, по существу, сводится к выбору наилучшего действия в условиях стохастической неопределенности (или при риске). Принятие того или иного решения в подобных ситуациях рассматривается в теории игр и статистических решений [13, 19].

Пусть нам заданы дискретные множества величин $B_1, B_2, \ldots, B_i, \ldots, B_n$ (в терминах теории игр — «состояний природы») и возможных действий $A_1, A_2, \ldots, A_i, \ldots, A_n$. Кроме того, будем считать известными вероятности состояний $B_1, B_2, \ldots, B_i, \ldots, B_n$, которые равны соответственно $P_1, P_2, \ldots, P_j, \ldots, P_n$,

где $\sum_{j=1}^{n} P_j = 1$ и $0 \leqslant P_j \leqslant 1$, (1)

* Незаполнение водохранилища в случае сезонного регулирования будет иметь место лишь в маловодные годы, т. е. за пределами расчетной обеспеченности.

Каждому значению B_i и действию будет соответствовать определенная величина издержек u_{ij}. Для множеств B и A может быть составлена таблица или матрица издержек $[u_{ij}]$ (платежная матрица) вида:

A \ B	B_1	B_2	. . .	B_j	. . .	B_n
A	P_1	P_2	. . .	P_j	. . .	P_n
A_1	u_{11}	u_{12}	. . .	u_{1j}	. . .	u_{1n}
A_2	u_{21}	u_{22}	. . .	u_{2j}	. . .	u_{2n}
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
A_i	u_{i1}	u_{i2}	. . .	u_{ij}	. . .	u_{in}
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
A_r	u_{r1}	u_{r2}	. . .	u_{rj}	. . .	u_{rn}

Для каждого действия (варианта) можно вычислить математическое ожидание издержек

$$МИ_i = \sum_{j=1}^{n} P_j u_{ij}. \qquad (2)$$

Действие A_i, отвечающее минимуму выражения (2), дает оптимальное решение задачи при данном распределении вероятностей прогнозируемой величины B.

Минимальную величину издержек каждой строки матрицы можно рассматривать как неизбежные потери, определяемые состоянием B_j. Это позволяет рассматривать каждое значение издержек матрицы (1) как сумму неизбежных и дополнительных потерь, обусловленных незнанием действительного значения B_j. Вычитая неизбежные потери из соответствующих значений полных потерь, можно получить матрицу дополнительных издержек (или последствий принятия ошибочного решения) *. Для этой цели применяется формула вида

$$\Delta u_{ij} = u_{ij} - \min_j u_{ij}, \qquad (3)$$

где $\min_j u_{ij}$ —минимальная величина издержек j—столбца. Матрица дополнительных издержек $[\Delta u_{ij}]$ по виду подобна матрице $[u_{ij}]$ (4).

Математическое ожидание дополнительных издержек определяется по выражению, аналогичному (2).

$$МДИ_i = \sum_{j=1}^{n} P_j \Delta u_{ij}. \qquad (5)$$

Минимумы выражений (1) и (5) достигаются при одном и том же действии A_i. Матрица (4) предпочтительней (1) в том отношении, что

* В математической литературе она также называется матрицей «сожаления», «риска» или «альтернативных потерь».

B / A	B_1	B_2	. . .	B_j	. . .	B_n
	P_1	P_2	. . .	P_j	. . .	P_n
A_1	Δu_{11}	Δu_{12}	. . .	Δu_{1j}	. . .	Δu_{1n}
A_2	Δu_{21}	Δu_{22}	. . .	Δu_{2j}	. . .	Δu_{2n}
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
A_i	Δu_{i1}	Δu_{i2}	. . .	Δu_{ij}	. . .	Δu_{in}
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
A_r	Δu_{r1}	Δu_{r2}	. . .	Δu_{rj}	. . .	Δu_{rn}

(4)

она определяет дополнительные издержки, вызванные вероятностным характером прогноза.

При использовании прогноза удобно иметь дело с квадратной матрицей, построенной таким образом, чтобы каждому значению случайной величины соответствовало одно оптимальное действие, т. е. действия $A_1, A_2, \ldots, A_i, \ldots, A_r$ являются оптимальными для соответствующих им состояний $B_1, B_2, \ldots, B_j, \ldots, B_n$.

Оптимальные действия могут быть определены на основе детерминированных расчетов. При таком подходе элементы квадратной матрицы, расположенные по главной диагонали, будут равны нулю, либо решение для A_i, соответствующее состоянию B_j, не будет ошибочным. Если бы мы знали, что будет иметь место «состояние» B_1, то приняли бы действие A_1. Однако вследствие вероятностного прогноза мы не знаем точно, каким в действительности будет значение B_j. Если бы мы приняли действие A_1, а фактически будет наблюдаться состояние B_2 (или $B_3, \ldots,$ или B_n), то это вызвало бы определенные дополнительные потери, которые соответственно будут $\Delta u_{12}, \Delta u_{13}, \ldots, \Delta u_{1n}$.

Элементы остальных строк матрицы также определяются путем сопоставления последствий принятого решения с тем, которое мы приняли бы в случае точного знания случайной величины B.

Такой подход к построению матрицы не только дает возможность принять решение, минимизирующее математическое ожидание ошибок нашего действия, обусловленного вероятностной формой прогноза, но и автоматически определить так называемую расчетную величину прогнозируемого элемента и вероятность его осуществления.

Применительно к рассматриваемой задаче строки матрицы, т. е. действия (или решения), будут соответствовать различным сочетаниям дат начала половодья ($j=1, 2, \ldots, J$) и глубин предполоводной сработки водохранилища Z_i ($j=1, 2, \ldots, K$). Столбцы же матрицы при этом будут отвечать возможным сочетаниям дат начала половодья и его объема W_j ($j=1, 2, \ldots, K$). Такая матрица, например, при $J=3$ и $K=3$ записывается в следующем виде:

Действия			Состояния		
			W_1	W_2	W_3
			t_1 t_2 t_3	t_1 t_2 t_3	t_1 t_2 t_3
	Z_1	t_1	Δu_{11} Δu_{12} Δu_{13}	Δu_{14} Δu_{15} Δu_{16}	Δu_{17} Δu_{18} Δu_{19}
		t_2	Δu_{21} Δu_{22} Δu_{23}	Δu_{24} Δu_{25} Δu_{26}	Δu_{27} Δu_{28} Δu_{29}
		t_3	Δu_{31} Δu_{32} Δu_{33}	Δu_{34} Δu_{35} Δu_{36}	Δu_{37} Δu_{38} Δu_{39}
	Z_2	t_1	Δu_{41} Δu_{42} Δu_{43}	Δu_{44} Δu_{45} Δu_{46}	Δu_{47} Δu_{48} Δu_{49}
		t_2	Δu_{51} Δu_{52} Δu_{53}	Δu_{54} Δu_{55} Δu_{56}	Δu_{57} Δu_{58} Δu_{59}
		t_3	Δu_{61} Δu_{62} Δu_{63}	Δu_{64} Δu_{65} Δu_{66}	Δu_{67} Δu_{68} Δu_{69}
	Z_3	t_1	Δu_{71} Δu_{72} Δu_{73}	Δu_{74} Δu_{75} Δu_{76}	Δu_{77} Δu_{78} Δu_{79}
		t_2	Δu_{81} Δu_{82} Δu_{83}	Δu_{84} Δu_{85} Δu_{86}	Δu_{87} Δu_{88} Δu_{89}
		t_3	Δu_{91} Δu_{92} Δu_{93}	Δu_{94} Δu_{95} Δu_{96}	Δu_{97} Δu_{98} Δu_{99}

(6)

Матрицу (6) можно рассматривать как сложную матрицу, элементами которой служат клетки, отражающие всевозможные комбинации t с фиксированными значениями Z_j и W_j, например, при $j=2$ она представляется в виде следующей подматрицы:

$$\Delta u^t{}_{22}(Z_2\ W_2) = \begin{bmatrix} \Delta u_{44} & \Delta u_{45} & \Delta u_{46} \\ \Delta u_{54} & \Delta u_{55} & \Delta u_{56} \\ \Delta u_{64} & \Delta u_{65} & \Delta u_{66} \end{bmatrix} \tag{7}$$

Следовательно, матрица (6) может быть записана в сокращенной форме

$$\begin{bmatrix} \Delta u^t{}_{11}(Z_1\ W_1) & \Delta u^t{}_{12}(Z_1\ W_2) & \Delta u^t{}_{13}(Z_1\ W_3) \\ \Delta u^t{}_{21}(Z_2\ W_1) & \Delta u^t{}_{22}(Z_2\ W_2) & \Delta u^t{}_{23}(Z_2\ W_3) \\ \Delta u^t{}_{31}(Z_3\ W_1) & \Delta u^t{}_{32}(Z_3\ W_2) & \Delta u^t{}_{33}(Z_3\ W_3) \end{bmatrix} \tag{8}$$

2. Расчетная схема для одного водохранилища

Допустим, что оптимальная глубина предполоводной сработки водохранилища является заданной. К началу половодья в водохранилище сохраняется лишь объем воды, необходимый для поддержания минимальных требований водопотребителей и водопользователей в нижнем бьефе на случай запаздывания половодья. При этом в каждом интервале времени j из водохранилища будет расходоваться определенный объем воды, эквивалентный следующему количеству энергии

$$\Delta Э_{j\text{гар}} = 9{,}81\,\eta H_j (Q_{\text{гар}} - Q_{j\text{быт}})\tau, \tag{9}$$

где η — средний кпд ГЭС,

H_j — средний напор ГЭС в интервале j,

$Q_{\text{гар}}$ — минимально необходимый расход ГЭС, при котором не ограничиваются требования водопотребителей и водопользователей в нижнем бьефе, $Q_{j\text{быт}}$ — наиболее вероятный расход воды в интервале j.

Если фактическое время начала половодья t_j будет более ранним, чем принятый расчетный интервал t_s ($t_j < t_s$), то в этом случае возможен дополнительный холостой сброс из водохранилища за счет недоиспользованного объема воды в период между указанными интервалами *. Увеличение издержек по энергосистеме, вызванное перерасходом топлива, при этом составит:

$$\Delta И_{х.с\,tj} = b \sum_{j=1}^{s-1} \Delta Э_{j\text{гар}} \qquad (j < s), \tag{10}$$

где b — средний относительный прирост стоимости расхода топлива (*руб/квт-ч*).

Если же половодье в действительности начнется позже, т. е. $t_j > t_s$ то в этом случае дополнительные издержки, обусловленные принятием в расчетах ошибочного решения, могут быть оценены различными способами.

Обычно, чтобы предотвратить ущербы от дефицита энергоснабжения при снижении выработки на ГЭС, включается резервная мощность ТЭС энергосистемы.

В работе [7] рассмотрена возможность использования эксплуатационных резервов энергосистемы при снижении выработки на ГЭС. Однако такой специальный резерв имеется не во всех энергосистемах. При отсутствии эксплуатационного резерва дефицит энергии иногда может покрываться за счет аварийного и ремонтного резервов.

Загрузка таких резервов энергосистемы в течение неблагоприятных по водности периодов не позволяет использовать их по прямому назначению. В результате значительно снижается надежность энергоснабжения. Это, в свою очередь, может вызывать ущербы, существенно превышающие стоимость энергии, теряемой за счет холостых сбросов. Поэтому при использовании резервных агрегатов ГЭС, кроме дополнительного расхода топлива резервных агрегатов ТЭС, следует учитывать также и величину математического ожидания ущерба от соответствующей недодачи энергии потребителям. Величина этих издержек подсчитывается по формуле:

$$\Delta И_{tj} = b \sum_{j=s+1}^{J} \Delta Э_{j\text{рез}} + \sum_{j=s+1}^{J} МУ_{j\text{рез}} + \sum_{j=s+1}^{J} \sum_{m=1}^{L} \Delta V_{jm\,\text{гар}}\, y_m \qquad (j < s), \tag{11}$$

где $\Delta Э_{j\text{рез}}$ — энергия, вырабатываемая за счет использования резервной мощности энергосистемы для компенсации дефицитов энергии на ГЭС в интервале j,

M — символ математического ожидания,

$У_{j\text{рез}}$ — величина ущерба от недоотпуска потребителям резервной энергии,

$\Delta V_{jm\text{гар}}$ — разность между гарантированным и фактическим (бытовым) объемом воды, т. е. недодаваемый объем воды в j — интервале m — неэнергетическому участнику комплекса,

y_m — среднее значение ущерба от недодачи воды m-му неэнергетическому участнику комплекса.

Математическое ожидание ущерба $МУ_{j\text{рез}}$ может быть подсчитано по методу, изложенному в работе [18]. В случае использования лишь аварийного резерва оно может быть подсчитано по методике, рекомендуемой в [11].

---

* Вследствие ограниченности пропускной способности турбин ГЭС или обильности половодья. В маловодные годы запас воды, ускоряя заполнение водохранилища, повышает напор на ГЭС.

При резервной мощности, недостаточной для компенсации дефицита энергии, величина издержек определяется по формуле:

$$\Delta И_{t_j} = y_э \sum_{j=s+1}^{J} (\Delta Э_{j\text{гар}} - \Delta Э_{j\text{рез}}) + b \sum_{j=s+1}^{J} \Delta Э_{j\text{рез}} + \sum_{j=s+1}^{J} M У_{j\text{рез}} + \\ + \sum_{j=s+1}^{J} \sum_{m=1}^{L} \Delta V_{jm\text{гар}} y_m \qquad (j>s), \qquad (12)$$

где $y_э$ — среднее значение ущерба от недоотпуска энергии потребителям *(руб/квт-ч)*.

Когда в системе отсутствует резервная мощность, издержки оцениваются по величине ущербов, причиняемых потребителям при недодаче энергии (воды):

$$У_{t_j} = y_э \sum_{j=s+1}^{J} \Delta Э_{j\text{гар}} + \sum_{j=s+1}^{J} \sum_{m=1}^{L} \Delta V_{jm\text{гар}} y_m \qquad (j > s). \qquad (13)$$

По формулам (10), (11), (12) и (13) при разных Z_j могут быть вычислены элементы клеток матрицы (6), расположенные по главной ее диагонали.

Выше мы считали предполоводную отметку сработки водохранилища известной, в действительности ее следует выбирать с учетом прогноза водности предстоящего объема половодья *.

Если значения W_j и Z_j в матрице (6) расположены в порядке убывания, а t_j — возрастания, то элементы конформной матрицы (8), расположенные выше ее главной диагонали (справа), должны вычисляться при $W_q > W_j$, $Z_q > Z_j$ (где W_q и Z_q — расчетные значения соответственно объема половодья и глубины сработки) и $t_j \gtrless t_s$, элементы, расположенные ниже при $W_q < W_j$, $Z_q < Z_j$ и $t_j \lessgtr t_s$.

При $W_q > W_j$, $Z_q < Z_j$ и любых значениях t_j и t_s возможны следующие два случая вычисления дополнительных издержек (по степени наполнения водохранилища к концу половодья).

Случай I. Водохранилище к началу половодья сработано ниже оптимальной отметки ($Z_j < Z_q$), а к концу половодья заполнено до НПГ.

В этом случае возможны следующие варианты, в зависимости от соотношения между временными интервалами t_j и t_s.

Если $t_j = t_s$, то будет иметь место лишь снижение напора в период от начала до окончания заполнения водохранилища. В результате этого произойдет перерасход топлива. Топливные издержки при этом могут быть подсчитаны по формуле, рекомендуемой в работе [4];

$$\Delta И_{н} (t_j = t_s) = 0{,}0027\, \eta\alpha\, W_{\text{рег}}\, \Delta h = bk\, W_j (V_{Z_j} - V_{Z_q}), \qquad (14)$$

где α — показатель напорной характеристики за период половодья,

$W_{\text{рег}}$ — зарегулированный объем стока за период половодья,

$\Delta h = \frac{V_{Z_j} - V_{Z_q}}{F}$ — приращение глубины сработки водохранилища,

V_{Z_j} и V_{Z_q} — объемы воды в водохранилище соответственно при отметках сработки Z_j и Z_q.

F — площадь зеркала водохранилища, средняя для возможных уровней предполоводной сработки

---

* Оптимальная глубина сработки определяется не только объемом предстоящего половодья, но и распределением его во времени. Учитывая трудность предсказания формы гидрографа, ограничимся лишь учетом влияния общего объема половодья на глубину предшествующей ему сработки.

$$k = 0{,}0027\,\frac{\eta\alpha\xi}{F}.$$

$\xi = \frac{W_{рег}}{W_j}$ — среднее отношение объема зарегулированного стока к объему половодья.

Если $t_j > t_s$, т. е. при позднем начале половодья, по сравнению с ожидаемым, дополнительные издержки будут состоять как из перерасхода топлива, возникающего вследствие снижения напора, так и из ущерба от недодачи энергии (воды) потребителям за время от t_s до t_j. Их суммарное значение будет определяться формулами (13) и (14).

Если $t_j < t_s$, т. е. когда фактическое время начала половодья будет более ранним, чем принятое, также будут иметь место потери энергии за счет снижения напора, равные:

$$\Delta И_н\,(t_j < t_s) = b\,k\,W_j\,[V_{Z_j t_j} - V_{Z_q\,t_q}(t_j)], \qquad (15)$$

где $V_{Z_j t_j}$ — объем воды, который был бы в водохранилище при глубине сработки Z_j и дате начала половодья t_j,

$V_{Z_q t_q}(t_j)$ — объем воды, который бы оставался в водохранилище в начале половодья t_j, когда режим сработки назначается, ориентируясь на Z_q и t_q.

Кроме того, возможны и холостые сбросы. Обусловленные ими издержки будут:

$$\Delta И_{х.\,с.}\,(t_j < t_s) = bc\,[V_{Z_q\,t_s} - V_{Z_j t_j}(t_j)]. \qquad (16)$$

где $c = 0{,}0027\eta H_п$, $H_п$ — средний напор за период половодья.

Случай II. Водохранилище к началу половодья сработало ниже оптимальной отметки ($Z_j < Z_q$), а к концу половодья заполнение его до НПГ не обеспечивается.

В данном случае возможны два варианта в зависимости от водности последующей межени, а именно:

1. Многоводная межень (после половодья, не обеспечившего заполнение водохранилища до НПГ). Учет последствий незаполнения водохранилища при этом сводится к определению величины перерасхода топлива в системе:

$$\Delta И_{н.\,з.} = 0{,}0027\,\eta\,b\,(\Delta V H_м + \alpha\,\Delta h\,W_м), \qquad (17)$$

где $\Delta V = V_{Z_q} - V_{Z_j}$ — незаполненный объем водохранилища к концу половодья,

$H_м$ — средний напор за период межени,

Δh — снижение напора вследствие незаполнения водохранилища до оптимальной отметки,

$W_м$ — приток воды в водохранилище ГЭС за период межени.

2. Маловодная межень (после половодья, не обеспечившего заполнение водохранилища до НПГ).

В этом варианте, помимо ущербов в энергетике, будут еще и ограничения требований других компонентов водохозяйственного комплекса в меженный период. В результате этого суммарные ущербы составят:

$$У = \Delta Э^{м}_{гар}\,y_э + \sum_{m=1}^{L} \Delta V^{м}_{mгар}\,y_m, \qquad (18)$$

где $\Delta Э^{м}_{гар}$ и $\Delta V^{м}_{mгар}$ — соответственно значению недодаваемой энергии и объема воды за период межени.

Так как мы не знаем фактической водности предстоящей межени, то издержки от недонаполнения водохранилища могут быть учтены лишь

в виде математического ожидания дополнительных издержек. Для этой цели составляется матрица издержек типа

$$\begin{array}{c} \quad P_{м1} \quad P_{м2} \ldots P_{мN} \\ \quad W_{м1} \quad W_{м2} \ldots W_{мN} \\ \begin{matrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ V_F \end{matrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{м11} & \Delta u_{м12} \ldots \Delta u_{м1N} \\ \Delta u_{м21} & \Delta u_{м22} \ldots \Delta u_{м2N} \\ \ldots & \ldots \quad \ldots \\ \Delta u_{мF1} & \Delta u_{мF2} \ldots \Delta u_{мF_N} \end{bmatrix} \end{array} \qquad (19)$$

где $W_м$ и $P_м$ — соответственно объем и вероятность меженного стока.

Математические ожидания издержек определяются по каждой строке матрицы (19).

Рассмотренные выше способы определения дополнительных издержек отвечают условию, когда глубина сработки водохранилища оказывается больше оптимального ее значения, т. е. $Z_q > Z_j$. В противном случае, т. е. когда $Z_q < Z_j$, будет иметь место холостой сброс, а следовательно, и соответствующие им издержки в энергосистеме. Величина их определяется в зависимости от соотношения между значениями t_j и t по следующим формулам:

$$\Delta И_{х.\,с.} = \begin{cases} bc(V_{Z_q} - V_{Z_j}) \text{ при } t_j = t_s \\ b\left[\sum\limits_{j=1}^{s-1} \Delta Э_{j\text{гар}} + c\,(V_{Z_q} - V_{Z_j})\right] \text{ при } t_j > t_s. \end{cases} \qquad (20)$$

При $t_j < t_s$ помимо потерь энергии от холостого сброса воды будут иметь место и ущербы от недодачи энергии (воды) потребителям:

$$\Delta И\,(t_j < t_s) = b\,c\,(V_{Z_q} - V_{Z_j}) + y_э \sum_{j=s+1}^{J} \Delta Э_{j\text{гар}} + \sum_{j=s+1}^{J} \sum_{m=1}^{L} \Delta V_{jm\text{гар}} y_m \qquad (21)$$

В общем случае построение матрицы дополнительных издержек вида (6) производится в следующем порядке. Сначала составляются матрицы последствий ошибочного определения глубин предполоводной сработки и даты завершения сработки водохранилища. Из этих двух матриц путем последовательного суммирования каждого элемента первой матрицы со всеми элементами второй получается общая матрица (6). Так сложение первого элемента первой строки матрицы глубин сработки со всеми элементами матрицы дат завершения сработки дает первый элемент первой строки матрицы (8) — $\Delta u_{11}{}^t\,(Z_1\ W_1)$, т. е. первую клетку матрицы (6). Сложение второго элемента матрицы со всеми элементами соответствующей матрицы дает второй элемент той же строки — $\Delta u_{12}{}^t\ \ (Z_1\ W_2)$.

Следует отметить, что при построении матрицы (8), или, что то же самое (6), издержки, вызванные холостым сбросом воды и потерями напора, должны суммироваться с противоположными знаками.

Определение минимума математического ожидания издержек производится по формуле (5), в которой значения P_j должны соответствовать вероятностям сочетаний W_j и t_j, устанавливаемым по известным из теории вероятностей способам, а Δu_{ij} —возможным издержкам при этих сочетаниях.

Полученный минимум математического ожидания целевой функции согласно формуле (5) отвечает оптимальным значениям глубины и даты начала предполоводной сработки водохранилища, ориентируясь на которые следует назначать эксплуатационный режим работы гидроузла.

3. Расчетная схема при двух водохранилищах

При каскадном расположении водохранилищ избыточная энергия на одном из них может быть использована для полной или частичной компенсации недодачи ее на других. Излишняя сработка нижнего водохранилища, снижая напор на нижней ГЭС, повышает его на ГЭС верхней ступени каскада и наоборот. Эти особенности каскадного регулирования стока должны учитываться при работе двух водохранилищ.

Как и в случае с одним водохранилищем, разбиваем период времени, в течение которого может начаться половодье в створах обоих гидроузлов, на некоторое число интервалов соответственно с продолжительностью τ_1 и τ_2. Обозначим через $j^{(1)}$ и $j^{(2)}$ интервалы, отвечающие фактически возможным началам половодья соответственно для первой (верхней) и второй (нижней) ГЭС, а через $s^{(1)}$ и $s^{(2)}$ расчетные интервалы. Если половодье начнется раньше принятой в расчет даты, т. е. ($j^{(1)} < s^{(1)}$, $j^{(2)} < s^{(2)}$), то, как отмечалось выше, определенное количество воды будет сброшено из водохранилища вхолостую. Возможное увеличение издержек по энергосистеме при этом вычисляется по выражению:

$$\Delta И_{х.\,с.}\, l = b \sum_{l=1}^{d-1} \Delta Э_{l\text{гар}} = b \left[\sum_{j^{(1)}=1}^{s^{(1)}-1} \Delta Э_{j^{(1)}\text{гар}} + \sum_{j^{(2)}=1}^{s^{(2)}-1} \Delta Э_{j^{(2)}\text{гар}} \right], \quad (22)$$

$$(j^{(1)} < s^{(1)},\ j^{(2)} < s^{(2)}),$$

где

$$\Delta Э_{j^{(1)}\text{гар}} = 9{,}81\, \eta_l^{(1)}\, Н_{пj^{(1)}} (Q_{j^{(1)}\text{гар}} - Q_{j^{(1)}\text{быт}})\, \tau, \quad (22а)$$

$$\Delta Э_{j^{(2)}\text{гар}} = 9{,}81\, \eta^{(2)}\, H_{nj^{(2)}} [Q_{j^{(2)}\text{гар}} - (Q_{j^{(1)}\text{гар}} + Q_{j^{(2)}\text{быт}})]\, \tau_2 \quad (22в)$$

l — номер какого-либо фактически возможного сочетания интервалов даты начала половодья двух гидроузлов ($l = 1, 2, \ldots, R$),
d — номер расчетного сочетания временных интервалов.

Если же половодье начнется позже, т. е. $j^{(1)} > s^{(1)}$, $j^{(2)} > s^{(2)}$, то издержки от недодачи энергии, как и в случае с одной ГЭС, могут быть вычислены тремя способами. В соответствии с этими способами формулы (11), (12) и (13) применительно к схеме двух водохранилищ будут иметь вид:

а) если имеется резервная мощность ТЭС

$$\Delta И_l = b \sum_{l=d+1}^{R} \Delta Э_{l\text{рез}} + \sum_{l=d+1}^{R} М У_{l\text{рез}} + \sum_{l=d+1}^{R} \sum_{m=1}^{L} \Delta V_{lm\text{гар}}\, y_m, \quad (23)$$

б) при недостаточности резервной мощности

$$\Delta И_l = y_э \sum_{l=d+1}^{R} (\Delta Э_{l\text{гар}} - \Delta Э_{l\text{рез}}) + b \sum_{l=d+1}^{R} \Delta Э_{l\,\text{рез}} + \sum_{l=d+1}^{R} М У_{l\text{рез}} + \sum_{l=d+1}^{R} \sum_{m=1}^{L} \Delta V_{lm\text{гар}}\, y_m, \quad (24)$$

где $\Delta Э_{l\text{гар}}$ и $\Delta Э_{m\text{гар}}$ — соответственно величина энергии и объем воды, которые остаются в водохранилищах для поддержания их гарантированных отдач,

в) при отсутствии резервной мощности

$$У_l = y_э \sum_{l=d+1}^{R} \Delta Э_{l\text{гар}} + \sum_{l=d+1}^{R} \sum_{m=1}^{L} \Delta Э_{lm\text{гар}}\, y_m. \quad (25)$$

Если половодье в створе первого гидроузла начнется раньше пред-

полагаемого срока, а в створе второго — позже, то суммарные дополнительные издержки будут

$$И_{х.\,с.l} = \begin{cases} b\sum\limits_{j^{(1)}=1}^{s^{(1)}-1} \Delta Э_{j^{(1)}гар} + y_э \sum\limits_{j^{(2)}=1}^{s^{(2)}-1} \Delta Э_{j^{(2)}гар} + \sum\limits_{m=1}^{l} \Delta V^{(2)}_{m\,гар} y_m \\ \qquad (j^{(1)} < s^{(1)},\ j^{(2)} > s^{(2)}) \\ b\sum\limits_{j^{(2)}=1}^{s^{(2)}-1} \Delta Э_{j^{(2)}гар} + y_э \sum\limits_{j^{(1)}=1}^{s^{(1)}-1} \Delta Э_{j^{(1)}гар} + \sum\limits_{m=1}^{l} \Delta V^{(1)}_{m\,гар} y_m \\ \qquad (j^{(1)} > s^{(1)},\ j^{(2)} < s^{(2)}). \end{cases} \quad (26)$$

При $j^{(1)} < s^{(1)}$ и $j^{(2)} > s^{(2)}$ значения $\Delta Э_{j^{(1)}гар}$ подсчитываются согласно уравнению (22а), а при $j^{(1)} > s^{(1)}$ и $j^{(2)} < s^{(2)}$ по нижеследующей формуле:

$$\Delta Э_{j^{(1)}гар} = 9{,}81\ \eta^{(1)} H_{пj^{(1)}} [Q_{j^{(1)}гар} - (Q_{j^{(2)}быт} - Q_{j^{(2)}гар})]. \quad (27)$$

При указанных выше ограничениях значения $\Delta Э^{(2)}_{j}$ определяются соответственно по уравнению (22в) и следующей формуле:

$$\Delta Э_{j^{(2)}гар} = 9{,}81\ \eta^{(2)} H_{nj^{(2)}} [Q_{j^{(2)}гар} - (Q_{j^{(1)}быт} + Q_{j^{(2)}быт})]. \quad (28)$$

Если оба водохранилища оказались сработанными ниже оптимальной глубины, т. е. $Z_q^{(1)} > Z^{(1)}$ и $Z_q^{(2)} > Z_j^{(2)}$, но заполнение их до НПГ обеспечивается, тогда издержки за счет снижения напора должны быть уменьшены на величину экономии топлива от некоторого повышения напора на верхней ГЭС. С учетом этого обстоятельства издержки за счет снижения напора при $t_j^{(1)} = t_s^{(1)}$ и $t_j^{(2)} = t_s^{(2)}$ определяются по формуле:

$$И_н = b\,[k^{(1)} W_{j^{(1)}} (V_{Z_j^{(1)}} - V_{Z_q^{(1)}}) + k^{(2)} W_{j^{(2)}} (V_{Z_j^{(2)}} - V_{Z_q^{(2)}}) - k^{(1)} W_{j^{(1)}} (V_{Z_j^{(2)}} - V_{Z_j^{(2)}})], \quad (29)$$

где $V_{Z_j^{(1)}}$ и $V_{Z_j^{(2)}}$ — объемы воды в водохранилищах, отвечающие отметкам сработки $Z_j^{(1)}$ и $Z_j^{(2)}$,

$V_{Z_q^{(1)}}$ и $V_{Z_q^{(2)}}$ — то же для отметок сработки $Z_q^{(1)}$ и $Z_q^{(2)}$,

$W_{j^{(1)}}$ и $W_{j^{(2)}}$ — фактически возможные объемы половодья,

$k^{(1)}$ и $k^{(2)}$ — коэффициенты (определяются так же, как и в случае с одним водохранилищем).

Если заполнение водохранилищ до оптимальной отметки не обеспечивается, то возможные издержки учитываются в виде их математического ожидания.

При условиях $W_{q^{(1)}} < W_{j^{(1)}}$ и $W_{q^{(1)}} < W_{q^{(2)}}$ увеличение издержек за счет холостых сбросов будет:

$$И_{х.\,с.} = b\,[c^{(1)} (V_{Z_q^{(1)}} - V_{Z_j^{(1)}}) + c^{(2)} (V_{Z_q^{(2)}} - V_{Z_j^{(2)}})]. \quad (30)$$

При условиях же $W_{q^{(1)}} > W_{j^{(1)}}$ и $W_{q^{(2)}} < W_{j^{(2)}}$ на первой ГЭС будет иметь место холостой сброс воды, а на второй — потери энергии в результате снижения напора.

Если $W_{q^{(1)}} < W_{j^{(1)}}$ и $W_{q^{(2)}} > W_{j^{(2)}}$, то будет наблюдаться обратная картина.

Если же $W_q^{(1)} > W_j^{(1)}$ и $W_q^{(2)} = W_j^{(2)}$, то холостой сброс произойдет на первой ГЭС, а когда $W_q^{(1)} = W_j^{(1)}$ и $W_q^{(2)} > W_j^{(2)}$ — на второй.

При соотношениях $W_q^{(1)} < W_j^{(1)}$ и $W_q^{(2)} = W_j^{(2)}$ будет иметь место снижение напора на первой ГЭС, а при $W_q^{(2)} < W_j^{(2)}$ и $W_q^{(1)} = W_j^{(1)}$ — на второй и некоторое повышение его на первой ГЭС.

С учетом изложенных особенностей работы каскада, состоящего из двух водохранилищ, можно составить матрицу последствий ошибочных определений глубин предполоводной их сработки.

Аналогичную матрицу можно составить и для определения оптимальных дат завершения предполоводных сработок водохранилищ и при различных комбинациях их глубин $Z_j^{(1)}$ и $Z_j^{(2)}$. На основе этих матриц составляется общая матрица дополнительных издержек вида (6).

Предлагаемая методика определения оптимальных глубин и дат завершения предполоводной сработки в принципе может быть обобщена на случай совместной работы нескольких водохранилищ ГЭС.

* * *

В зависимости от степени регулировании стока при решении поставленной задачи возможны некоторые упрощения.

При высоких степенях глубины регулирования стока определение даты завершения предполоводной сработки не имеет существенного значения и, наоборот, при низких степенях регулирования, обеспечивающих ежегодное заполнение водохранилищ и работу ГЭС в половодный период с максимальной мощностью, важное значение имеет выбор даты завершения сработки.

Следовательно, в первом случае можно не определять дату завершения сработки, а во втором — глубину сработки. В промежуточных случаях целесообразно определение и глубины и даты завершения предполоводных сработок водохранилища.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авакян В. А., Шарапов В. А. *Требования отраслей хозяйства к водным* ресурсам и режиму эксплуатации гидроузлов и некоторые вопросы оптимизации водохозяйственных комплексов. Доклады к научно-техническому совещанию по оптимальным режимам работы гидроэлектростанций в энергосистемах, ч. I. М., 1966.

2. Бахтиаров В. А. Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты. Л., Гидрометеоиздат, 1961.

3. Багров Н. А. Об экономической полезности прогнозов. «Метеорология и гидрология», 1966, № 2.

4. Беляев Л. С. К вопросу выбора глубины и даты предпаводковой сработки водохранилищ ГЭС. «*Известия вузов СССР*». «*Энергетика*», 1965, № 7.

5. Болотов В. В. и др. Энергетические резервы в энергетических системах. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1955.

6. Давлетгалиев С. К. Вероятностные принципы прогнозирования речного стока. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 5. Алма-Ата, «Наука», 1967.

7. Давлетгалиев С. К. Определение оптимальной даты завершения сработки водохранилища ГЭС с учетом гидропрогноза. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 6. Алма-Ата, «Наука», 1968.

8. Зубарев В. В. Расчет оптимальных режимов использования стока участниками комплексного гидроузла. Доклады к научно-техническому совещанию по оптимальным режимам работы гидроэлектростанций в энергосистемах, ч. I. М., 1966.

9. Картвелишвили Н. А. Теория вероятностных процессов в гидрологии и регулировании речного стока. Л., Гидрометеоиздат, 1967.

10. Кармазин И. А., Вильниц Б. З. Оптимизация водохозяйственных режимов ГЭС Камского каскада. Доклады к научно-техническому совещанию по оптимальным режимам работы гидроэлектростанций в энергосистемах, ч. I, 1966.

11. Ким В. Я., Паутов А. С. Использование аварийного резерва при эксплуатации энерго-транспортного водохозяйственного комплекса. Печатается в данном сборнике.

12. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Водохозяйственные расчеты. Л., Гидрометеоиздат. 1952.

13. Курбатов А. П., Сыров Ю. П. Опыт эксплуатации Новосибирской ГЭС. Доклады к научно-техническому совещанию по оптимальным режимам работы гидроэлектростанций в энергосистемах, ч. II. М., 1966.

14. Ланге О. Оптимальные решения. М., «Прогресс», 1967.

15. Льюс Р. Д. и Райфа Х. Игры и решения. М., ИЛ, 1960.

16. Нежиховский Р. А. Гидрологические расчеты и прогнозы при эсплуатации водохранилищ и озер. Л., Гидрометеоиздат, 1961.

17. Никитин С. Н. Основы гидроэнергетических расчетов. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.

18. Розанов М. Н., Мясников А. В. Определение народнохозяйственного ущерба от перебоев электроснабжения из-за дефицита мощности в энергосистеме, «Труды ВНИИЭ», вып. 22. М.—Л., «Энергия», 1965.

19. Цветков Е. В. Вероятностная методика назначения оптимальных режимов энергосистем с гидростанциями длительного регулирования. «Труды ВНИИЭ», вып. 13. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.

20. Цветков Е. В. Расчет оптимального регулирования стока водохранилищами гидроэлектростанций на ЦВМ. М., «Энергия», 1967.

21. Чернов Г., Мозес Л. Элементарная теория статистических решений. М., «Советское радио», 1962.

22. Чокин Ш. Ч. Расчетная обеспеченность работы гидроэлектростанций. Алма-Ата, Изд-во АН КазССР, 1958.

SUMMARY

The author offers a method for determination of the most advantageous combination of the date of completion and available depth of preflood decrease of storage taking into account forecasting of the volume and date of the young flood.

Some cases of work of one water reservoir and of two water reservoirs are considered.

The solution of the problem is given on the ground of the payoff matrix. A matrix row, minimizing mathematical expectation of extra costs, corresponds with the sought (optimal) value of the completion date and available depth of preflood decrease of storage.

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
1970 *ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА* вып. 7.

В. Я. КИМ, А. С. ПАУТОВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВАРИЙНОГО РЕЗЕРВА ПРИ ЭСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГОТРАНСПОРТНОГО ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА

Правила эксплуатации водохранилищ комплексного назначения принято выражать в форме диспетчерских графиков. Для их построения гарантированная отдача из водохранилища должна оптимально распределяться внутри года. Требования энергетики и судоходства к внутригодовому распределению зарегулированных расходов, как известно, прямо противоположны: энергетика требует повышенных расходов в зимний период, а водный транспорт, наоборот,— в навигацию.

Стремление полностью удовлетворить запросы судоходства, чтобы свести до минимума его эксплуатационные издержки, может привести к дефицитам мощности и энергии в меженный период. В отличие от глубоких дефицитов гидроэнергии, которые возникают после опорожнения водохранилища, недостаток электроэнергии при внутригодовом распределении обеспеченной отдачи компенсируется использованием аварийного резерва энергосистемы.

При переводе ряда резервных агрегатов в рабочие снижается надежность энергоснабжения системы. Вследствие этого увеличивается математическое ожидание ущербов из-за ограничения отпуска электроэнергии потребителям. Однако, сокращая издержки по судоходству, мы можем добиться уменьшения затрат в целом по комплексу.

И наоборот, желание недопустить дефицита гидроэнергии в межень приведет нас к такому снижению навигационного расхода, при котором издержки по комплексу увеличиваются.

Таким образом, при ограничении рабочих мощностей в энергосистеме существует экономически оправдываемый предел использования аварийного резерва для компенсации меженного дефицита. Ранее уже был рассмотрен случай оптимизации внутригодового распределения обеспеченных расходов энерготранспортного комплекса без использования аварийных резервов для компенсации дефицита гидроэнергии в межень [6, 7].

В данной статье рекомендуется использование аварийного резерва для компенсации дефицита гидроэнергии в межень при внутригодовом распределении гарантированной (обеспеченной) отдачи между энергетикой и судоходством.

Основой расчетной схемы является сомкнутый Верхне-Иртышский каскад на реке Иртыше с водохранилищами многолетнего регулирования на верхней Бухмарминской ГЭС и суточного — на нижней Усть-Каменогорской ГЭС. Река Иртыш используется как транспортная артерия.

При проектировании и эксплуатации величина аварийного резерва устанавливается в нормативном порядке, исходя из надежности бесперебойного энергоснабжения, которое принимается равным: $p^1 = 0{,}9999 \div 0{,}99999$ [2,5]. В настоящее время считают, что столь высокое значение p^1, не имеющее достоверного экономического обоснования, является

недоказанным и завышенным [4]. Аварийный резерв в энергосистемах составляет значительную величину, достигая 5—10% максимума нагрузки.

Распределение аварийного резерва между ТЭС и ГЭС производится с учетом многих факторов: необходимости горячего резерва, высокой мобильности гидротурбин, расположения рассматриваемой электростанции по отношению к центру нагрузки, обеспеченности линиями электропередач и т. д. Если часть резерва размещается на ГЭС, то аварийно сработанные объемы водохранилищ должны быть в течение года восстановлены загрузкой тепловых электростанций. Поэтому здесь рассматривается использование аварийного резерва, располагаемого на ТЭС.

При оптимизации внутригодового распределения гарантированных расходов календарный год разбивается на два расчетных периода (сезона): межень и навигацию. В дальнейшем все величины, относящиеся к межени, имеют индекс «М», а к навигации — «Н». Для указанных расчетных периодов, которые зависят от продолжительности навигации в году, считаются заданными характерные суточные графики нагрузок.

Необходимые навигационные условия в нижнем бьефе второй ступени каскада поддерживаются пропуском равномерного (базового) судоходного расхода $Q_с$. В период межени по санитарным условиям ниже Усть-Каменогорской ГЭС также необходимы равномерные санитарные расходы $Q_{сн}$, которые не подлежат экономическому обоснованию.

Поскольку требуемые судоходные глубины между створами сомкнутого каскада двух ГЭС обеспечиваются верхним бьефом второй ступени, то на Бухтарминской ГЭС судоходный расход $Q_с$ (так же, как и санитарный $Q_{сн}$ в межень) срабатывается в неравномерном пиковом режиме (при покрытии этой ГЭС пиковой части суточного графика нагрузки).

Оптимальному внутригодовому распределению подлежит не вся зарегулированная (обеспеченная) отдача $Q_{го}$, соответствующая расчетной обеспеченности работы гидроузла, а только часть ее, которая может перераспределяться между сезонами года (называемая в дальнейшем регулируемым расходом или отдачей $Q_р$). Регулируемый расход $Q_р$ равен гарантированному $Q_{го}$ за вычетом из него потерь на испарение и фильтрацию, отъемов с верхнего бьефа Бухтарминской ГЭС и попусков на заливку поймы.

Если τ и $1-\tau$ представляют соответственно относительные продолжительности периодов навигации (с вычетом времени попусков на заливку поймы) и межени в долях года, то годовой баланс регулируемого расхода $Q_р$ можно представить в следующем виде:

$$Q_р = \tau Q_с + (1 - \tau) Q_м, \qquad (1)$$

где $Q_м$ — средний расход в межень, включающий в себя и санитарный расход $Q_{сн}$.

Расчетные затраты по энерготранспортному комплексу $З_к$ при использовании аварийных агрегатов для компенсации снижения зимней выработки каскада ГЭС представляются в таком виде:

$$З_к = И_с + И_т + И_а, \qquad (2)$$

где $И_с$ — годовые затраты по судоходству,

$И_т$ — годовые издержки на топливо ТЭС,

$И_а$ — математическое ожидание ущерба от недодачи энергии потребителям вследствие аварийного выхода рабочих агрегатов энергосистемы.

Годовые затраты по судоходству уменьшаются с увеличением навигационных расходов и могут быть выражены следующей зависимостью [6]:

$$И_с = \frac{A}{Q_с + B} + Д, \qquad (3)$$

где, A, B, $Д$ — эмпирические коэффициенты.

Годовые издержки на топливо ТЭС определяются произведением выработки ТЭС на топливную составляющую себестоимости электроэнергии b. Значение b принято переменным в зависимости от места расположения теплоэлектростанций в графиках нагрузок обоих периодов (гидроэнергия вливается с вершины пиков). Используя аналитическое выражение кривой продолжительности нагрузки, можно показать, что годовые издержки на топливо равны [7]:

$$И_г = f_н H_{н1}^{\gamma} Q_с^{\gamma} + f_м (F - \tau H_{м12} Q_с)^{\lambda} + c Q_с + L. \qquad (4)$$

Здесь постоянные F, c, L имеют следующие значения:

$$F = H_{м12} Q_р - (1 - \tau) H_{м2} Q_{сн}, \qquad (5)$$

$$c = \tau R (b''_м H_{м12} - b''_н H_{н12} - b_{нб} H_{н2}), \qquad (6)$$

$$L = S - b''_м RF - (1 - \tau) b_{мб} R H_{м2} Q_{сн} - b_{нб} Э_х, \qquad (7)$$

где $H_{м12} = H_{м1} + H_{м2}$ — суммарный напор двух ГЭС в межень,

$H_{н1}$ и $H_{н2}$ — напоры первой и второй ступеней каскада в навигацию,

$R = 9{,}81\eta\ 8760$ — числовой коэффициент,

η — общий кпд ГЭС.

$b''_м$ и $b''_н$ — максимальные топливные составляющие себестоимости энергии в вершинах суточных графиков нагрузок периодов межени и навигации,

$b_{мб}$ и $b_{нб}$ — топливная составляющая себестоимости энергии базы графиков нагрузок межени и навигации,

S — годовые издержки на топливо ТЭС, если бы работали только тепловые электростанции,

$Э_х$ — базовая выработка каскада двух ГЭС при заливке поймы реки Иртыш с целью повышения продуктивности сенокосных угодий.

Постоянные коэффициенты $f_н$ и $f_м$ зависят от параметров суточных графиков нагрузок двух сезонов.

1. Для периода навигации:

$$f_н = \frac{\tau R \Delta b_н}{\gamma} \left(\frac{9{,}81\eta}{\overline{P}_{нп}} \right)^{\gamma} - 1; \qquad (8)$$

Здесь: $\Delta b_н = b''_н - b_{нб}$; $\gamma = \frac{n + \alpha_н}{n}$; $n = \frac{P''_н - P'_н}{\overline{P}_н - P'_н}$;

$$\alpha_н = \frac{n(\overline{b}_н - b_{нб})}{b''_н - b_{нб}}; \quad \overline{P}_{нп} = \overline{P}_н - \overline{P}'_н;$$

где $P''_н$, $\overline{P}_н$, $P'_н$ — соответственно максимальная, средняя и минимальная ординаты навигационного суточного графика нагрузки,

$\overline{b}_н$ — средневзвешенное (по энергии) значение топливной составляющей себестоимости энергии пиковой части навигационного суточного графика нагрузки.

2. Для периода межени:

$$f_м = \frac{R \Delta b_м}{\lambda} \left[\frac{9{,}81\eta}{(1-\tau)\overline{P}_{мн}} \right]^{\lambda - 1}, \qquad (9)$$

где $P''_м$, $\overline{P}'_м$, $P'_м$ и $\Delta b_м$ аналогичны соответствующим величинам периода навигации.

Схема определения ущерба у потребителей электроэнергии от аварии показана на рисунке 1. На этом рисунке суточный график нагрузки меженного периода перестроен в кривую продолжительности.

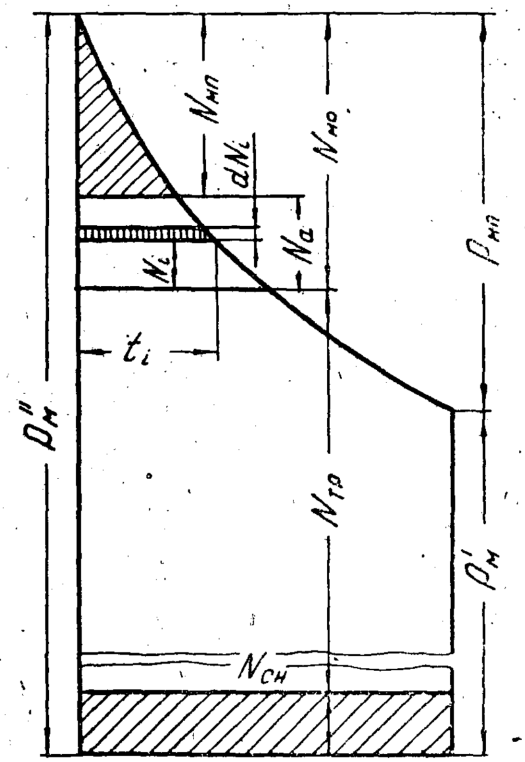


Рис. 1. Размещение дефицита гидроэнергии в межень.

Если все рабочие мощности ТЭС загружены на максимальную величину $N_{тр}$ и ГЭС каскада, развивают пиковую мощность $N_{мо} = P''_м - N_{тр} - N_{сн}$, то покрытие меженного максимума $P''_м$ производится без использования аварийного резерва системы. При этом максимальной пиковой мощности каскада $N_{мо}$ соответствует средний пиковый расход $Q_{гт}$ в межень, равный:

$$Q_{гт} = \frac{N^m_{мо} + m N_{сн} P^{m-1}_{мп}}{9{,}81\,\eta_i\, m H_{м13} P^{m-1}_{мп}}, \qquad (10)$$

где $N_{сн} = 9{,}81\eta H_{м2} Q_{сн}$ — базовая мощность при пропуске санитарного расхода $Q_{сн}$ в межень,

$P_{мп} = P''_м - P'_м$ — пик меженного суточного графика нагрузки.

Тогда баланс регулируемого расхода $Q_р$ за год имеет следующий вид:

$$Q_р = \tau Q''_с + (1 - \tau)(Q_{гт} + Q_{си}), \qquad (11)$$

где $Q''_с$ — максимальный судоходный расход в навигацию, при котором в межень еще не используется аварийный резерв.

Дальнейшее увеличение судоходных расходов $Q_с > Q''_с$ приведет к дефицитам гидроэнергии в межень, поэтому для его покрытия загружается аварийный резерв на величину $N_а$ (рис. 1). При этом вследствие

уменьшения надежности бесперебойного энергоснабжения у потребителей может возникнуть аварийный ущерб $И_а$.

В настоящее время оценка аварийности энергосистем разработана лишь для однотипных агрегатов, имеющих одинаковые единичные мощности N_1 и равные вероятности выхода их в аварию q. Если в энергосистеме имеется l рабочих и r резервных турбогенераторов с вероятностью выпадения в аварию q, то вероятность простоя p_k одновременно k агрегатов подсчитывается по следующей зависимости [4]:

$$p_k = (k - r)\, q^k (1 - q)^{l-k} C_l^k, \qquad (12)$$

где $C_l^k = \frac{l!}{k!\,(l-k)!}$.

Вероятность аварийного простоя q, которая зависит от типа агрегата и качества его эксплуатации, составляет для гидротурбин ГЭС 0,005, для агрегатов ТЭС с резервным котлом и общим паропроводом 0,01 и при блочных схемах (котел — турбина — генератор) — 0,03—0,04 [5].

Ущерб от недодачи потребителям электроэнергии в результате аварийного выхода турбоагрегатов $И_а$ (см. рис. 1) можно определить следующим образом [3]:

$$И_a = T_м N_1 \sum_{k=r+1}^{n} k\, p_{ki}\, y_i\, t_i, \qquad (13)$$

где $T_м$ — продолжительность периода межени в часах,

P_{ki} — вероятность аварии мощности kN_1,

y_i — дифференциальный удельный аварийный ущерб у потребителей в *руб/квт-ч*,

t_i — относительная продолжительность использования аварийной мощности $(k—r)N_1$ в суточном графике меженного периода,

n — рассматриваемое (максимальное) число агрегатов с одновременным выходом в аварию.

Сумма значений p_{ki} равняется единице. Для их определения предварительно находится кривая продолжительности вероятностей аварии единичного агрегата p_i. В предположении того, что авария наступила, имеем $p_{i=1} = 1$. Последующие искомые вероятности равны отношению $p_k/p_{k=r+1}$, где p_k вычисляется по выражению (12).

Заметим, что с увеличением k вероятности p_{ki} быстро уменьшаются (см. таблицу 1). Поэтому всегда имеется возможность ограничить n определенным значением.

При аварийных режимах ограничению в энергоснабжении подвергаются те потребители, у которых меньше произведение $y_i t_i$. Такой принцип отключения отвечает минимуму ущерба от недодачи электроэнергии.

В современных крупных энергосистемах пиковая часть графика нагрузки формируется в основном за счет коммунально-бытовых и мелкомоторных потребителей. При аварийном отключении этих потребителей возможно недовыработка продукции, порча полуфабрикатов, поломка оборудования, расстройство технологического процесса и т. д. Поэтому удельные аварийные ущербы составляют относительно большие величины и изменяются в широких пределах [1] от $y_i = 0{,}5$ *руб/квт-ч* (мельничный комбинат) до $y_i = 30$ *руб/квт-ч* (хлебопекарная промышленность). В случае отключения энергоемких (базовых) потребителей удельный ущерб убывает, например для алюминиевого комбината, до значения $y_i = 0{,}3$ *руб/квт-ч*.

Относительная продолжительность отключаемой (в результате аварии) нагрузки t_i определяется местоположением ее в суточном графике меженного периода. Получив указанную информацию, можно построить

кривую удельных аварийных ущербов $y_i\ t_i$ в зависимости от дифицитной мощности kN_1 (см. рис. 2).

Использование резерва для компенсации дефицита гидроэнергии в межень меняет соотношение рабочих и резервных мощностей ТЭС. Если для этой цели включается z резервных агрегатов, то число рабочих турбоагрегатов будет $l+z$, а резервных равно $r-z$.

Пример расчета значений p_{ki} для различных z приведен в таблице 1.

Расчет иллюстрирован рисунком 3, на котором для $z=4$ построен график вероятности аварийного отключения потребителей. Заметим, что площадь, ограниченная этой зависимостью, осью абсцисс и прямой $N_д=2N_1$, представляет собой математическое ожидание дефицита мощности.

Число резервных агрегатов z, используемых для компенсации дефицита гидроэнергии, находится по равенству $N_а=zN_1$.

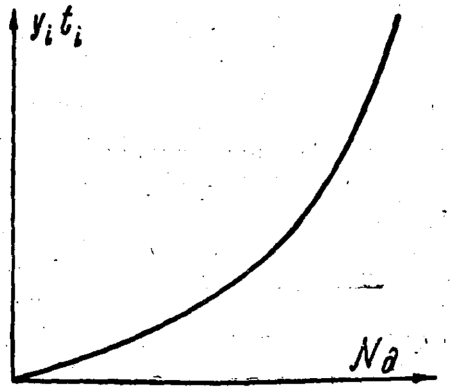


Рис. 2. Принципиальная кривая удельных аварийных ущербов в зависимости от глубины дефицита.

Таблица 1

Вероятность аварийного отключения потребителей электроэнергии при $l=50, r=5, q=0{,}02$

k \ z	0	1	2	3	4	5
1	—	—	—	—	—	0,1000
2	—	—	—	—	0,2920	0,5030
3	—	—	—	0,4890	0,4320	0,3860
4	—	—	0,6100	0,3580	0,2010	0,1560
5	—	0,7000	0,2985	0,1133	0,0594	0,0439
6	0,5000	0,2333	0,0732	0,0338	0,0131	0,0092
7	0,4560	0,0577	0,0153	0,0044	0,0020	0,0016
8	0,0440	0,0090	0,0024	0,0015	0,0005	0,0003

Используя выражение для кривой продолжительности нагрузки [6] и связь между средней и рабочей мощностями ГЭС [7], получаем:

$$N_а = N_{мо} - x_{мп}^{\frac{1}{m}} \overline{P}_{мп}, \qquad (14)$$

где $x_{мп} = \frac{9{,}81\,\eta}{(1-\tau)\overline{P}_{мп}}(F - \tau H_{м12} Q_c)$ — относительная пиковая мощность ГЭС в межень.

Следовательно, издержки $И_а$ есть функция Q_c.

В условиях текущей эксплуатации оптимальная аварийная мощность $N_а$, используемая в качестве рабочей при покрытии меженного суточного максимума нагрузки, находится по минимуму расчетных затрат $З_к$ всего энерготранспортного комплекса

$$\frac{dЗ_к}{dQ_c} = \frac{dИ_с}{dQ_c} + \frac{dИ_т}{dQ_c} + \frac{dИ_а}{dQ_c}. \qquad (2')$$

В развернутом виде равенство (2′) имеет вид:

$$\Delta b_н \tau R H_{н1} x_c^{\gamma-1} - \Delta b_м \tau R H_{м12} x_{мп}^{\lambda-1} + \frac{\partial И_а}{\partial Q_c} - \frac{A}{(Q_c+B)^2} + c = 0, \qquad (15)$$

где $x_c = \frac{9{,}81 \eta H_{н1} Q_c}{\bar{P}_{нп}}$ — мощность ГЭС на судоходном расходе в долях

$$\bar{P}_{нп} = \bar{P}_н - P'_н,$$

$$\frac{\partial И_а}{\partial Q_c} = Т_м N_1 \sum_{k=r+1}^{n} k y_i t_i \frac{\partial p_{ki}}{\partial Q_c}.$$

Для каждого k (мощности kN_1) значения $y_i t_i$ берутся по рисунку 2. Привлекая выражение (14), производная $\frac{\partial p_{ki}}{\partial Q_c}$ может быть записана следующим образом:

$$\frac{\partial p_{ki}}{\partial Q_c} = \frac{9{,}81 \eta \tau H_{м12} x_{мп}^{\frac{1-m}{m}}}{(1-\tau) N_1} \frac{\partial p_{ki}}{\partial z}.$$

Зависимость между p_{ki} и z для задаваемого k дана в таблице 1.

1. Значения $\frac{\partial p_{ki}}{\partial z}$ находятся по известным методам графического дифференцирования.

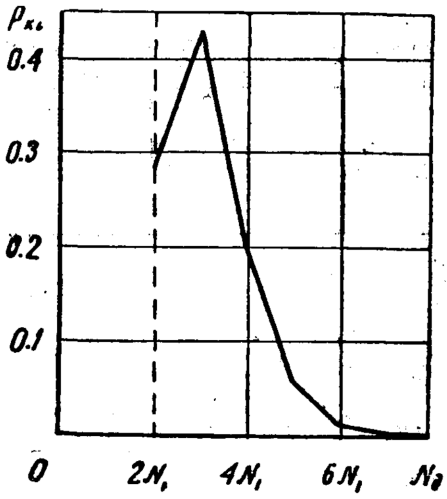


Рис. 3. Вероятность аварийного отключения потребителей электроэнергии, $z=4$.

Уравнение (15) решается графическим способом. В результате находится оптимальный судоходный расход при условии компенсации возможного дефицита гидроэнергии аварийным резервом энергосистемы. Необходимая для этого мощность находится по выражению (14).

Рекомендуемый метод использования аварийного резерва во внутригодовом распределении зарегулированной отдачи из водохранилища снижает судоходный расход, но отвечает реальным условиям эксплуатации и минимуму издержек энерготранспортного комплекса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афонин Н. С. Надежность электроснабжения промышленных предприятий. М.— Л., Госэнергоиздат, 1958.

2. Елохин Е. А. Резерв и расчетная обеспеченность энергоотдачи гидроэлектростанций. Проблемы регулирования речного стока, вып. 8. М., Изд-во АН СССР, 1959.

3. Захаров В. П., Чокин Ш. Ч. Основы методики определения расчетной обеспеченности работы ГЭС и гидроэнергосистемы. «Известия АН КазССР. Серия энергетическая», вып. 10. Алма-Ата, Изд-во АН КазССР, 1956.

4. Золотарев Т. Л. Гидроэнергетика. М.— Л., Госэнергоиздат, 1950.

5. Использование водной энергии. Под ред. Д. С. Щавелева. М.— Л., «Энергия», 1965.

6. Ким В. Я., Корнилова А. В., Паутов А. С. Оптимальное внутригодовое распределение зарегулированного стока каскада ГЭС при энерготранспортном его использовании. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 4. Алма-Ата, «Наука», 1966.

7. Ким В. Я., Корнилова А. В., Паутов А. С.. Выбор оптимального судоходного расхода при эксплуатации каскада водохранилищ. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 5. Алма-Ата, «Наука», 1967.

SUMMARY

The authors give grounds for the amount of emergency reserve used in operation of the power-transport multipurpose system to compensate possible shortage of electric power.

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
1970 ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА вып. 7

В. А. КИКТЕНКО, В. Г. ЛОГИНОВ

НОМОГРАММЫ МНОГОЛЕТНЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА НА ДВУХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ С РАЗНОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТЬЮ ($P_1=95\%$ и $P_2=75\%$)

Водохранилища многолетнего регулирования стока в большинстве случаев решают задачи комплексного использования водных ресурсов. Это позволяет полнее использовать речной сток по сравнению с водохранилищами, обслуживающими одного потребителя. Такая схема регулирования особенно целесообразна для районов, бедных водными ресурсами, подобных равнинному Казахстану.

В условиях равнинного Казахстана водохранилища предназначаются в основном для водоснабжения промышленных районов, а также правильного орошения пригородных земель. Эти потребители воды предъявляют существенно различные требования в отношении надежности водоподачи. Так, промводоснабжение является более ответственным потребителем, и потому для него норматив обеспеченности плановой отдачи по числу бесперебойных лет принимается высоким — порядка 95—97% [5]. Наоборот, для ирригации потребителя менее ответственного, указанный норматив колеблется в довольно широких пределах (50—90%). Расчетная схема регулирования стока при этом должна учитывать соответствующие правила эксплуатации водохранилища, гарантирующие соблюдение принятых нормативов обеспеченности для обоих потребителей воды.

В условиях районов с напряженным водохозяйственным балансом указанная схема регулирования позволяет также выявить возможные варианты распределения зарегулированной отдачи водохранилища между двумя потребителями с различными расчетными нормативами обеспеченности. Теоретически строгие способы расчетов многолетнего регулирования стока на две ступени отдачи с разной обеспеченностью являются достаточно сложными. Однако современные математические методы водохозяйственных расчетов (численные и аналитические) открывают большие возможности их практической реализации (8, 11 и др.). Большинство же существующих расчетных приемов реализации рассматриваемой схемы регулирования не имеют должного теоретического обоснования, т. е. являются приближенными (1, 2, 3, 9 и др.).

Внедрение в практику проектирования строгих методов расчета комплексных водохранилищ, в силу большой трудоемкости вычислений, требует их номографирования. Только располагая номограммами, очевидно, можно быстро и довольно просто выполнять многовариантные расчеты, связанные с установлением параметров водохранилищ двухцелевого хозяйственного назначения.

Номограммы для расчета водохранилищ, обслуживающих двух потребителей, впервые составлены Д. В. Коренистовым и В. Р. Козаком применительно к региональным гидрологическим условиям Донбасса (опубликованы в работе [12]). Они позволяют выполнять расчеты регулирования только для рек, характеризуемых коэффициентом вариации годового стока $C_v=0{,}4\div0{,}7$, и к тому же при некотором типовом гидро-

графе (55% стока приходятся на 2 весенних месяца и 45% — на остальные 10 месяцев). Существенной особенностью их является снижение на 20% нормальной отдачи для ирригации за пределами ее расчетной обеспеченности.

Предлагаемая принципиальная схема двухступенного регулирования стока заключается в следующем.

Пусть β — многолетняя емкость водохранилища, а β_∂ — многолетняя диспетчерская емкость. Для промежутка наполнений $\beta_\partial \leqslant x \leqslant \beta$ отдача назначается повышенной α_2, для промежутка же $0 \leqslant x \leqslant \beta_\partial$ — пониженной α_1 (рис. 1). Обеспеченность пониженной отдачи P_1 предполагается более высокой, чем для повышенной отдачи P_2.

Такая расчетная схема регулирования стока позволяет довольно просто учесть самые различные соотношения между объемами потребления для промышленного водоснабжения и ирригации (при любом снижении водоподачи для последней за пределами ее обеспеченности P_2).

Так в предельном случае при полном отключении ирригационного потребителя (за пределами обеспеченности P_2) параметры отдачи α_1 и α_2 будут:

$$\alpha_1 = \alpha_{\text{вод}} \text{ и } \alpha_2 = \alpha_{\text{вод}} + \alpha_{\text{ирр}},$$

где $\alpha_{\text{вод}}$ — плановый объем водоподачи для наиболее ответственного потребителя (водоснабжения),

$\alpha_{\text{ирр}}$ — то же для менее ответственного потребителя воды (ирригации).

В реальных условиях полное отключение менее ответственного потребителя (за пределами его обеспеченности) обычно не допускается. Поэтому при установлении параметра α_1 необходимо учитывать также и сниженную подачу воды менее ответственному потребителю $\alpha_{\text{ирр. сн}}$ (с обеспеченностью P_1). В этом случае параметры α_1 и α_2 должны устанавливаться следующим образом:

$$\alpha_1 = \alpha_{\text{вод}} + \alpha_{\text{ирр. сн}}; \quad \alpha_2 = \alpha_{\text{вод}} + \alpha_{\text{ирр}}. \tag{1}$$

Заметим, что размер снижения водоподачи на ирригацию должен устанавливаться особо в каждом конкретном случае.

Изложенная принципиальная схема регулирования стока явилась основой для составления номограмм вида $\beta = f(\alpha_1, \alpha_2)$ и $\beta_\partial = \varphi(\alpha_1, \alpha_2)$ при некоторых фиксированных значениях P_1 и P_2, а также параметров стока. Численные значения указанных параметров приняты следующие: $P_1 = 95\%$, $P_2 = 75\%$, $C_v = 0{,}4$, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9 и 1,0 и $C_s = 2C_v$ (коэффициент корреляции между стоком смежных лет $r = 0$).

Опорные точки определялись по численному методу расчетов регулирования стока на двух потребителей с разной обеспеченностью. Расчет этот изложен в работе [8], являющейся развитием обобщенной теории С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля — А. Д. Саваренского [9, 13].

Особенностью алгоритма указанной расчетной схемы является необходимость построения безусловных кривых наполнений водохранилища, дающих возможность определять два значения обеспеченности $\Phi(0)$ и $\Phi(\beta_\partial)$, отвечающие соответственно наполнениям $x = 0$ и $x = \beta_\partial$ (рис. 1).

При реализации обобщенной теории многолетнего регулирования стока по численному методу абсциссы безусловной кривой обеспеченности наполнений водохранилища определяются по формуле [6, 8]

$$\Phi_s(x_i) = \sum_{j=0}^{n} F_{ij} \cdot \Delta P_{j,\, s-1} \tag{2}$$

где s — индекс года регулирования ($s = 1, 2, \ldots$),

F_{ij} — вероятность расчетного стока в объеме $\geqslant k_{ij}$,

ΔP_j — частная вероятность начального наполнения.

Функция обеспеченности стока принята соответствующей распределению К. Пирсона III типа (при $C_s = 2C_v$), т. е.

$$F(k) = 1 - \frac{\gamma^\gamma}{\Gamma(\gamma)} \int_0^k e^{-\gamma k} k^{\gamma-1}\, dk, \tag{3}$$

где $\gamma = \frac{1}{C_v^2}$ — параметр,

$\Gamma(\gamma)$ — гамма-функция.

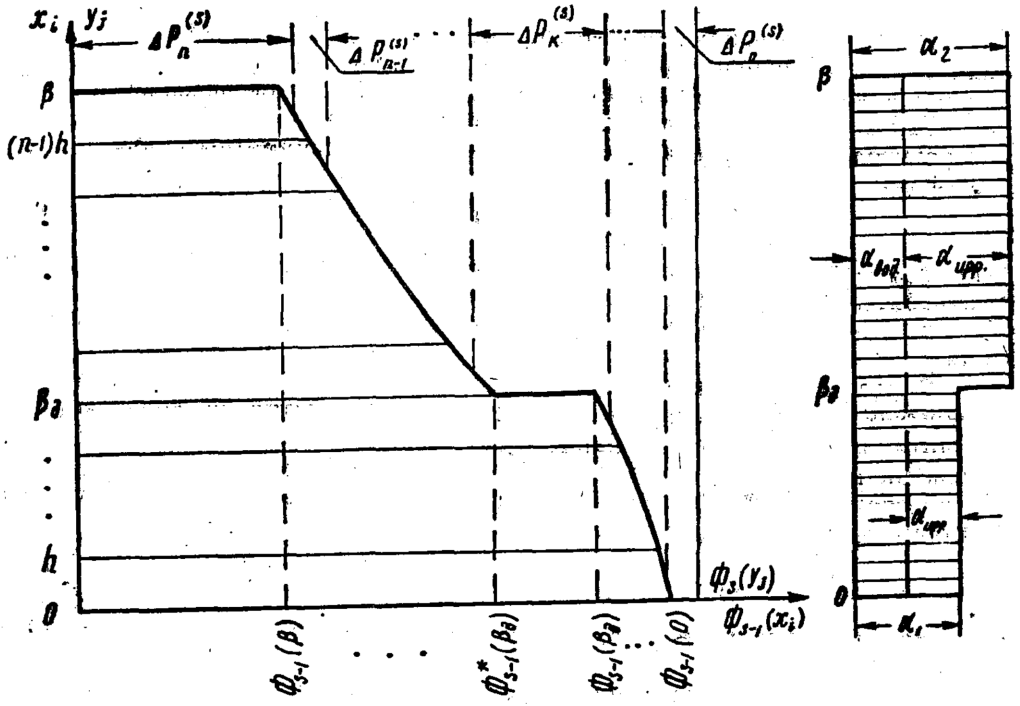


Рис. 1. К схеме регулирования стока на двух водопотребителей.

Расчетный сток k_{ij} определяется из уравнений годового баланса водохранилища соответственно для двух промежутков изменения аргумента x, а именно:

$$\left.\begin{aligned} k_{ij} &= x_i - y_j + \alpha_1; \ (0 \leqslant x \leqslant \beta_\partial) \\ k_{ij} &= x_i - y_j + \alpha_2; \ (\beta_\partial \leqslant x \leqslant \beta) \\ (i \text{ и } j &= 0, 1, 2, \ldots, m, \ldots n). \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

Для вычисления частных вероятностей начальных наполнений ΔP_j использована следующая система итерационных формул [6, 8] (рис. 1):

$$\left.\begin{aligned} \Delta P_0^{(s)} &= 1 - \frac{\Phi_{s-1}(0) + \Phi_{s-1}\left(\frac{\beta}{n}\right)}{2}; \\ \Delta P_m^{(s)} &= \frac{\Phi_{s-1}(x_{m-1}) - \Phi_{s-1}(x_{m+1})}{2}; \\ (m &= 1, 2, \ldots, k-1, k+2, \ldots, n-1); \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

$$\left.\begin{aligned}
\Delta P_k^{(s)} &= \frac{\Phi_{s-1}(x_{k-1}) + \Phi_{s-1}(\beta_\partial) - \Phi^*_{s-1}(\beta_\partial) - \Phi_{s-1}(x_{k+1})}{2};\\
\Delta P_{k+1}^{(s)} &= \frac{\Phi^*_{s-1}(\beta_\partial) - \Phi_{s-1}(x_{k+2})}{2};\\
\Delta P_n^{(s)} &= \frac{\Phi_{s-1}(x_{n-1}) + \Phi_{s-1}(\beta)}{2}.
\end{aligned}\right\} \quad (5)$$

Процесс вычислений по формуле (2) продолжается до тех пор, пока не стабилизируются функции $\Phi_s(x_1)$, т. е. до соблюдения условия: $|\Phi_s(x_i) - \Phi_{s-1}(x_i)| \leqslant \varepsilon$, где ε — заданная точность расчета.

Для машинной реализации расчетного алгоритма, согласно формулам (2) — (5), составлена программа счета (применительно к ЭВМ «Минск-2»).

Последовательность определения любой опорной точки номограммы сводится к следующему. При фиксированных значениях C_v, α_1, α_2, β_0 подбирается такое значение β, при котором обеспеченность отдачи α_1 будет равна $P_1 = 0{,}95 \pm \varepsilon$. При этом обеспеченность повышенной отдачи $P_2 = \Phi^*(\beta_\partial)$ (рис. 1), как правило, не будет совпадать с ее расчетной обеспеченностью. Изменяя многолетнюю диспетчерскую емкость β_∂, получаем ряд значений обеспеченности P_2, отвечающих вполне определенной величине β (при фиксированных отдачах α_1 и α_2, а также обеспеченности $P_1 = 0{,}95$).

В таблице 1 приведены результаты определения на ЭВМ вспомогательных значений β, β_∂ и P_2 для одной опорной точки номограммы (при фиксированных параметрах P_1 и C_v).

Искомые значения β и β_∂ находятся путем графической интерполяции при $P_2 = 0{,}75$ (рис. 2).

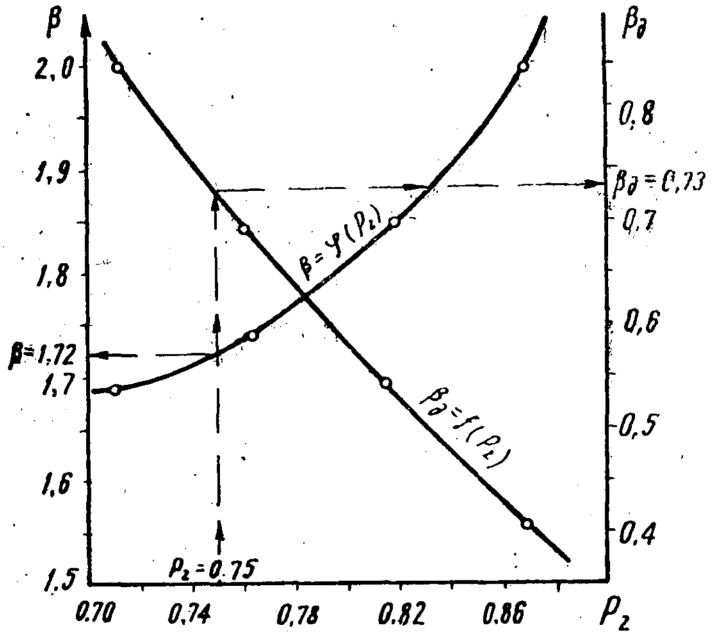


Рис. 2. Графическое определение координат опорной точки номограммы при $P_1 = 0{,}95$ и заданных значениях α_1 и α_2.

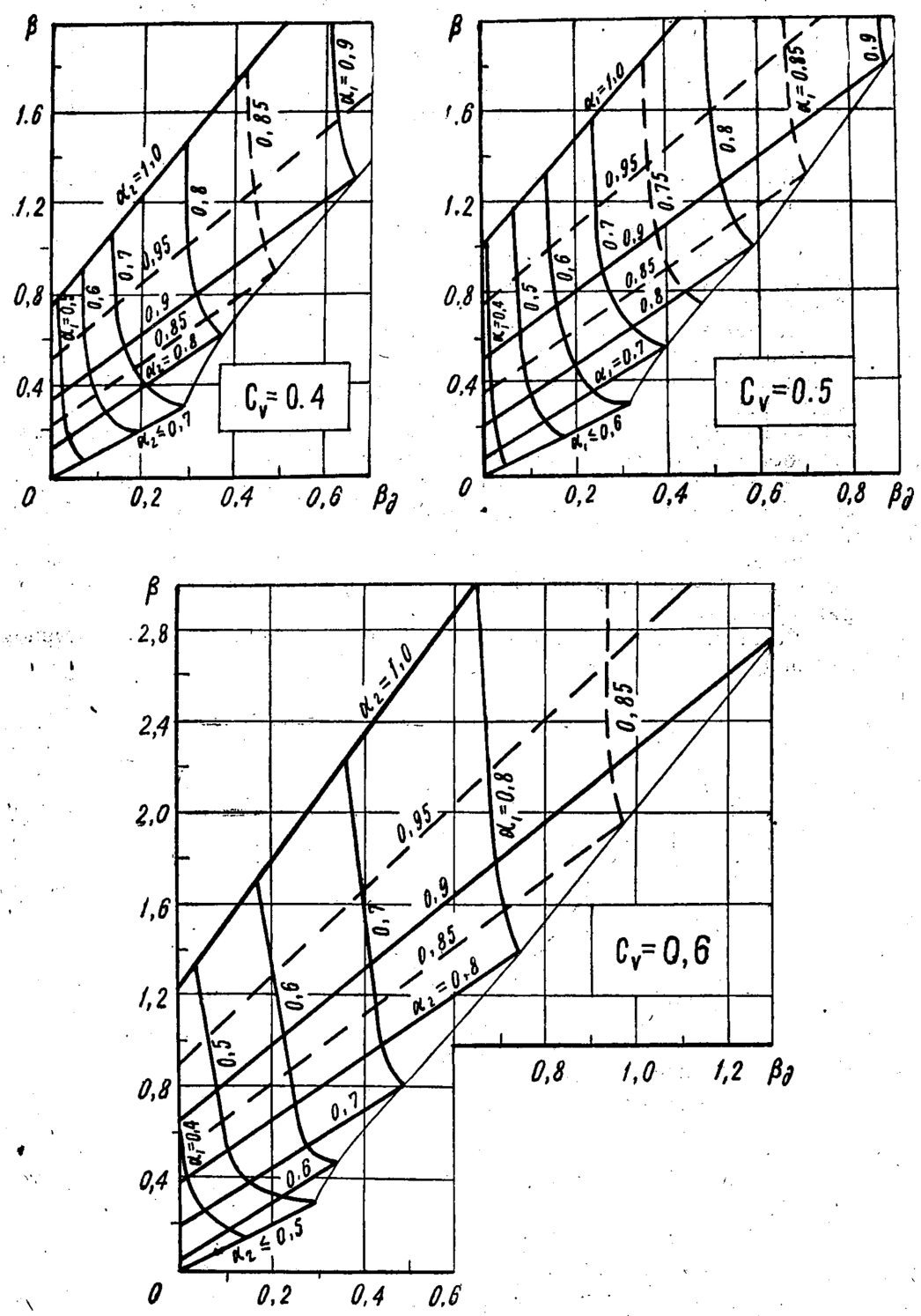


Рис. 3. Номограммы вида $\beta=f(\alpha_1;\ \alpha_2)$ и $\beta_\partial=\varphi(\alpha_1;\ \alpha_2)$. (при $P_1=95\%$, $P_2=75\%$).

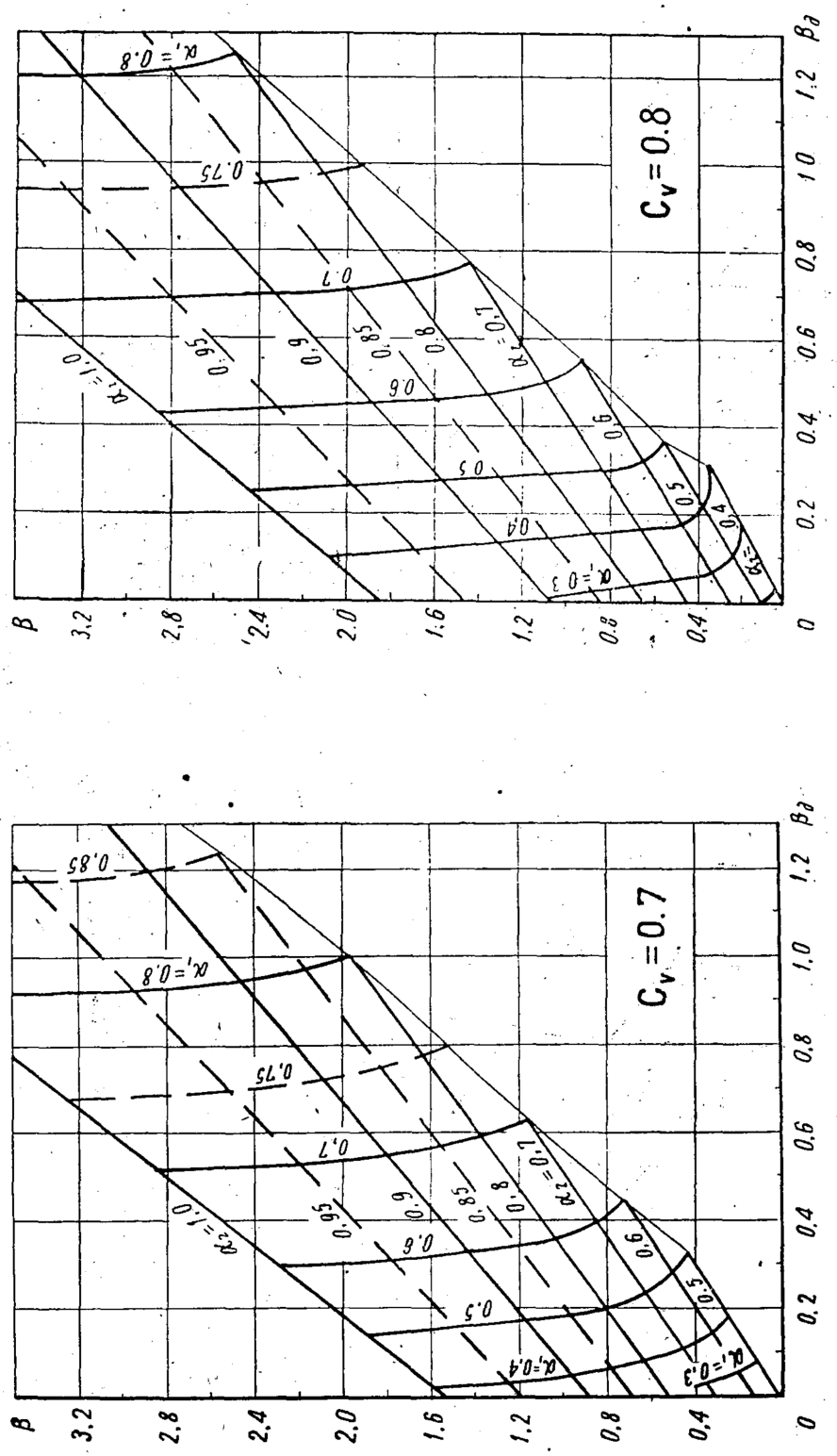


Рис. 4. Номограммы вида $\beta = f(\alpha_1; \alpha_2)$ и $\beta_0 = \varphi(\alpha_1; \alpha_2)$ (при $P_1 = 95\%$, $P_2 = 75\%$).

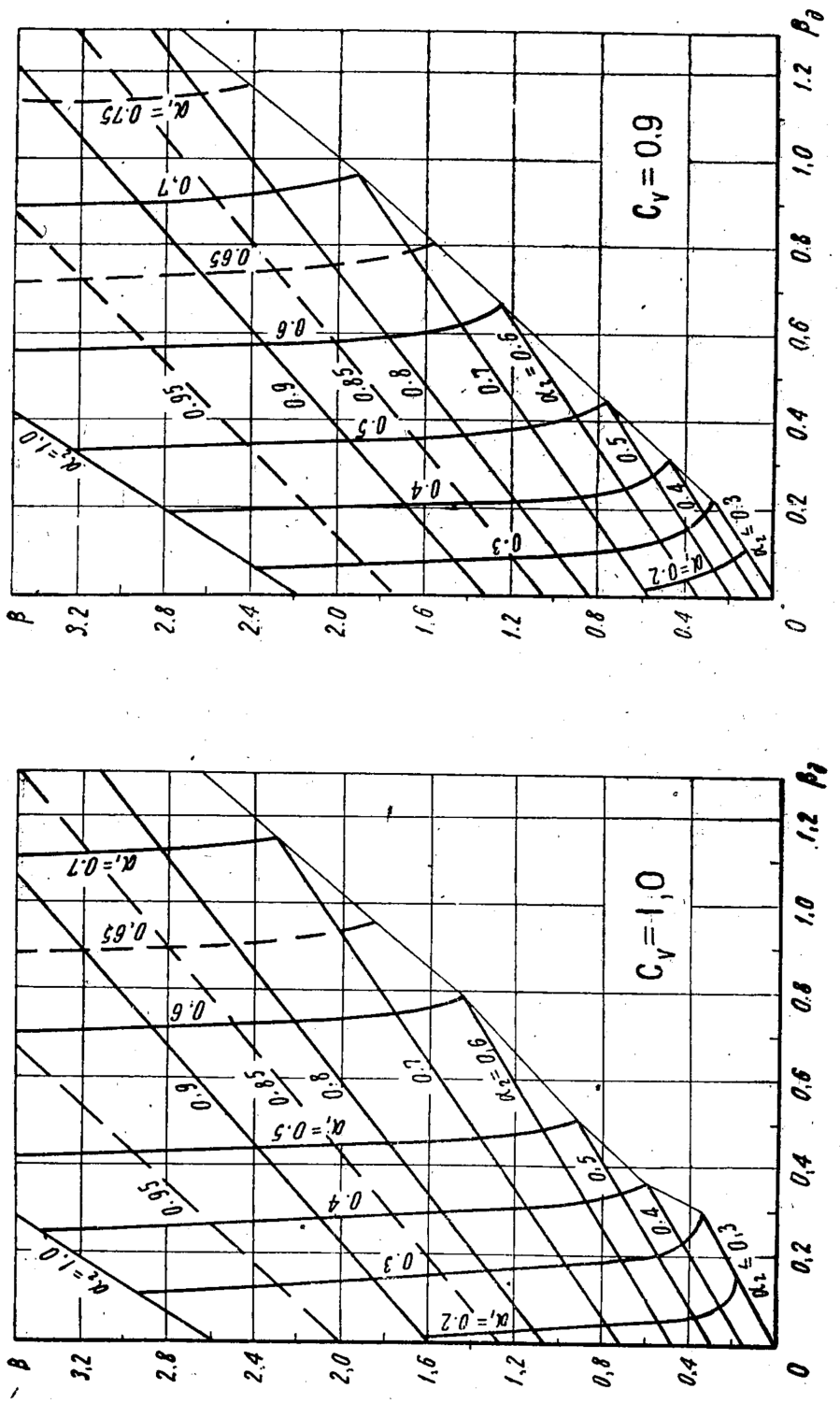


Рис. 5. Номограммы вида $\beta = f(\alpha_1; \alpha_2)$ и $\beta_\partial = \varphi(\alpha_1; \alpha_2)$ (при $P_1 = 95\%$, $P_2 = 75\%$).

Таблица 1

Результаты машинного счета для одной точки номограммы (при $P_1=95\%$ и $C_v=0{,}8$)

α_1	α_2	β	β_∂	P_2
0,7	0,8	1,99	0,401	0,869
„	„	1,84	0,542	0,818
„	„	1,74	0,696	0,763
„	„	1,69	0,845	0,710

Полученные вышеуказанным путем координаты опорных точек сведены в таблицу 2, по данным которой построена серия расчетных номограмм (рис. 3—5).

Таблица 2

Координаты опорных точек расчетных номограмм виды $\beta=f[\alpha_1, \alpha_2]$ и $\beta_\partial=\varphi[\alpha_1, \alpha_2]$ при $P_1=95\%$ и $P_2=75\%$

α_1	α_2	$C_v=0{,}4$		$C_v=0{,}5$		$C_v=0{,}6$		$C_v=0{,}7$		$C_v=0{,}8$		$C_v=0{,}9$		$C_v=1{,}0$	
		β	β_∂	β	β_∂	β	β_∂	β	β_∂	β	β_∂	β	β_∂	β	β_∂
0,3	0,3									0,18	0,18	0,28	0,22	0,34	**0,30**
„	0,4									0,20	0,18	0,32	0,19	0,42	0,23
„	0,5									0,24	0,11	0,40	0,17	0,54	0,20
„	0,6									0,33	0,07	0,52	0,13	0,71	0,19
„	0,7									0,50	0,05	0,73	0,11	0,96	0,18
„	0,8									0,70	0,04	1,00	0,09	1,32	0,16
„	0,9									1,08	0,01	1,47	0,08	1,85	0,14
0,4	0,4			0,05	0,05	0,15	0,15	0,23	0,22	0,34	0,31	0,48	0,31	0,60	0,36
„	0,5			0,05	0,05	0,15	0,15	0,25	0,18	0,37	0,22	0,56	0,28	0,71	**0,34**
„	0,6			0,05	0,05	0,18	0,11	0,33	0,14	0,46	0,17	0,68	0,25	0,87	0,32
„	0,7			0,12	0,04	0,27	0,06	0,46	0,11	0,65	0,16	0,90	0,23	1,15	0,31
„	0,8			0,26	0,03	0,41	0,02	0,64	0,08	0,87	0,15	1,19	0,22	1,54	0,30
„	0,9			0,54	0,02			0,96	0,05	1,30	0,13	1,70	0,21	2,09	0,28
„	0,95			0,77	0,01			1,25	0,03	1,69	0,12				
„	1,0			1,03	0,01			1,58	0,02	2,08	0,10				
0,5	0,5	0,06	0,06	0,17	0,17	0,30	0,30	0,43	0,32	0,55	0,37	0,78	0,45	0,90	0,51
„	0,6	0,06	0,06	0,17	0,17	0,32	0,22	0,50	0,28	0,65	0,34	0,91	0,42	1,07	0,49
„	0,7	0,07	0,06	0,24	0,13	0,38	0,15	0,63	0,23	0,83	0,30	1,12	0,39	1,36	0,47
„	0,8	0,17	0,04	0,36	0,10	0,53	0,11	0 81	0,20	1,08	0,29	1,43	0,37	1,78	0,46
„	0,9	0,38	0,03	0,64	0,08	0,79	0,08	1,17	0,17	1,56	0,28	1,96	0,36	2,38	0,44
„	0,95	0,55	0,02	0,87	0,07	1,02	0,06	1,49	0,15	1,97	0,26				
„	1,0	0,79	0,02	1,17	0,07	1,34	0,03	1,89	0,14	2,44	0,25				
0,6	0,6	0,18	0,18	0,32	0,32	0,48	0,35	0,72	0,45	0,92	0,55	1,25	0,66	1,44	0 79
„	0,7	0,19	0,18	0,37	0,24	0,54	0,27	0,84	0,40	1,07	0,50	1,44	0,62	1,75	0,75
„	0,8	0,28	0,12	0,48	0,19	0,74	0,25	1,05	0,36	1,35	0,47	1,78	0,59	2,22	0,73
„	0,9	0,47	0,09	0,75	0,16	1,04	0,23	1,43	0,33	1,87	0,45	2,36	0,58	2,86	0,71
„	0,95	0,63	0,08	1,00	0,15	1,30	0,21	1,79	0,31	2,32	0,44				
„	1,0	0,90	0,07	1,33	0,14	1,70	0,17	2,29	0,30	2,82	0,43				
0,7	0,7	0,32	0,29	0,55	0,39	0,81	0,49	1,15	0,63	1,43	0,77	1,92	0,96	2,30	1,15
„	0,8	0,40	0,20	0,65	0,32	0,99	0,44	1,37	0,59	1,72	0,73	2,30	0,93	2,84	1,13
„	0,9	0,57	0,16	0,90	0,26	1,34	0,42	1,80	0,55	2,33	0,70	2,93	0,90	3,58	1,11
„	0,95	0,75	0,15	1,17	0,25	1,66	0,40	2,20	0,53	2,80	0,69				
„	1,00	1,07	0,13	1,56	0,24	2,24	0,36	2,85	0,52	3,46	0,68				

Продолжение

α_1	α_2	$C_v=0,4$		$C_v=0.5$		$C_v=0,6$		$C_v=0,7$		$C_v=0,8$		$C_v=0,9$		$C_v=1,0$	
		β	β_∂	β	β_∂	β	β_∂	β	β_∂	β	β_∂	β	β_∂	β	β_∂
0,8	0,8	0,63	0,37	1,00	0,59	1,40	0,74	1,96	1,00	2,50	1,25				
„	0,9	0,80	0,32	1,27	0,52	1,79	0,70	2,46	0,95	3,22	1,20				
„	0,95	1,04	0,31	1,58	0,50	2,18	0,68	2,95	0,93						
„	1,00	1,49	0,30	2,10	0,48	3,01	0,65								
0,85	0,85	0,90	0,49	1,30	0,71	1,96	0,97								
„	0,90	1,02	0,47	1,50	0,68	2,20	0,95								
„	0,95	1,25	0,44	1,86	0,66	2,65	0,93								
0,90	0,90	1,30	0,67	1,80	0,87										
„	0,95	1,57	0,63												
„	1,00	2,25	0,61												

Номограммы позволяют решать следующие задачи:

1. При заданных значениях C_v, α_1, α_2 определять необходимую многолетнюю емкость водохранилища β, а также многолетнюю диспетчерскую емкость β_∂.

2. При заданных C_v, β, β_∂ определять значения α_1 и α_2.

3. При заданных C_v, β, α_1 (или α_2) определять β_∂, α_2 (или α_1).

Проиллюстрируем пользование номограммами на числовом примере. Дано: $C_v=0,80$, $\alpha_{вод}=0,30$, $\alpha_{ирр}=0,50$ (при $\alpha_{ирр\ сн}=0,35$, что соответствует снижению нормальной подачи воды на ирригацию за пределами ее расчетной обеспеченности на 30%). Требуется определить β и β_∂.

Решение. По формуле (1) определяем параметры $\alpha_1=0,30+0,35=0,65$ и $\alpha_2=0,30+0,50=0,80$. На номограмме, соответствующей заданному значению $C_v=0,8$ (рис. 4), находим точку пересечения линий $\alpha_2=0,80$ и $\alpha_1=0,65$ (последняя находится путем интерполяции). Ордината этой точки соответствует искомому значению $\beta=1,55$, а ее абсцисса — $\beta_\partial=0,60$.

Аналогично решаются и другие задачи. Сезонная составляющая емкости определяется при этом обычными приемами [9, 12].

Для рек казахстанского типа питания возможно установление всей полезной емкости водохранилища β_Σ и полной диспетчерской емкости $\beta_{\partial\Sigma}$, которые приближенно будут равны:

$$\beta_\Sigma = \beta + \alpha_2;$$

$$\beta_{\partial\Sigma} = \beta_\partial + \alpha_1.$$

На рис. 6 показана принципиальная схема диспетчерского графика, регламентирующего порядок перехода с одной ступени отдачи на другую (без учета потерь и в предположении равномерного распределения отдачи для $\alpha_{вод}$ — на протяжении всего года, а для $\alpha_{ирр}$ — в течение лишь пяти месяцев вегетационного периода).

Нетрудно заметить, что для рассматриваемой расчетной схемы форсированная сработка водохранилища совпадает с периодом наибольших потерь на испарение с его водной поверхности (май—сентябрь). В остальную же часть года (октябрь — апрель), когда из водохранилища забирается вода лишь в объеме $\alpha_{вод}$, эти потери будут незначительными. Указанное обстоятельство весьма благоприятно для условий равнинного

Казахстана, так как позволяет существенно увеличить полезную отдачу водохранилищ.

На основе обобщения расчетных данных, использованных для построения номограмм, получены следующие эмпирические формулы:

а) для многолетней емкости

$$\beta = \beta_{\alpha_2 P_2} + \frac{\beta_{\alpha_1 P_1}}{\beta_{\alpha_2 P_1}} \left[\beta_{\alpha_2 P_1} - \beta_{\alpha_2 P_2} \right]; \qquad (6)$$

б) для многолетней диспетчерской емкости

$$\beta_д = \frac{\beta_{\alpha_1 P_1}}{\beta_{\alpha_2 P_1}} \left[\beta_{\alpha_2 P_1} - \beta_{\alpha_2 P_2} \cdot \left(1 + \frac{P_2}{P_1} \right) \right]. \qquad (7)$$

Индексы указывают: какой отдаче и обеспеченности отвечают значения параметра β по существующим графикам для одного потребителя [4, 12 и др.].

Значения многолетней емкости водохранилища β, определенные согласно принятому для номографирования расчетному методу, приведены в таблице 3. В ней указаны также и емкости, вычисленные по эмпирическим формулам (6) и (7).

Как видно, эмпирическая формула (6), в пределах исследованного диапазона изменения коэффициента $C_v = 0{,}4 \div 1{,}0$ дает в общем хорошее согласие с обобщенным методом расчета (максимальное отклонение менее 5 процентов).

Таблица 3

Параметры β и $\beta_д$, определенные по различным способам (при $P_1 = 95\%$ и $P_2 = 75\%$)

C_v	α_1	α_2	По номограммам		По формулам (6) и (7)	
			β	$\beta_д$	β	$\beta_д$
1,0	0,40	0,70	1,14	0,31	1,15	0,29
»	0,50	0,70	1,36	0,47	1,41	0,44
»	0,60	0,70	1,76	0,75	1,80	0,71
0,8	0,50	0,80	1,08	0,29	1,07	0,29
»	0,60	0,80	1,34	0,47	1,33	0,49
»	0,70	0,80	1,74	0,73	1,73	0,75
0,6	0,50	0,70	0,39	0,15	0,42	0,16
»	0,60	0,80	0,74	0 25	0,75	0,25
»	0,70	0,90	1,34	0,42	1,27	0,42
»	0,80	0,90	1,80	0,70	1,71	0,74

Таблица 4

Сопоставление многолетних емкостей β и $\beta_д$, определенных по обобщенному методу и согласно формулам (6) и (7) при $P_1 = 94—96\%$ и $P_2 = 77—86\%$

C_v	P_1	P_2	α_1	α_2	По обобщенному методу		По формулам (6) и (7)	
					β	$\beta_д$	β	$\beta_д$
0,4	0,95	0,81	0,8	0,9	0,86	0,25	0,87	0,23
0,4	0,95	0,86	0,7	0,8	0,43	0,07	0,46	0,05
0,6	0,96	0,80	0,6	0,8	0,86	0,25	0,89	0,25
0,8	0,95	0,80	0,5	0,7	0,91	0,24	0,96	0,22
0,8	0,95	0,78	0,6	0,8	1,40	0,41	1,45	0,39
0,8	0,94	0,77	0,5	0 8	1,07	0,21	1.11	0,20
0,8	0,96	0,81	0,6	0,7	1,21	0,45	1,27	0,41
1,0	0,95	0,80	0,4	0,7	1,23	0,22	1,28	0,19

Контрольные расчеты подтверждают в целом приемлемую точность эмпирических формул (6) и (7) также и при некоторых других значениях P_1 и P_2 — таблица 4.

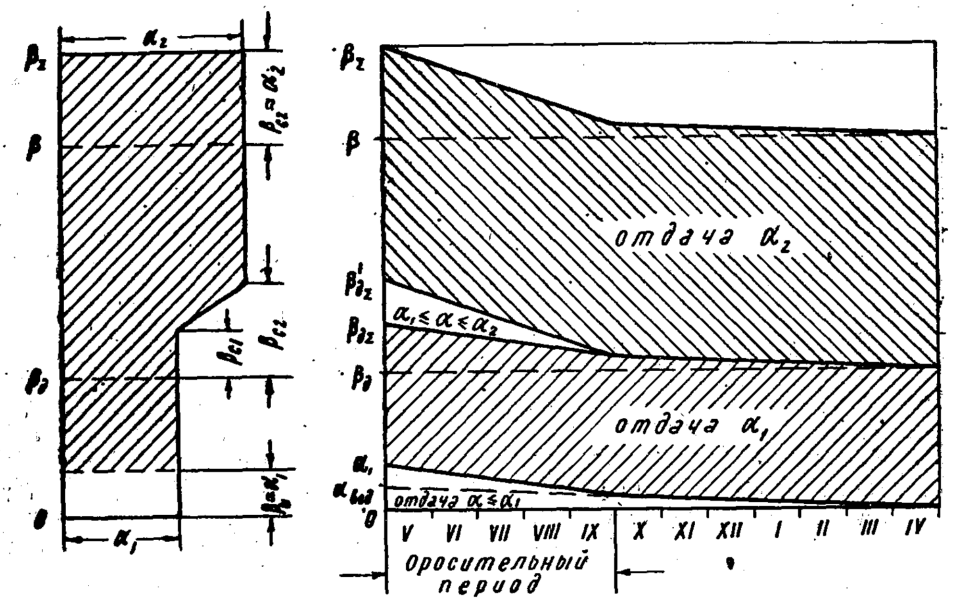


Рис. 6. Диспетчерский график при 2 ступенях отдачи водохранилища (для условий рек казахстанского типа питания).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахтиаров В. А. Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты. Л., Гидрометеоиздат, 1961.

2. Ваганов М. Н., Лаврентьева Л. Д. Упрощенный способ распределения отдачи водохранилища между водопотребителями разной обеспеченности. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 4. Алма-Ата, «Наука», 1966.

3. Вутке Н. П. Вопросы эксплуатации водохранилищ при их переменной комбинированной водоотдаче. Техническая информация по водоснабжению и канализации промышленных предприятий. Водоканалпроект, 1956.

4. «Гидротехническое строительство». 1966, № 11.

5. Гильденблат Я. Д., Козак В. Р. О выборе обеспеченности при расчете водохранилищ для промышленного водоснабжения. Проблемы регулирования речного стока, вып. 4. Изд-во АН СССР, 1950.

6. Захаров В. П., Чокин Ш. Ч. Обобщенный прием практических расчетов многолетнего регулирования стока. «Гидротехническое строительство», 1950, № 3.

7. Захаров В. П., Чокин Ш. Ч. и др. Перспективный водохозяйственный баланс Казахстана и пути его увязки. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 5. Алма-Ата, «Наука», 1967.

8. Киктенко В. А. Обобщенный расчет многолетнего регулирования стока на двух потребителей с разной обеспеченностью отдачи (методом интегральных уравнений). Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 4. Алма-Ата, «Наука», 1966.

9. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Водохозяйственные расчеты. Л., Гидрометеоиздат, 1952.

10. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Использование водных ресурсов рек засушливых областей. «Труды III Всесоюзного гидрологического съезда», т. 6. Л., Гидрометеоиздат, 1959.

11. Никитин Н. С. Основы гидроэнергетических расчетов. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.

12. Плешков Я. Ф. Регулирование речного стока. Л., Гидрометеоиздат, 1961.

13. Саваренский А. Д. Регулирование речного стока водохранилищами, М., Изд-во АН СССР, 1951.

SUMMARY

The algorithm and method for plotting nomographic design charts of long-term runoff control for two water consumers with different yield frequency are considered basing on the generalized theory. Decrease of water delivery extent to a less important consumer (beyond its design frequency) is not regulated.

The nomograms are plotted in conformity with frequency standards $P_1=95\%$ and $P_2=75\%$ for a rather wide range of variation of runoff parameters (with $Cs=2Cv$ and $r=0$).

Empirical formulas for approximate determination of longterm storages are suggested.

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
1970 *ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА* вып. 7

III. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ И ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

А. П. БРАСЛАВСКИЙ, Н. П. КАПИТОНОВА, Г. В. КОРОТКИХ, Б. А. КРАСНОВ, К. Б. ШЕРГИНА

МЕТОДИКА СОСТАВЛЕНИЯ ВОДНОГО БАЛАНСА ВОДОХРАНИЛИЩ

(на примере водохранилища Бухтарминской ГЭС)

В настоящее время еще нет общепринятых достаточно надежных способов определения всех слагаемых водного баланса водохранилищ, находящихся в различных физико-географических условиях. Вместе с тем недостаточная точность оценки даже одного из слагаемых этого баланса наносит существенный народнохозяйственный ущерб. Так, например, ошибка в величине годового слоя испарения воды с поверхности Бухтарминского водохранилища только на 10% вызывает около 1 млн. руб./год ущерба из-за появления незапланированного дефицита электроэнергии.

Бухтарминское водохранилище, обладающее рядом особенностей морфометрии и гидрологического режима, является весьма интересным объектом для постановки исследований по методике определения ряда слагаемых водного баланса водохранилищ. Водный баланс Бухтарминского водохранилища составляется впервые после начала его эксплуатации и поэтому имеет не только научный, но и практический интерес.

Водохранилище Бухтарминской ГЭС — крупнейшее в Казахстане, емкость его достигает 53 *км*^{3} и площадь зеркала — 5000 *км*^{2}. Оно осуществляет почти полное многолетнее регулирование стока р. Иртыш. Расположено водохранилище в зоне полупустынь и сухих степей в восточной части Казахстана и простирается более чем на 300 *км* с севера на юг.

Уравнение водного баланса Бухтарминского водохранилища, в отличие от обычной формы записи, рассматривалось как равенство приходной и расходной частей его, отнесенных к створу гидроузла. Поэтому объем сработки водохранилища отнесен к приходной части баланса, а объем накопления — к расходной, поскольку за счет сработки водохранилища к створу гидроузла поступает дополнительный объем воды с площади водосбора, а на аккумуляцию в водохранилище при повышении его уровня расходуется некоторый объем воды, который прошел бы через створ гидроузла, если бы накопления в водохранилище не происходило. Учитывая эти обстоятельства, уравнение водного баланса записано в следующем виде:

$$V_{\text{п}} + V_{\text{пн}} + V_{\text{ос}} + V_{\text{зл}} + \Delta V_{\text{сраб}} = V_{\text{с}} + V_{\text{ис}} + V_{\text{ис. з}} + V_{\text{ор}} + V_{\text{л}} + \Delta V_{\text{накоп}} \quad (1)$$

где $V_{\text{п}}$ — приток воды к периметру водохранилища, определяемый как сумма гидрометрически измеренного стока рек, впадающих в водохранилище, $V_{\text{пн}}$ —приток воды поверхностным и подземным путем с той части площади водосбора, сток с которой не охвачен гидрометрическими измерениями, и подрусловый сток тех рек, где гидрометрические измерения стока в русле производились («боковая приточность»), $V_{\text{ос}}$ — объем воды, поступающий в виде атмосферных осадков на поверхность водохранилища, $V_{\text{зл}}$ —объем воды в снего-ледяном покрове, лежащем выше ее уровня на берегах водохранилища и затапливаемом при весеннем

подъеме уровня водохранилища, $\Delta V_{сраб}$ — объем сработки водохранилища при понижении его уровня, включая и сработку воды из насыщенных водой грунтов берега водохранилища, $V_с$ — сток воды через створ Бухтарминского гидроузла (включая и подземный), $V_{ис}$ — объем воды, испаряющийся с поверхности водохранилища, включая транспирацию зарослями полупогруженных водных растений, $V_{ис.з}$ —объем воды, испаряющийся зимой с поверхности снеголедяного покрова водохранилища, $V_{ор}$ — потери воды на испарение с территории увлажненной сетью оросительных каналов, с площади зоны подтопления водохранилища и с поймы р. Иртыш на участке с. Буран — оз. Зайсан, $V_л$ — временные потери воды от оседайия снего-ледяного покрова на берегах водохранилища при понижении его уровня зимой; $\Delta V_{накоп}$ — объем воды, накопленный в водохранилище при повышении его уровня, включая и напитывание водой грунтов, окружающих чашу водохранилища.

При правильной постановке исследований водного баланса водохранилища необходимо независимо друг от друга определять все слагаемые баланса. Это позволяет проверять и анализировать методику оценки отдельных слагаемых по результатам замыкания баланса.

В таблице 1 дан перечень тех исследований и организационных мероприятий, которые необходимо было провести для полноценного изучения водного баланса Бухтарминского водохранилища. Однако из-за недостатка отпущенных средств программа исследований водного баланса Бухтарминского водохранилища была составлена в сокращенном виде. В ней предусматривалось усовершенствование методики определения только четырех слагаемых баланса: притока воды к периметру водохранилища, атмосферных осадков, испарения воды с его поверхности и изменения объема при наполнении и сработке его. Но и по этим слагаемым объем экспериментальных исследований был сведен к минимуму: постановке наблюдений за испарением на плавучем испарительном бассейне площадью 20 *кв. м** и изучению потерь воды на испарение из осадкомерных ведер. Эти исследования дали возможность уточнить расчетную формулу для определения потерь воды на испарение с поверхности Бухтарминского водохранилища с учетом разности температуры поверхности воды и воздуха над ней и разработать способ определения поправок к показаниям стандартных осадкомеров сети станций Гидрометслужбы за счет испарения из осадкомерных ведер.

Составление водного баланса производилось в основном по материалам наблюдений Бухтарминской гидрометеорологической обсерватории. Перечень необходимых исследований, приведенных в таблице 1, может быть полезным при постановке дальнейших исследований водного баланса Бухтарминского водохранилища.

Приток воды к периметру водохранилища

При определении величины притока в водохранилище стараются возможно полнее измерить сток воды рек, впадающих в него, и затем суммируют этот сток. Однако, как правило, охватить таким способом приток воды со всей площади водосбора водохранилища практически оказывается невозможным, и сток с неохваченной гидрометрическими измерениями площади водосбора приходится определять косвенными методами, чаще всего по какому-либо модулю стока. В оценке величины стока с этой площади водосбора и заключается основная трудность определения объема притока в водохранилище.

* Исследования проведены на уже существующем плавучем испарительном бассейне такой же площади, установленном на Кенгирском водохранилище.

Таблица 1

Научные исследования и организационные мероприятия, необходимые для полноценной разработки методики составления водного баланса Бухтарминского водохранилища

Наименование слагаемого водного баланса	Работы, необходимые для полноценного исследования данного слагаемого водного баланса	Организационные мероприятия, необходимые для выполнения исследований
Приток воды к периметру водохранилища	Гидрологическое районирование территории, сток с которой не охвачен гидрометрическими измерениями, с обследованием ее на местности; контрольные измерения расходов воды на действующих гидростворах, учитывающих приток воды в Бухтарминское водохранилище; измерение в течение 2—3 лет стока малых рек, впадающих в водохранилище и не имеющих постоянных гидростворов УГМС; определение подрусловой стока ряда рек, впадающих в водохранилище.	Экспедиционные работы по обследованию территории и измерению стока рек, впадающих в Бухтарминское водохранилище, организуемые на базе Бухтарминского гидрофизического стационара КазНИИЭ. Стационар должен быть снабжен транспортом — автомашиной, катером. Гидрогеологическая экспедиция по учету подрусловой стока рек, впадающих в Бухтарминское водохранилище.
Осадки, выпадающие на поверхность водохранилища в теплый и холодный периоды года	Постановка измерений осадков на островах и плавучих гидрометеорологических станциях («пунктах открытого моря») с целью получения сведений об уменьшении количества осадков над акваторией водохранилища в теплый период года по сравнению с окружающей сушей. Зимние снегомерные съемки на всей акватории водохранилища, включая и заросли тростника, с целью установления соотношения в запасе воды в снеге на водохранилище и на берегах его (по снегосъемкам и осадкомеру). Установление поправок к показаниям стандартных осадкомеров Третьякова.	Организация на базе Бухтарминского гидрофизического стационара КазНИИЭ систематической работы ряда осадкомерных пунктов на островах и плавучих гидрометеорологических станциях. Постановка на этом стационаре специальных исследований по определению ошибок осадкомера Третьякова. Выполнение снегосъемок на акватории Бухтарминского водохранилища с помощью вездехода, а также на берегах водохранилища по стандартной методике Гидрометслужбы.
Испарение воды с поверхности Бухтарминского водохранилища	Экспериментальные исследования процесса испарения на больших плавучих испарительных бассейнах с применением точных дистанционных автоматических приборов для измерения и регистрации всех гидрометеорологических элементов, влияющих на испарение, с целью получения материала для усовершенствования методики расчета испарения воды с поверхности Бухтарминского водохранилища. Изучение распределения температуры поверхности воды, скорости ветра, температуры и влажности воздуха над акваторией Бухтарминского водохранилища с помощью стационарных наблюдений на островных и плавучих гидрометеорологических станциях, а также термиче-	Организация плавучей и береговой испарительных установок на Бухтарминском гидрофизическом стационаре КазНИИЭ и в нижнем бьефе Бухтарминской ГЭС (для получения данных о процессе испарения при большой разнице температуры воды и воздуха). Оснащение их дистанционной автоматической измерительной аппаратурой. Организация специальных наблюдений за гидрометеорологическими элементами на ряде островных и плавучих гидрометеорологических станций. Ежедекадные термические съемки Бухтарминского водохранилища с помощью двух катеров озерного типа. Организация работы снегоиспарительной установки с автоматической регулировкой температуры поверхности снега.

Продолжение

Наименование слагаемого водного баланса	Работы, необходимые для полноценного исследования данного слагаемого водного баланса	Организационные мероприятия, необходимые для выполнения исследований
	ских съемок всей акватории водохранилища с целью получения исходных данных для разработки методики определения гидрометеорологических элементов, необходимых для расчета испарения. Постановка исследований испарения с поверхности снего-ледяного покрова водохранилища.	
Потери воды на транспирацию и испарение с зарослей полупогруженной водной растительности (тростники, рогоз и др.)	Экспериментальные работы по определению транспирации и испарения с зарослей тростника и других полупогруженных водных растений в дельте р. Черный Иртыш или в западной части оз. Зайсан с помощью больших плавучих испарителей-транспираторов и транспираторов стандартного (малого) размера, теплового баланса и метода быстрого взвешивания срезанных листьев или стеблей растений с одновременной регистрацией всех гидрометеорологических элементов, влияющих на транспирацию и испарение, с применением дистанционной автоматической аппаратуры. Цель исследования — установление соотношения между потерями воды на испарение с поверхности чистой воды и суммарного испарения с зарослей растений.	Организация плавучей испарительно-транспирационной установки на оз Зайсан с транспираторами различного размера и специальной дистанционной автоматической аппаратурой для измерения и записи радиационного баланса и всех гидрометеорологических элементов. Снабжение этой установки электрическим током, обеспечение сообщения ее с базой при помощи катера озерного типа. Проведение экспедиционных полевых работ на такой установке в течение 2—3 лет.
Временные потери воды на оседание снего-ледяного покрова на берегах водохранилища при зимней сработке его	Исследование распределения глубин воды в прибрежной зоне водохранилища с помощью эхолота и толщин льда в той же зоне в течение зимы.	Организация измерений глубины воды в прибрежной зоне водохранилища в безледный период с помощью эхолота, установленного на катере, и толщины льда в течение зимы на всей акватории водохранилища вблизи берегов с применением вездехода.
Сток воды через створ Бухтарминского гидроузла	Уточнение пропускных способностей турбин Бухтарминской ГЭС и водосливных отверстий плотины путем специальной тарировки их. Изучение фильтрационных расходов через все сооружения гидроузла и в обход их.	Привлечение ОРГРЭС для тарировки турбин и водослива. Постановка гидрогеологических исследований в районе Бухтарминского гидроузла для оценки величины фильтрации. Организация контрольных гидрометрических измерений суммарного расхода, пропускаемого через гидроузел на гидростворе ниже узла при устойчивой работе ГЭС.
Водозабор на орошение и водоснабжение из водохранилища	Учет всех потребителей воды, определение методами гидрогеологии величины обратного сброса ее с орошаемых земель в водохранилище.	Организация замеров количества воды, идущей на орошение и водоснабжение. Постановка гидрогеологических исследований по определению возвратных вод.

Продолжение

Наименование слагаемого водного баланса	Работы, необходимые для полноценного исследования данного слагаемого водного баланса	Организационные мероприятия, необходимые для выполнения исследований
Водообмен между водной массой водохранилища и окружающими его грунтовыми водами	Гидрогеологические исследования прибрежной зоны водохранилища для установления направления и величины потока грунтовых вод.	Организация ряда поперечных гидрогеологических разрезов берегов Бухтарминского водохранилища с систематическим измерением уровня грунтовых вод и оценкой величины коэффициента фильтрации и порозности грунтов.
Изменение объема водохранилища при сработке или наполнении его	Постановка наблюдений за уровнем водохранилища в Курчумском заливе, западном и восточном берегах озерной части водохранилища, а также в районе пересечения нулевых линий в этой же его части. Уточнение площади водохранилища с помощью цветной аэрофотосъемки при наполнении, близком к нормальному подпорному уровню. Установление гидравлического падения уровней между озерной и речной частями водохранилища при различном наполнении его и протекающем расходе воды.	Организация ряда водомерных постов в удаленных ненаселенных районах Бухтарминского водохранилища с применением самописцев уровня длительного действия. *Выполнение цветной аэрофотосъемки водохранилища* при наполнении его, близком к нормальному подпорному уровню. Проведение промеров глубин воды в районе бывшего выхода р. Иртыш из оз. Зайсан.

В условиях Бухтарминского водохранилища затруднительно использовать даже гидрометрически измеренный сток некоторых рек (Курчум, Кальджир, Уйдене, Буконь и ряд других), поскольку он измеряется выше забора из них воды на орошение (рис. 1); в водохранилище попадает только часть измеренного стока, а вода, затраченная на орошение, в значительной части безвозвратно расходуется на транспирацию.

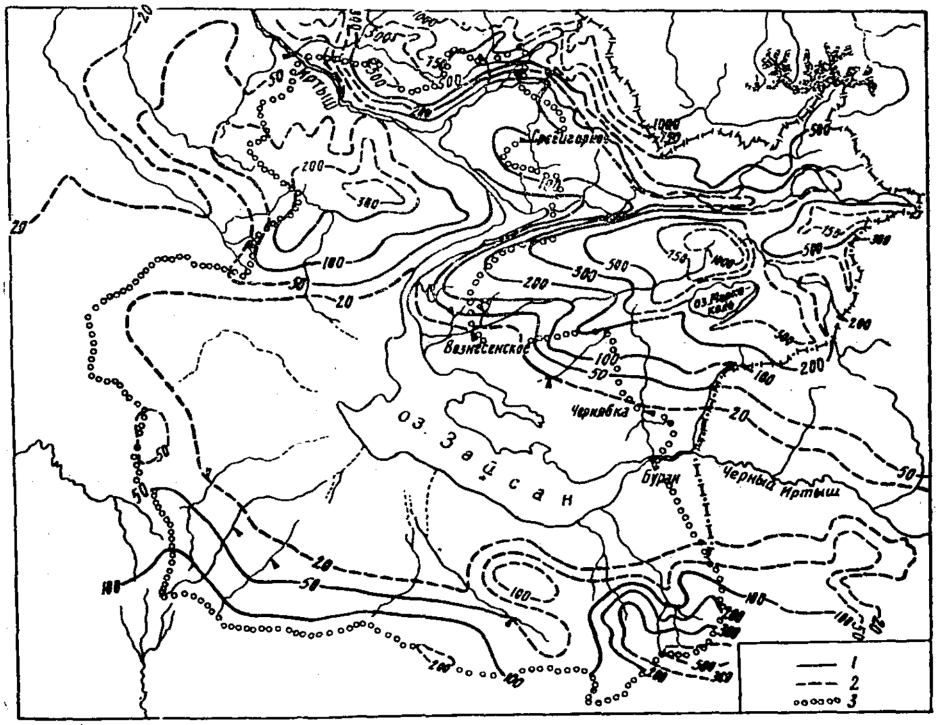


Рис. 1. Изолинии среднего годового стока рек *(мм)*, впадающих в Бухтарминское водохранилище (*1*— основные, *2*— ориентировочные, *3*— границы районов, не охваченных наблюдениями).

Вторым сложным вопросом является учет подруслового стока рек, впадающих в Бухтарминское водохранилище. Многие из них имеют большой уклон, и долины их заполнены крупнозернистыми аллювиальными отложениями. В таких условиях подрусловый сток может быть значительным, а он не учитывается при измерении расходов воды рек существующими методами гидрометрии.

Гидрометеорологической службой измеряется сток 7 рек, впадающих в Бухтарминское водохранилище (таблица 2 и рис. 1).

Кроме того, Управлением водного хозяйства измеряется сток ряда малых рек, вода которых частично, а иногда и полностью расходуется на орошение (таблица 3). Некоторые из этих рек использованы как аналоги при оценке модулей стока с той части площади водосбора Бухтарминского водохранилища, которая не охвачена гидрометрическими измерениями.

Площадь водосборов рек, на которых проводятся измерения стока Гидрометслужбой, составляет 59% общей площади водосбора Бухтарминского водохранилища, а суммарный сток этих рек дает 85—95% общего притока воды в водохранилище. Объясняется это тем, что модули стока остальной части водосбора малы.

Величины $V_п$ суммарного притока воды к периметру Бухтарминского

Таблица 2

Гидрометрические створы Управления гидрометеорологической службы КазССР, на которых измеряется сток рек, впадающих в Бухтарминское водохранилище

№ п.п.	Река	Местоположение гидроствора	Площадь водосбора, км²	Время действия	Средний многолетний расход воды, м³/сек
1	Черный Иртыш	с. Буран	55900	с 1937 г.	318
2	Кальджир	с. Черняевка	3090	с 1929 г.	21,8
3	Курчум	с. Вознесенское	5230	с 1933 г.	64,8
4	Нарым	с. Большое Нарымское	2330	с 1954 г.	6,9
5	Бухтарма	с. Лесная Пристань	10700	с 1954 г.	230
6	Тургусун	с. Кутиха	1190	с 1946 г.	43,7
7	Левая Березовка	с. Средигорное	232	с 1945 г.	1

Таблица 3

Гидрометрические створы Восточно-Казахстанского управления водного хозяйства, расположенные на реках водосбора Бухтарминского водохранилища

№ п.п.	Река	Местоположение гидроствора	Площадь водосбора, км²	Период действия		Средний многолетний расход воды, м³/сек
				открыта	закрыта	
1	Верхняя Теректы (Бас-Теректы)	В 4 км выше устья	179	1934	Действует	1,44
2	Средняя Теректы (Орта-Теректы)	Выше устья р. Теректы	108	1934	Действует	0,91
3	Нижняя Теректы (Шет-Теректы)	с. Алкабек	126	1934	Действует	0,64
4	Кулгуты (Калгаты)	В 5 км ниже с. Энбек	422	1935	Действует	1,44
5	Дженишке	Колхоз «Соц-Жол»	320	1934	Действует	1,50
6	Сухая Каинды	с. Елтай	127	1934	Действует	0,49
7	Джеменей (Бесенка)	В 2,5 км выше г. Зайсан	224	1916	1917	
				1930	Действует	1,60
8	Теректы	В 2 км выше с. Теректы	122	1932	Действует	0,80
9	Уйдене	При выходе из гор (Госплодопитомник)	705	1916	9/VII 1917	
				1927	Действует	3,72
10	Канды-Су (Чорга)	с. Бощи	3570	1912	1914	
				1930	1957	3,55
11	Терсайры	Колхоз Джанашал	566	1914	1916	
				1935	Действует	2,1
12	Шет-Ласты	В 2 км выше устья	439	1935	Действует	—
13	Орта-Ласты	В 12 км выше устья р. Шет-Ласты	268	1935	Действует	1,14
14	Тебезге	При выходе из гор	570	1932	Действует	1,50
15	База (Базарка)	При выходе из гор	1230	1913	1916	3,70
				1934	Действует	
16	Карабуга	При выходе из гор	1790	1913	1916	4,00
				1932	Действует	
17	Кокпекты	с. Кокпекты	4460	1913	1916	3,00
				1932	Действует	
18	Чигилек (Шегелек)	с. Чигилек	250	1934	Действует	1,60
19	Большая Буконь	с. Семеновка	1000	1934	Действует	7,05
20	Кулуджун	с. Московка	506	1932	Действует	3,20
21	Лайлы	с. Самарское	151	1932	Действует	0,63
22	Каинды	с. Миролюбовка	440	1932	Действует	1,95

водохранилища 7 рек, сток которых измерялся гидрометрически, приведены за 1962—1964 гг. в таблице 4.

Таблица 4

Подсчет величины притока воды к периметру Бухтарминского водохранилища по данным гидрометрических измерений Гидрометслужбы на 7 впадающих в него реках

Год и период	Расходы воды в $м^3/сек$								Объем притока, млрд, $м^3$ Vп
	р. Черный Иртыш, с. Бурап	р. Кальджир, с. Черняевка	р. Курчум, с. Вознесенское	р. Нарым, с. Большое Нарымское	р. Бухтарма, с. Лесная Пристань	р. Левая Березовка, с. Среднегорное	р. Тургусун, с. Кутиха	Сумма притока	
1962									
I	84,4	(7,9)	16,3	3,4	45,5	0,9	7,4	165,8	0,44
II	77,7	(7,5)	12,8	4,6	32,2	0,9	6,0	141,7	0,35
III	92,5	(8,2)	17,7	9,7	90,0	0,9	13,4	232,4	0,62
IV	229	(29,7)	88,0	22,4	335	3,0	66,3	773,4	2,00
V	952	64,9	294	17,2	622	2,3	168	2120,4	5,68
VI	753	33,6	120	12,3	287	1,4	60,5	1267,8	3,28
VII	344	20,3	37,9	9,0	136	0,9	23,0	571,1	1,53
VIII	277	11,6	23,5	7,4	116	0,9	14,6	451,0	1,21
IX	157	7,1	18,5	6,9	67,4	1,0	13,0	270,9	0,70
X	105	5,7	18,4	7,3	74,1	1,0	26,5	238,0	0,64
XI	75,8	4,6	14,7	5,0	38,2	1,0	17,0	156,3	0,40
XII	59,9	3,6	12,3	3,9	31,5	0,8	23,8	135,8	0,36
Среднегодовая	267	17,1	56,2	9,1	156	1,25	36,6	Сумма за год	17,21
1963									
I									
II	56,9	2,6	9,9	3,8	30,6	0,8	4,5	109,1	0,29
III	49,9	2,2	7,9	5,1	24,2	0,8	4,4	94,5	0,23
IV	75,8	5,8	17,6	7,0	52,8	0,9	11,1	171,0	0,46
V	95,0	7,3	21,7	8,2	138	1,8	34,8	306,8	0,80
VI	309	27,6	120	9,6	375	1,2	83,4	925,8	2,48
VII	934	25,3	151	9,4	465	0,9	74,8	1660,4	4,30
VIII	463	15,5	12,2	7,2	152	0,6	34,4	684,9	1,84
IX	258	9,3	24,2	5,9	125	0,5	32,9	455,8	1 22
X	152	5,9	17,7	7,0	96	0,6	27,0	306,2	0,79
XI	100	6,2	17,4	6,7	123	0,6	27,9	281,8	0,76
XII	79,1	6,2	18,0	6,5	114	0,7	24,0	248,5	0,64
Среднегодовая	51,3	6,5	10,9	3,7	55,7	0,6	(11,0)	139 7	0,37
	219	10,0	35,7	6 7	146	0,83	30,8	Сумма за год	14,18
1964									
I	48,9	6,7	8,2	2,1	58,5	0,6	—	—	(0,37)
II	37,1	5,1	7,0	1,7	40,3	0,4	—	—	(0,25)
III	50,3	6,8	11,8	4,0	34,0	0,6	—	—	(0,31)
IV	155	16,0	55,2	13,9	260	2,1	25,9	528,1	1,37
V	486	42,3	177	15,8	574	1,5	126	1422,6	3,81
VI	989	34,0	180	10,6	523	0,8	122	1859,4	4,82
VII	609	22,1	5 1,1	6,7	241	0,6	52,7	991,7	2,66
VIII	338	13,5	29,4	5,9	154	0,5	28,3	569,6	1,53
IX	162	8,7	19,0	6,1	83,9	0,5	20,3	300,5	0,78
X	120	7,4	18,4	5,9	77,0	0,6	19,5	248,8	0,67
XI	87,0	7,1	16,1	5,6	58,2	0,7	15,9	190,5	0,49
XII	54,1	5,8	10,7	3,6	33,6	0,6	8,2	116,6	0,31
Среднегодовая	261	14,6	49,3	6,8	178	0,8	—	Сумма за год	17,37

«Боковая приточность» — приток воды в водохранилище с той части площади водосбора, сток с которой не охвачен гидрометрическими измерениями

Величина «боковой приточности» оценивается по модулю стока. Он находится по какой-либо реке-аналогу, сток которой измеряется. Пра-

вильность выбора аналога проверяется замыканием уравнения водного баланса водохранилища. В условиях Бухтарминского водохранилища установление такого аналога встречает особые трудности потому, что сток с полупустынной территории этого района изучен недостаточно, модули его существенно меняются в пределах водосбора, сток с которого не охвачен гидрометрическими измерениями (рис. 1). Бухтарминское же водохранилище существует всего несколько лет, что затрудняет доказательство правильности выбранного аналога. Поэтому было принято решение увеличить объем информации о суммарном стоке рек, на которых не производились гидрометрические измерения, путем расчета водного баланса зоны затопления Бухтарминского водохранилища за возможно более длительный ряд лет до начала его наполнения в 1959 г.

Исходя из физико-географических особенностей отдельных частей водосбора водохранилища и имеющихся измерений стока рек на гидрометрических створах, были выделены два участка водохранилища: оз. Зайсан в границах будущего затопления и участок от истока р. Иртыш из оз. Зайсан до створа Бухтарминского гидроузла.

Уравнение водного баланса любого участка водохранилища, записанное для его периметра, имеет вид:

$$V_{п} + V_{пн} + V_{ос} - V_{с} - V_{ис} - V_{ор} = \Delta V, \qquad (2)$$

откуда

$$V_{пн} = V_{с} + V_{ис} + V_{ор} + \Delta V - V_{п} - V_{ос}, \qquad (3)$$

где $\Delta V = V_{к} - V_{н}$ — изменение объема воды, содержащейся в водотоках, озерах, почво-грунтах и снежном покрове на территории будущей зоны затопления хранилища, а остальные обозначения те же, что и в уравнении (1).

Целесообразность использования уравнения водного баланса для нахождения величины $V_{пн}$ вытекает из того, что значения ΔV, $V_{ис}$ и $V_{ос}$ малы по сравнению с $V_{с}$ и $V_{п}$, которые определяются по результатам измерений расходов воды вертушками на гидрометрических створах, т. е. достаточно надежно. Следовательно, можно ожидать, что и величины $V_{пн}$ окажутся достоверными.

Расчет слагаемых уравнения (3) производился следующим образом. Сток р. Иртыш в замыкающем створе второго участка (речная часть водохранилища от истока из оз. Зайсан до створа Бухтарминского гидроузла) получен по данным подсчета стока УГМС КазССР на гидростворе у г. Усть-Каменогорска, путем переноса этого стока к створу Бухтарминского гидроузла. Для этого вводились поправки, учитывающие боковую приточность на участке Усть-Каменогорск — Бухтарминский гидроузел, осадки, испарение и изменение объема воды в Усть-Каменогорском водохранилище, существующем с 1953 г.

Замыкающим створом первого участка (оз. Зайсан) и исходным створом второго участка является исток р. Иртыш из оз. Зайсан. Сток р. Иртыш в этом створе подсчитан заново по уровням оз. Зайсан, так как имеющиеся материалы по стоку реки у с. Камышенка в 120 *км* ниже истока и у с. Каракас в 1,5 *км* от истока не вполне достоверны: уровни р. Иртыш у с. Камышенка в ряде случаев подпираются впадающим несколько ниже гидроствора притоком р. Курчум, а гидрометрические наблюдения у с. Каракас отрывочны.

Подсчет стока реки, вытекающей из озера, по уровням последнего имеет ряд преимуществ. Озеро регулирует сток паводков, гидрограф их при выходе из озера имеет плавное очертание и не вызывает существенных изменений уклонов реки на подъеме и спаде паводка; в результате связь между уровнями и расходами воды реки здесь почти однознач-

на, русло реки устойчиво. Зимой при выходе реки из озера образуется полынья, уменьшающая влияние ледяного покрова на связь расхода воды с уровнем, найденного для безледного периода. Зарегулированность стока озером уменьшает также амплитуду колебаний уровня и увеличивает продолжительность стояния их, что позволяет получить более надежные гидрометрические данные.

Некоторые затруднения возникают только из-за сгонно-нагонных явлений, вызывающих резкие колебания уровней в истоке реки и вследствие этого неустановившееся движение воды в ней. Однако при осреднении уровней за месяц влияние сгонно-нагонных явлений нивелируется.

Построение кривой расхода р. Иртыш в истоке его из оз. Зайсан выполнено по 311 расходам воды, измеренным у с. Каракас в 1939, 1945—1951, 1954 гг. и по 508 расходам, измеренным у с. Камышенка в 1932—1942, 1946, 1954—1960 гг. Последние предварительно были перенесены к истоку р. Иртыш, используя не обычный прием — сдвиг уровней на время «пробега» расхода воды, а уравнение неразрывности, записанное для участка реки между створом измерения расхода и створом, куда он переносится. Это уравнение имеет вид:

$$Q_{ист} + \frac{hF}{\Delta\tau} + Q_{Бук} - Q_{Кам} - \frac{EF}{\Delta\tau} = \frac{V_к - V_н}{\Delta\tau}, \qquad (4)$$

откуда

$$Q_{ист} = Q_{Кам} + \frac{E-h}{\Delta\tau}F + \frac{V_к - V_н}{\Delta\tau} - Q_{Бук}, \qquad (5)$$

где $Q_{ист}$ — искомый расход воды Иртыша в истоке его из оз. Зайсан, $Q_{Кам}$ — расход воды, измеренный у с. Камышенка, E и h — суточные слои испарения и атмосферных осадков на поверхность реки, F — площадь зеркала реки на участке исток — с. Камышенка, $\Delta\tau$ — продолжительность расчетного интервала времени (сутки) в секундах, $V_к$ и $V_н$ — конечный и начальный объемы воды в реке на расчетном участке, $Q_{Бук}$ — расход воды единственного притока р. Иртыш на рассматриваемом участке р. Буконь.

Кривые расходов строились для отдельных лет наблюдений. Все они хорошо согласуются между собой, что указывает на отсутствие деформации русла реки на этом участке и позволяет объединить их в одну общую расчетную кривую расходов, координаты которой приведены в таблице 5.

Таблица 5

Координаты кривой расходов р. Иртыш в истоке его из оз. Зайсан

Уровень воды над нулем графика водомерного поста Тополев Мыс, *см*	—100	—50	0	50	100	150	200	250	300	350
Расходы воды р. Иртыш, *м³/сек*	4	48	96	150	210	284	307	468	584	718

Нижняя часть кривой ориентирована на отметку уровня воды при нулевом расходе р. Иртыш (порог стока из оз. Зайсан). Отметка порога стока (385 *м* абс. или 1,06 *м* над нулем графика водомерного поста Карасуат на оз. Зайсан) найдена путем промеров русла р. Иртыш в районе выхода его из оз. Зайсан. Промеры выполнены в 1964 г. Бухтарминской гидрометеорологической обсерваторией с помощью эхолота, установленного на катере озерного типа.

Как известно, связь между уровнями и расходами воды в реке, установленная для безледного периода, искажается зимой из-за уменьшения пропускной способности русла реки под ледяным покровом. Для учета это-

го явления обычно применяют так называемый «зимний коэффициент» ($K_з$), определяемый как отношение зимнего измеренного расхода воды к летнему, найденному по кривой расходов открытого русла при зимнем уровне воды, измеренном в лунке. Из рассмотрения гидравлики реки под ледяным покровом следует [2], что более правильным будет применение «зимнего коэффициента», вычисленного несколько иначе: по летнему расходу, найденному по уровню нижней поверхности ледяного покрова, а не по уровню воды в лунке. Значения такого «зимнего коэффициента» $K_{нпл}$, колеблются существенно меньше во времени, что позволяет более надежно интерполировать и даже экстраполировать его значения, опираясь на измеренные зимой расходы воды реки.

Подсчет зимнего стока р. Иртыш в истоке его из оз. Зайсан производился по летней кривой расходов с применением коэффициентов $K_{нпл}$, найденных в основном путем интерполяции их значений между датами, когда измерялись зимние расходы воды. Для облегчения интерполяции и подсчета стока за те зимы, когда расходы воды не измерялись, выполнена по специально разработанной методике оценка значений $K_{нпл}$ с учетом влияния на этот коэффициент полыньи в истоке р. Иртыш из оз. Зайсан. Так как наблюдений за этой полыньей не было, то размеры ее были определены расчетом по методике, изложенной в работе [10]. При этом внесены изменения. Они заключаются в том, что теплоотдача с поверхности полыньи путем испарения и турбулентной конвекции вычислялась по формуле В. А. Рымши и Р. В. Донченко [14], а поглощенная водой суммарная солнечная радиация и встречное излучение атмосферы находились по формулам А. П. Браславского [2].

Размер полыньи в истоке р. Иртыш из оз. Зайсан существенно влияет на величину $K_{нпл}$ в этом створе. При достаточно большой длине полыньи подпор уже не достигает верхнего конца ее и связь расходов воды с уровнями остается здесь такой же, как и летом, т. е. $K_з=1$. По мере приближения нижней кромки полыньи к истоку подпор уровней увеличивается и зимний коэффициент уменьшается, стремясь к его значению при полном ледоставе.

Уровень воды реки в створе нижней кромки полыньи зависит от расхода воды, от величины $K_{нпл}$ и от толщины ледяного покрова, а кривая свободной поверхности реки в пределах полыньи определяется этим уровнем, расходом воды в реке и длиной полыньи. Следовательно, расход воды р. Иртыш в истоке его из оз. Зайсан будет являться функцией уровня воды в этом створе (H), длины полыньи (L), зимнего коэффициента $K_{нпл.\,кр}$ на нижней кромке полыньи и толщины ледяного покрова в этом створе. Расход воды р. Иртыш в истоке его из оз. Зайсан может быть выражен как произведение зимнего коэффициента для этого створа ($K_з$) на расход, взятый по кривой расходов открытого русла по уровню воды H, а толщина ледяного покрова на нижней кромке полыньи, в соответствии с указаниями работы [10], связана со скоростью течения воды, которая в свою очередь зависит от расхода и уровня ее в реке. Следовательно, должна существовать зависимость $K_з=f(H, L, K_{нпл.\,кр})$. Такая зависимость устанавливалась на основании кривых свободной поверхности, построенных для Иртыша в пределах полыньи по методу «опорных кривых» Б. М. Бернадского [18] при различных сочетаниях H, L и $K_{нпл.\,кр}$. В результате были получены графики $K_з=f(H, L, K_{нпл.\,кр})$, образец которых показан на рис. 2.

Для пользования этими графиками необходимо знать длину полыньи и значение $K_{нпл.\,кр}$. Длина полыньи определялась расчетом [10], а величина $K_{нпл.\,кр}$ устанавливалась по аналогии со значением этого коэффициента для р. Иртыш у с. Камышенка, где имелось 293 измеренных

расхода воды за период 1930—1960 гг. Значения этих коэффициентов колеблются в пределах 0,4—0,8, причем меньшие величины характерны для начала ледостава, что вызвано, по-видимому, более значительной шероховатостью нижней поверхности ледяного покрова в первое время после замерзания реки. По мере сглаживания этих шероховатостей зимний коэффициент увеличивается и через 30—40 суток (после начала ледостава) приобретает стабильное значение (рис. 3).

Процесс наращивания ледяного покрова в районе нижней кромки полыньи происходит, как и установление ледостава на реке, осенью, поэтому для $K_{\text{нпл. кр}}$ принята зависимость, показанная на рис. 3 пунктиром. Несколько повышенное значение коэффициента в первые дни после образования ледяного покрова учитывает меньшую шероховатость нижней поверхности его в районе кромки полыньи по сравнению со льдом, установившемся на реке после осеннего ледохода. Это подтверждается значениями $K_{\text{1 пл}}$ р. Иртыш в истоке из оз. Зайсан, найденными для тех случаев, когда кромка полыньи приближается к данному створу.

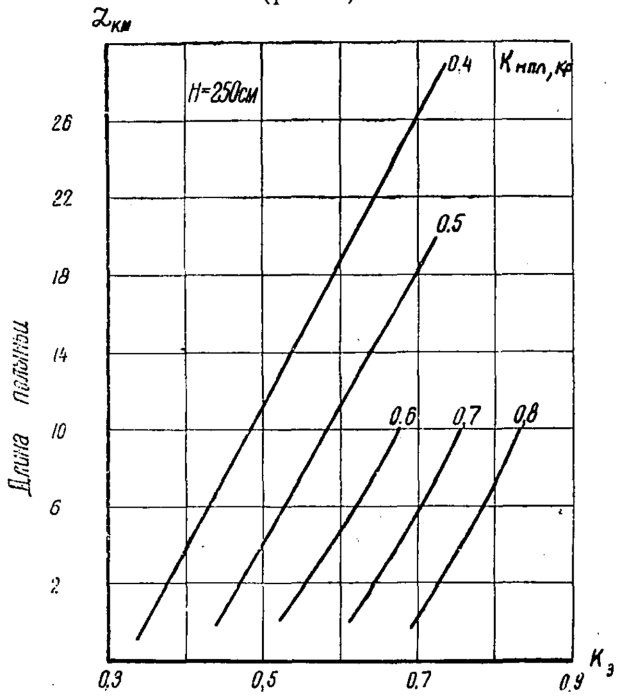


Рис. 2. Зависимость «зимнего» коэффициента ($K_з$) р. Иртыш в истоке из оз. Зайсан от длины полыньи (L), значения «зимнего» коэффициента на нижней кромке ее ($K_{нпл. кр}$) и уровня оз. Зайсан над нулем графика водомерного поста Тополев Мыс (Н).

При определении $K_{нпл. кр}$ по рис. 3 учитывалась продолжительность существования ледяного покрова в районе нижней кромки полыньи. Эта продолжительность определялась с помощью вспомогательных хронологических графиков хода нижней кромки полыньи во времени.

Результаты подсчета стока р. Иртыш в истоке его из оз. Зайсан приведены в таблице 6.

Величина $V_{ис}$ — потеря воды на испарение с зоны затопления определялась как сумма испарения с суши и с

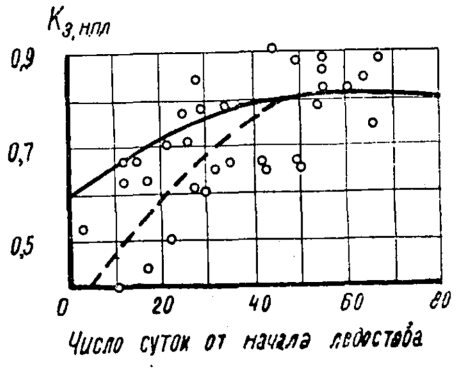


Рис. 3. Зависимость «зимнего» коэффициента, вычисленного по уровню нижней поверхности ледяного покрова ($K_{нпл}$) р. Иртыш у с. Камышенка от числа суток с начала ледостава.

водной поверхности. Первая находилась по методу А. Р. Константинова [9], вторая — по формуле А. П. Браславского и С. Н. Нургалиева [4]. Необходимые для этого гидрометеорологические данные были взяты из материалов наблюдений метеорологических станций Буран, Тополев Мыс, Кумашкино, Большое Нарымское, Усть-Каменогорск и водомерных постов Тополев Мыс, Каракас, Камышенка, Усть-Бухтарма, Гусиное и Усть-Каменогорск. При расчете испарения с поверхности оз. Зайсан все гидрометеорологические элементы были приведены к средним их условиям над водной поверхностью по методике, изложенной в статьях [3, 5].

Таблица 6

Среднемесячные расходы воды (м³/сек) р. Иртыш в истоке из оз. Зайсан

Год	Месяцы												Средний за год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1937	—	—	—	174	198	333	514	558	493	420	354	—	—
1938	—	—	—	221	252	317	372	394	400	378	352	240	—
1939	147	155	157	189	248	354	410	400	350	298	253	159	260
1940	141	122	145	176	216	298	394	384	374	340	298	280	264
1941	191	169	199	226	296	480	596	571	525	451	397	287	366
1942	200	187	213	241	300	440	669	669	576	480	414	346	394
1943	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1944	173	168	185	225	256	335	382	360	314	277	239	145	255
1945	127	118	118	168	233	281	264	255	215	185	173	102	187
1946	100	107	100	164	256	370	536	588	558	532	532	—	—
1947	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1948	—	—	—	233	260	315	382	358	301	255	219	154	2
1949	85	83	89	154	210	310	407	391	331	282	252	140	228
1950	146	135	137	163	194	333	414	395	350	301	245	151	247
1951	136	121	109	150	192	240	236	223	185	194	177	125	174
1952	98	98	112	153	204	371	551	549	482	397	288	196	292
1953	187	194	187	198	223	306	344	335	292	253	195	132	237
1954	116	106	120	174	175	221	425	480	451	386	323	182	263
1955	159	144	130	146	255	402	426	400	374	344	307	229	276
1956	157	151	158	195	211	312	453	514	503	467	425	280	319
1957	184	164	189	284	281	335	480	487	460	420	301	234	318
1958	152	152	158	202	282	416	622	785	735	642	543	391	423
1959	263	256	253	273	323	454	573	563	507	434	336	—	—

Определить величину $V_{ор}$ непосредственно по данным измерений не представилось возможным, поскольку полного учета основной ее части — затраты воды на орошение ниже места измерения расходов воды на реках, впадающих в водохранилище, не осуществляется; остается совершенно неизвестным и объем возврата воды подземным путем из массивов орошения. Поэтому для оценки величины $V_{ор}$ применялся прием, основанный на предположении о том, что дополнительные потери воды с увлажненных территорий (естественные потери учитываются модулем стока при вычислении $V_{пн}$), будут определяться разностью суммарного испарения в условиях естественного и повышенного увлажнения. При этом первые могут быть приближенно приняты в условиях полупустынного района, где расположена зона затопления Бухтарминского водохранилища, равными слою атмосферных осадков. Таким образом:

$$V_{ор}=\frac{(E_{ув}-h)F}{1000}\text{ млрд } м^3, \qquad (6)$$

где слой суммарного испарения с увлажненной территории ($E_{ув}$) и слой

годовых осадков (h) выражены в *мм*, а площадь увлажненной территории (F) в *км*^{2}.

Величина $E_{ув}$ рассчитана по методу А. Р. Константинова [9], пользуясь графиками, предложенными им для условий хорошо увлажненной поверхности суши. Она оказалась для среднемноголетних условий равной 610 *мм*/год. Слой среднемноголетних осадков для этой увлажненной территории после введения поправок на выдувание, смачивание осадкомерного ведра и испарения воды из него получен равным 374 *мм*/год. Площадь увлажненной территории слагается из орошаемых земель и питающихся за счет фильтрации воды из оросительной сети (8098 *км*^{2}), зоны подтопления (220 *км*^{2}) и полузатопленной поймы р. Черный Иртыш на участке от гидроствора Буран до впадения этой реки в оз. Зайсан (600 *км*^{2}). Все эти площади найдены по крупномасштабной карте. В соответствии с этими данными годовой объем $V_{ор}$ будет

$$V_{ор}=\frac{(610-374)(8098+220+600)\,100^2}{1000\cdot 10^9}=2{,}1 \text{ млрд. } м^3/\text{год}.$$

Распределение этой величины по месяцам, приведенное в таблице 7, сделано по аналогии с имеющимися отрывочными данными о заборе воды на орошение и водоснабжение, а также по характеристикам распределения ее потерь на суммарное испарение на протяжении года.

Таблица 7

Распределение величины $V_{ор}$ по месяцам

Месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
$V_{ор}$, млрд $м^3$	0,20	0,05	0,10	0,15	0,55	0,55	0,05	0,15	0,05	0,10	0,05	0,10	2,1

Так как величина $V_{ор}$ определена ориентировочно, то считаем возможным принять ее постоянной для всех лет, для которых составляется водный баланс водохранилища.

При определении величины ΔV — изменения запаса воды на рассматриваемом участке водохранилища — не учитывалось его изменение в почво-грунтах и в снежном покрове, поскольку зимний сезон рассматривался в границах до выпадения снега осенью и после его таяния весной, а сведений о запасах воды в почво-грунтах не имелось. Можно предполагать, что он мал по сравнению с притоком и стоком воды на расчетном участке. При этих предпосылках величина ΔV находилась как произведение изменения уровня воды ΔH за сезон на среднюю площадь зеркала воды. Для речного участка будущего водохранилища величина ΔH определялась как среднее из показаний ряда водомерных постов (Каракас, Камышенка и Усть-Каменогорск). Для озерного — находилась по сглаженному уровню водомерного поста Тополев Мыс. Площадь зеркала воды для речного участка была взята как произведение средней ширины реки на длину участка (448 *км*); для озерной — находилась по кривой площадей оз. Зайсан.

Величина $V_{п}$ — приток воды по рекам, впадающим в данный участок зоны затопления водохранилища, получена суммированием стока этих рек по данным Гидрометслужбы.

Величина $V_{ос}$ — объем атмосферных осадков, выпадающих на территорию зоны затопления данного участка водохранилища, определялась по исправленным показаниям осадкомеров с введением поправок, как это описано ниже. Площадь зоны затопления речного участка водохранилища принималась равной 1670 *км*^{2}, озерного — 3588 *км*^{2}, что соответствует наполнению водохранилища на 0,8 величины его полезной призмы.

Результаты вычисления величины $V_{пи}$ за период до наполнения Бухтарминского водохранилища по уравнению (3) приведены в табл. 8.

Для периода после наполнения Бухтарминского водохранилища величины $V_{пн}$ определялись из уравнения водного баланса (1).

Таблица 8

Вычисление величин $V_{пн}$ по формуле (3) за период до наполнения Бухтарминского водохранилища. Все слагаемые водного баланса даны в млрд.м³/сезон

Год	Период	Участок водохранилища	$V_с$	$V_{ис}$	ΔV	$V_п$	$V_{ос}$	$V_{ор}$	$V_{пн}$
1954	IV—VI	Речной	8,56	0,30	0,06	7,88	0,25	—	—
		Озерный	1,49	0,52	1,70	4,53	0,18	—	—
		Все водохранилище	10,05	0,82	1,76	12,41	0,43	1 25	1,04
1954	VII—IX	Речной	6,86	0,33	—0,04	6,71	0,16	—	—
		Озерный	3,60	1,18	1,34	5,11	0,20	—	—
		Все водохранилище	10,46	1,51	1,30	11,82	0,36	0,25	1,34
1956	IV—VI	Речной	8,94	0,23	0,03	7,97	0,25	—	—
		Озерный	1,88	0,55	2.11	5,74	0,18	—	—
1956	VII—IX	Речной	5,84	0,27	—0,03	6,16	0,15	—	—
		Озерный	3,89	1,40	0,98	4,47	0,13	—	—
		Все водохранилище	9,73	1,67	0,95	10,63	0,28	0,25	1,69
1958	IV—VI	Речной	12,38	0,28	0,08	10,70	0,25	—	—
		Озерный	2,36	0 65	3,42	6,11	0,19	—	—
		Все водохранилище	14,74	0,93	3,50	16,81	0,44	1,25	3,17
1958	VII—IX	Речной	9,74	0,34	0,0	10,64	0,19	—	—
		Озерный	5,67	1,40	1,91	8,03	0,29	—	—
		Все водохранилище	15,41	1,74	1,91	18,67	0,48	0,25	0,16
1958—1959	X—III	Речной	8,43	0,13	—0,06	8,09	0,23	—	—
		Озерный	6,18	0,27	—4,42	2,14	0,25	—	—
		Все водохранилище	14,61	0,40	—4,48	10,23	0,48	0,60	0,42
1959	IV—VI	Речной	9.97	0,31	0,0	8,89	0,20	—	—
		Озерный	2,76	0,78	2,92	6,46	0,18	—	—
		Все водохранилище	12,73	1,09	2,92	15,35	0,38	1,25	2,26
1959	VII—IX	Речной	6,57	0,34	0,0	6,91	0,16	—	—
		Озерный	4,35	1,56	—0,74	4,28	0,30	—	—
		Все водохранилище	10,92	1,90	—0,74	11,19	0,46	0,25	0,68

$$V_{пн}=(V_с+V_{ис}+V_{ис\cdot з}+V_{ор}+V_л+\Delta V_{накоп})-(V_п+ \\ +V_{ос}+V_{зл}+\Delta V_{сраб}=\Sigma_р-\Sigma_п, \qquad (7)$$

где условные обозначения те же, что и в уравнении (1), а $\Sigma_р$ и $\Sigma_п$ обозначают суммы расходной и приходной частей водного баланса. Способ определения величины $V_п$ описан выше, а методика нахождения остальных слагаемых уравнения (7) изложена ниже. Результаты вычисления $V_{пн}$ по уравнению (7) для периода после наполнения водохранилища приведены в таблице 9. Значения $\Sigma_р$ и $\Sigma_п$ найдены по данным о слагаемых водного баланса, помещенным в таблице 9.

Сведения о $V_{пн}$, приведенные в таблицах 8 и 9, являются эталоном при проверке правильности методики определения этой величины по данным о стоке рек-аналогов.

В условиях Бухтарминского водохранилища невозможно найти одну реку, модуль стока которой являлся бы аналогом величины $V_{пн}$, так как физико-географические условия формирования поверхностного стока здесь весьма разнообразны и модули стока на сравнительно небольшом расстоянии изменяются в широких пределах от 0,5 до 10 *л/сек км²*. Поэтому для оценки величины $V_{пн}$ используем одновременно ряд рек-аналогов следующим образом.

Таблица 9

Вычисление величин $V_{пн}$ по формуле (7) за период до наполнения Бухтарминского водохранилища. Все слагаемые водного баланса даны в млрд м³/сезон

Год	Период	Сумма расходной части водного баланса $\Sigma_р$	Сумма приходной части водного баланса $\Sigma_п$	$V_{пн}$
1962	I—III	2,43	2,11	0,32
	IV—VI	13,07	11,44	1,63
	VI—IX	7,55	6,75	0,80
1962—1963	X—III	6,59	5,90	0,69
1963	IV—VI	9,39	7,99	1,40
	VII—IX	6,43	5 88	0,55
1963—1964	X—III	6,66	6,07	0,60
1964	IV—VI	10,79	11,69	1,10
	VII—IX	7,45	7,02	0,43
	X—XII	3,85	3,40	0,45

Подсчет $V_{пн}$ производится отдельно для речной и озерной части водохранилища, а затем значения его суммируются; границей этих двух частей водохранилища является исток р. Иртыш из оз. Зайсан.

В качестве аналога для $V_{пн}$ речной части водохранилища принимается модуль стока р. Левая Березовка у с. Средигорное, для озерной — средневзвешенной по площади водосбора модуль стока ряда рек этого района: Богаз, Базар, Кара-Буга и Калгута. Расчетный среднемесячный модуль стока принимается пропорциональным этим модулям; коэффициенты пропорциональности находятся по соотношению слоев нормы годового стока для соответствующих площадей водосбора, а эти слои стока берутся по карте И. С. Соседова и В. И. Болдырева [15] (рис. 1). Для речной части водохранилища этот коэффициент оказался равным 1,1, для озерной будет 0,37.

В соответствии с изложенным расчетная зависимость получает вид:

$$V_{пн} = \frac{86400\,n}{10^{12}}\left(1{,}1\,F_1\,M_{Л.\,б} + 0{,}37\,F_2\,\frac{F_{Бог}M_{Бог} + F_{Баз}M_{Баз} + F_{К.\,б}M_{К.\,б} + F_{Кал}M_{Кал}}{F_{Бог} + F_{Баз} + F_{К.\,б} + F_{Кал}}\right), \quad (8)$$

где n — число дней в месяце, F — площадь водосбора: F_1 — «боковой приточности» речного участка (11000 *км²*), F_2 — то же озерного участка (48088 *км²*), $F_{Бог}$ — р. Богаз (1405 *км²*), $F_{Баз}$ — р. Базар (1230 *км²*), $F_{К.б.}$ — р. Кара-Бугаз (1790 *км²*), $F_{Кал}$ — р. Калгуты (422 *км²*); M — соответствующие модули стока *л/сек км²*, индекс Л. Б. — р. Левая Березовка у с. Средигорное (площадь водосбора 251 *км²*).

После подстановки значений площадей водосбора и замены модулей стока расходами воды, деленными на площадь водосбора, получаем окончательную расчетную зависимость для определения $V_{пн}$:

$$V_{пн} = n\,[0{,}00417\,Q_{Л.\,б} + 0{,}000318\,(Q_{Бог} + Q_{Баз} + Q_{К.б.} + Q_{Кал})] \text{ млрд. м}^3. \quad (9)$$

В этом уравнении расходы воды выражены в *м³/сек* и n — в сутках.

Сопоставление величин $V_{пн}$, полученных по модулям стока рек-аналогов [формула (9)] со значением $V_{пн}$, найденных из уравнения водного баланса (таблицы 7 и 8), сделано в таблице 10. Точность расчета величины «боковой приточности» по формуле (9) оказалась удовлетворительной: за годы существования расхождение в сезонных суммах $V_{пн}$ не превышает 8% суммарного притока, а за период до наполнения — 18%.

Атмосферные осадки, выпадающие на поверхность водохранилища

Объем атмосферных осадков, выпадающих на площадь водохранилища ($V_{ос}$), равен произведению среднего слоя этих осадков на площадь зеркала водохранилища. Расчет величины $V_{ос}$ производился за месячные интервалы времени, площадь зеркала водохранилища принималась при среднемесячном уровне воды в нем.

Средний слой месячных осадков определялся как средневзвешенный из показаний 14—16 метеорологических станций и постов, расположенных вблизи Бухтарминского водохранилища. Веса станций находились в соответствии с площадью той части водохранилища, которая тяготеет к данной метеорологической станции. В измеренные слои осадков вводились поправки на выдувание, смачивание осадкомерного ведра и испарения из него за период от их выпадения до срока измерения. Первые две поправки вводились в соответствии с указаниями, помещенными в статьях [6, 7, 16, 17], а для определения потерь воды на испарение из осадкомерного ведра были проведены специальные наблюдения на Кенгирском в 1964 г. и на Бухтарминском водохранилище в 1965 г. На основании этих наблюдений и построена зависимость суточного слоя испарения жидких осадков из осадкомерного ведра от скорости ветра и температуры воздуха (рис. 4). Предполагая, что выпадение осадков равновероятно в любое

Таблица 10

Сопоставление величин $V_{пн}$, полученных как остаточный член уравнения водного баланса [(3) и (7)] и вычисленных по данным о стоке рек-аналогов (9)

Год	Период	$V_{пн}$ млрд. $м^3$		$V_п$ млрд. $м^3$	$V_п + V_{пн}$ млрд. $м^3$	Отклонение	
		по уравнению водного баланса	по модулям стока рек-аналогов			млрд. $м^3$	%
До наполнения Бухтарминского водохранилища							
1954	IV—VI	1,04	1,42	12,41	13,45	0,38	3
	VII—IX	1,34	0,62	11,82	13,16	—0,72	—5
1956	IV—VI	0,85	1,26	13,71	14,56	0,41	3
	VII—IX	1,69	0,47	16,63	12,32	—1,22	—10
1958	IV—VI	3,17	2,39	16,81	19,98	—0,78	—4
	VII—IX	0,16	1,01	18,67	18,83	0,85	5
1958—1959	X—III	0,42	0,86	10,23	10,45	0,44	4
1959	IV—VI	2,26	1.69	11,81	14,07	—0,57	—4
	VII—IX	0,68	0,69	11,19	11,87	0,01	0
После наполнения Бухтарминского водохранилища							
1962	I—III	0,32	0,44	1,44	1,76	0,12	7
	IV—VI	1,63	1,58	11,16	12,79	—0,05	0
	VII—IX	0,80	0,50	3,44	4,24	—0,30	—7
1962—1963	X—III	0,69	0,83	2,39	3,08	0,14	5
1963	IV—VI	1,40	1,29	7,55	8,95	—0,11	—1
	VII—IX	0,55	0,40	3,85	4,40	—0,15	—3
1963—1964	X—III	0,59	0,60	2,71	3,30	0,01	0
1964	IV—VI	1,10	1,14	9,99	11,09	0,04	0
	VII—IX	0,43	0,63	4,97	5,40	0,20	4
	X—XII	0,45	0,33	1,48	1,93	—0,12	—6

время суток, можно определить количество воды, испарившейся из осадкомерного ведра как произведение слоя испарения на число дней с осадками, деленное пополам. Введение поправок существенно (в 1,5—2 раза) увеличило слой осадков, измеренных осадкомером Третьякова.

Известно, что из-за понижений линий тока воздушных масс над водоемами вследствие более гладкой их поверхности по сравнению с окружающей сушей насыщение водяными парами воздуха удаляется от состояния полного насыщения, и вероятность конденсации водяных паров, а следовательно, и вероятность выпадения осадков уменьшается. К сожалению, на Бухтарминском водохранилище отсутствуют наблюдения на плавучих или островных метеостанциях. Поэтому отмеченное выше уменьшение осадков над водохранилищем оценивалось по аналогии с Куйбышевским водохранилищем [13] коэффициентом 0,86, на который умножался слой вычисленных средневзвешенных осадков.

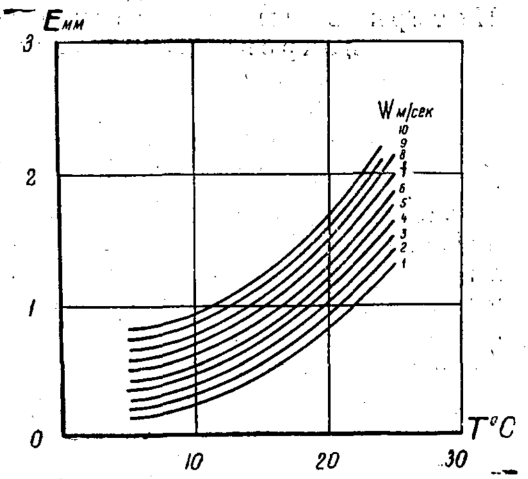


Рис. 4. Зависимость слоя испарившейся воды из ведра осадкомера Третьякова за полусутки от скорости ветра и температуры воздуха, измеренных на высоте 2 *м* над поверхностью земли.

Для оценки количества воды в снеге, лежащем на льду водохранилища, коэффициент 0,86 не применялся, так как зимой различия в шероховатости поверхности водохранилища и окружающей его суши почти нет.

Правильность учета величины снегозапасов на водохранилище по показаниям береговых осадкомеров после введения к ним поправок подтверждается результатами подробных снегосъемок, приведенных в таблице 11. Расхождение между показаниями осадкомеров (с поправками) и снегосъемок не превышает 1 *см* слоя воды в снегу, т. е. находится в пределах точности измерений.

Таблица 11

Сопоставление запасов воды в снеге (*мм*), лежащем на ледяном покрове водохранилища, на берегу его, и по данным берегового осадкомера по состоянию на 1 марта 1965 г.

Район водохранилища	Организация, выполнявшая снегосъемку	Слой воды в снеге, *мм*		
		снегосъемка		осадкомер на берегу
		на водохранилище	на берегу	
Бухтарминский залив у с. Новая Бухтарма	Бухтарминский гидрофизический стационар Казахского научно-исследовательского института энергетики	46	46	48
Устье Бухтарминского залива		39	46	48
Восточная часть оз. Зайсан		35	26	44
Западная часть оз. Зайсан	Бухтарминская гидрометеорологическая обсерватория Гидрометслужбы	46	30	41

Результаты расчета величины $V_{ос}$ отражены в сводной таблице водного баланса (таблица 15). Пример такого расчета для 1964 г. дан в таблице 12.

Потери воды за счет оседания снего-ледяного покрова на берегах водохранилища при понижении его уровня зимой ($V_л$) и приход воды при затоплении осевшего на берегах снего-ледяного покрова весной при подъеме уровня ($V_{зл}$).

Объем воды в снего-ледяном покрове, осевшем на берегах водохранилища выше уреза, является временной потерей ее и должен быть включен в расходную часть водного баланса. Наоборот, весной при подъеме уровня водохранилища и затоплении осевшего на берегах снего-ледяного покрова содержащаяся в нем вода увеличивает объем водохранилища и должна быть учтена в приходной части водного баланса [1].

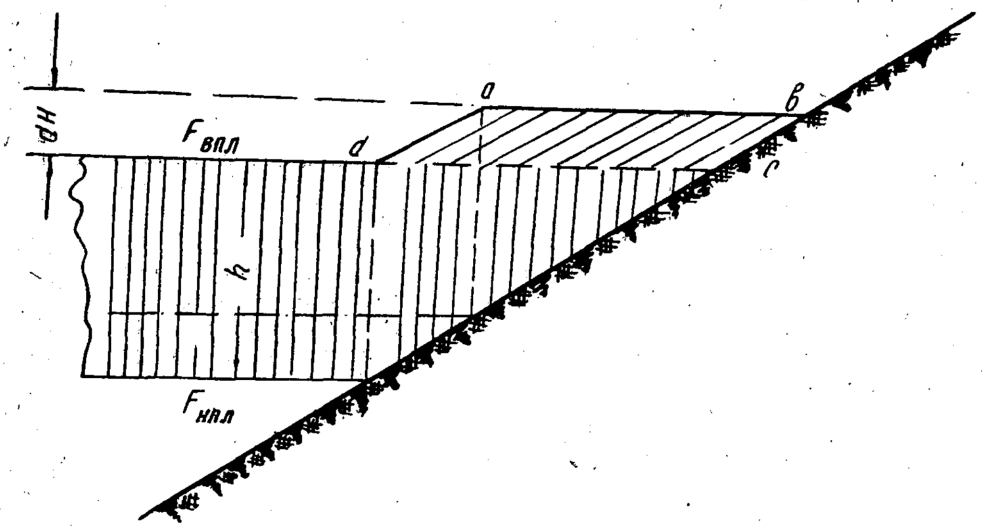


Рис. 5. Схема к выводу формулы для расчета величины временных потерь воды из водохранилища при оседании снего-ледяного покрова на берегах во время зимней сработки.

Рассмотрим рис. 5, являющийся основой вывода расчетной зависимости для $V_л$. На рисунке видно, что объем льда $V_л$, оказавшийся выше уровня верхней его поверхности на берегу водохранилища, представляет собой в сечении параллелограмм *abcd* и будет равен:

$$dV_л = -\gamma_л (F_{впл} - F_{нпл})\, dH, \qquad (10)$$

где $\gamma_л$ — плотность льда, $F_{впл}$ и $F_{нпл}$ — площади водохранилища при уровне верхней и нижней поверхности ледяного покрова.

Интегрируя в пределах от начального уровня ($H_н$) до конечного ($H_к$), получаем величину потери воды при оседании ледяного покрова на берегах.

$$V_л = -\int_{H_н}^{H_к} \gamma_л (F_{впл} - F_{нпл})\, dH. \qquad (11)$$

Для решения этого интеграла нужно выразить площадь водоема и толщину льда как функцию уровня. Известно, что площадь (F) водоема

является первой производной от его объема (V) по уровню (Н); поэтому, если $V=\varphi(H)$, то $F=\varphi'(H)$. Подставляя это выражение в формулу (11) и учитывая, что верхняя поверхность ледяного покрова возвышается над уровнем воды на величину $(1-\gamma_л)h$, где h — толщина льда, получаем:

$$V_л = -\int_{H_н}^{H_к} \gamma_л \{\varphi'[H+(1-\gamma_л)h] - \varphi'[H-\gamma_л h]\}\, dH. \qquad (12)$$

Таблица 12

Пример расчета средневзвешенного слоя атмосферных осадков и величины $V_{ос}$ за январь 1964 г.

Наименование населенного пункта	Вес метеостанции, $к$	Слой измеренных осадков с поправками, h *мм*	kh, *мм*
Буран	0,10	29,3	2,9
Карасуат	0,22	14,5	3,2
Совхоз «Большевик»	0,09	16,3	1,5
Аксуат	0,20	12,8	2,6
Курчум	0,13	15,0	2,0
Баты	0,09	21,1	1,9
Хайрузовка	0,04	17,3	0,7
Большое Нарымское	0,01	13,1	0,1
Черемшанка	0,02	19,2	0,4
Заводино	0,04	35,3	1,4
Серебрянка	0,03	35,8	1,1
Северный Поселок	0,01	28,9	0,3
Огневка	0,01	15,5	0,2
Усть-Каменогорск	0,01	30,5	0,3
Средневзвешенный слой осадков, *мм*			18,6
Средневзвешенный слой осадков, умноженный на коэффициент 0,86, *мм*			16
Площадь зеркала водохранилища, среднемесячная, $км^2$			3386
Объем осадков, выпавших на поверхность водохранилища, $V_{ос}$, млрд. $м^3$			0,05

Решение этого уравнения при наиболее простом предположении, неизменности толщины льда в пределах расчетного интервала времени, имеет следующий вид:

$$V_л = \gamma_л \int_{H_н}^{H_к} -\varphi[H + (1-\gamma_л)h] + \varphi(H-\gamma_л h) = \gamma_л(V_{дн} - V_{лк}), \qquad (13)$$

так как

$$\int \varphi'(H)\, dH = \varphi(H) + C.$$

В формуле (13) $V_{дн}$ и $V_{лк}$ — объемы ледяного покрова в начале и конце расчетного интервала времени, вычисляемые как разность объемов водохранилища при уровнях верхней и нижней поверхности ледяного покрова.

Практически вычислять величины $V_{дн}$ и $V_{дк}$, представляющие собою малую разность двух больших чисел, неудобно. Поэтому для водохранилищ с глубиной более 10 *м*, при расчете значений $V_л$ за месяц можно предложить иную, приближенную формулу (14), представляющую собой решение уравнения (10) в конечных разностях

$$V_л = \gamma_л \frac{dF}{dH} h_{ср} \Delta H, \qquad (14)$$

где $\frac{dF}{dH}$ — первая производная площади водоема по его уровню. Поэтому произведение $\frac{dF}{dH} h_{ср}$ представляет собой приближенно разность $F_{впл} - F_{нпл}$ в формуле (10).

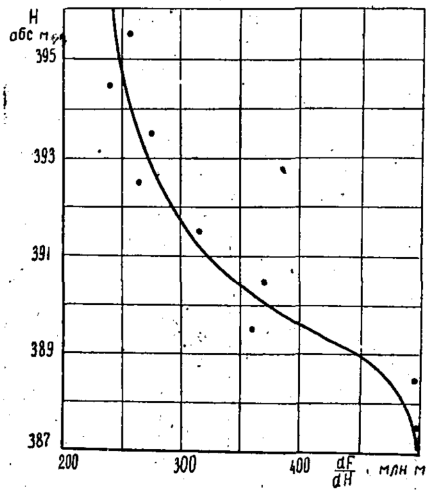


Рис. 6. Зависимость величины $\frac{dF}{dH}$ от уровня воды в Бухтарминском водохранилище.

Значение $\frac{dF}{dH}$ легко вычисляется по кривой зависимости площади от уровня водоема (рис. 6).

Обычно ледяной покров бывает покрыт снегом. В этом случае к толщине льда прибавляют приведенную к плотности льда высоту снежного покрова. Такая приводка осуществляется умножением высоты снега на коэффициент, равный отношению плотности снега к плотности льда, т. е. $K = \frac{\lambda_{сн}}{\lambda_л}$. Расчет $V_л$ произведен помесячно, по средним за месяц значениям толщины льда, высоты и плотности снега. Затопление осевшего на берегах снего-ледяного покрова весной происходит на Бухтарминском водохранилище, как правило, в течение одного месяца, поэтому величина $V_{зл}$ принималась равной сумме $V_л$ за предшествующую зиму.

Результаты расчета $V_л$ и $V_{зл}$ показаны в сводной таблице водного баланса (таблица 15).

Изменение объема водохранилища ($\Delta V_{сраб}$ и $\Delta V_{накоп}$)

Отсутствие гидрогеологических исследований в зоне подпора грунтовых вод Бухтарминским водохранилищем не позволяет даже приближенно оценить величину изменения запаса воды в «грунтовом бассейне», окружающем чашу водохранилища. Однако, учитывая сравнительно небольшое колебание уровней Бухтарминского водохранилища в течение периода, за который рассчитывался водный баланс (1962—1964 гг.), можно ожидать, что это слагаемое водного баланса будет невелико. Поэтому при вычислении $\Delta V_{сраб}$ и $\Delta V_{накоп}$ учитывалось только изменение объема воды в чаше водохранилища, равное разности конечного и начального его объема. Они оцениваются по измеренным на водомерных постах уровням, пользуясь зависимостью объема водохранилища от его среднего уровня, т. е. «кривой объемов». Такая кривая объемов вычисляется по данным о площадях зеркала водохранилища при различном наполнении его, т. е. по кривой площадей водохранилища.

Таким образом, задача определения величины изменения объема водохранилища делится на две части: построение кривой объема и определение его среднего уровня на границах расчетного интервала времени.

Кривая объемов водохранилища была построена при составлении технического проекта Бухтарминского гидроузла. Проверка положенных в ее основу значений площади водохранилища, выполненная по новым

планшетам крупномасштабной топографической съемки этого района, показала достаточную надежность расчетов техпроекта (таблица 13 и рисунки 7 и 8).

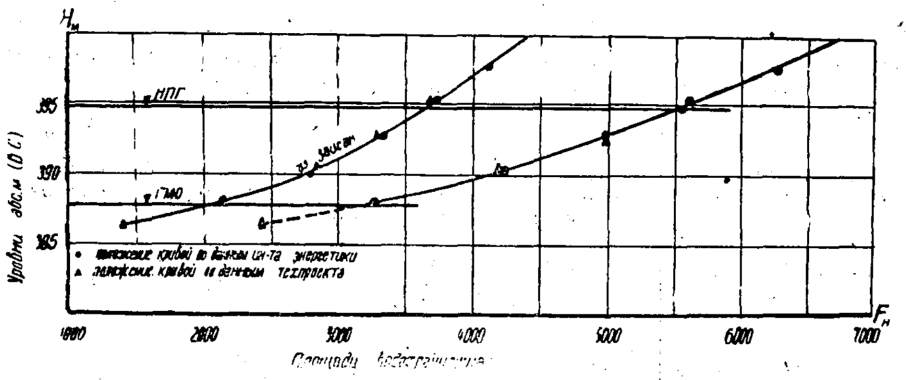


Рис. 7. Зависимость площади озерной части и всего Бухтарминского водохранилища в целом от уровня его наполнения.

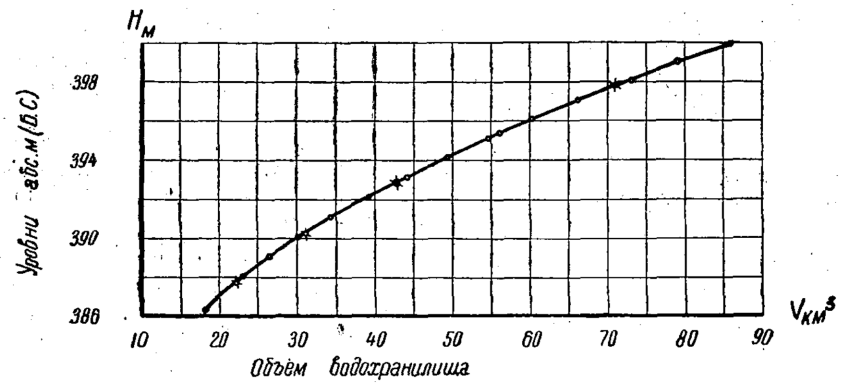


Рис. 8. Зависимость объема Бухтарминского водохранилища от уровня его наполнения по новой крупномасштабной съемке (0) и по данным технического проекта Бухтарминского гидроузла

Для определения среднего уровня водохранилища прежде всего необходимо показания всех водомерных постов выразить в одной системе отметок с ошибками, не превышающими точности измерения уровня (1 *см*). Для этого выполняется «водная нивелировка» водомерных постов — сопоставление показаний их в условиях, когда уровень воды водохранилища можно принимать горизонтальным. Эти условия соответствуют скорости ветра меньше 3 *м/сек* и разности атмосферного давления на водомерных постах менее 3 *мб* [12]. Необходимо также отсутствие падения уровней, возникающих из-за гравитационных течений. Как показал расчет кривых свободной поверхности Бухтарминского водохранилища, только в районе бывшего истока р. Иртыш из оз. Зайсан возможны перепады уровня между озерной и речной частью водохранилища порядка нескольких сантиметров при сработке водохранилища до УМО. Поэтому показания водпостов озерной части водохранилища использовались только за 1966 г., когда оно было наполнено почти до НПУ.

Результаты водной нивелировки показаны в таблице 14. В отличие от обычного поправка к отметкам нуля графика водпостов находилась

по среднеарифметической разности показаний опорного водпоста (Баты) и данного поста, взятой в пределах между верхней и нижней квадрильяной, остальные разности отбрасывались. Такой прием позволяет исключить отдельные ошибки в измерениях уровней, вкравшиеся в выборку. Приведенные к единой системе отметок уровни воды, наблюдавшиеся на постах водохранилища, являются основой для выбора одного из существующих методов определения его среднего уровня.

Таблица 13

Сопоставление площади зеркала Бухтарминского водохранилища по данным технического проекта гидроузла и по результатам планиметрирования новых крупномасштабных карт

Отметки уровня воды, *м*		Площади зеркала водохранилища, *км²*				Отклонения	
		новые карты			водохранилище в целом по техпроекту		
абсолютные	условные	озерная часть	речная часть	водохранилище в целом		*км²*	%
388,10	395,36	2140	1154	3294	3258	136	4,1
390,34	397,5	2852	1350	4202	4194	8	0,2
392,84	400,0	3334	1634	4970	4967	3	0,1
395,34	402,5	3728	1894	5622	5614	8	0,2
397,84	405,0	4100	2145	6245	6220	+15	—0,2

Таблица 14

Результаты водной нивелировки водомерных постов Бухтарминского хранилища
Отметка нуля графика водомерного поста Баты принята равной 387,00 *м* (абс.)

№ п.п.	Наименование водомерного поста	Поправка к отметке нуля графика водпоста, *м*	Приведенная отметка нуля графика водпоста *м* (абс.)		Отклонение, *м*
			новая	по данным Бухтарминской ГМО[1]	
1	Плотина Бухтарминского гидроузла	—62,87	324,13	—	—
2	Заводино	—17,82	369,18	369,19	—0,01
3	Черемшанка	0,51	387,51	387,51	0
4	Хайрузовка	0,53	387,53	387,53	0
5	Баты	0	387,00	387,00	0
6	Куйган	—9,90	377,10	377,10	0
7	Аксуат	1,58	388,58	—	—
8	Тополев Мыс	—1,07	385,93	—	—

[1] Гидрометеорологическая обсерватория УГМС КазССР.

Такой средний уровень находится одним из двух способов: как средневзвешенный из показаний всех водомерных постов и как уровень, измеренный на «нулевой линии» водохранилища. «Нулевая линия» — это та линия на поверхности водохранилища, где при сгонно-нагонных явлениях уровень остается без изменения, и объем, найденный по этому уровню, соответствует истинному объему воды в водоеме. Предложено несколько приемов определения «веса» показаний водомерного поста, который принимается пропорциональным тяготеющей к данному посту

площади водоема. Наиболее обоснованным является способ секторов, при котором вес водомерного поста принимается пропорциональным площади сектора, расположенного на поверхности водохранилища и очерченного из пункта расположения водпоста одним и тем же радиусом для всех постов. Размер радиуса находится подбором, так, чтобы сумма площади всех секторов равнялась общей площади водохранилища. Участки водохранилища, где происходит наложение секторов, делятся пополам между соседними водпостами.

Бухтарминское водохранилище делится на два резко очерченных участка: речной и озерный. Речной участок занимает расстояние от створа гидроузла до бывшего истока р. Иртыш из оз. Зайсан. Он представляет собой затопленную при наполнении водохранилища долину р. Иртыш, достаточно глубоководен (средняя глубина —20—30 *м*) и сравнительно узок. В противоположность ему озерный участок, образовавшийся на месте оз. Зайсан в результате подъема его уровня из-за подпора воды Бухтарминским гидроузлом, весьма мелководен (средняя глубина—4 *м*). Он имеет достаточно большую площадь для развития на нем значительных сгонно-нагонных ветровых денивилляций. Между собой эти участки водохранилища соединены мелководным проливом, имеющим при низком стоянии уровней в водохранилище небольшую ширину и заросшим к тому же тростником и другой полупогруженной водной растительностью. При неполном наполнении водохранилища возможно появление здесь гидравлического перепада уровней при движении воды из озерной в речную часть. Учитывая эти особенности водохранилища, изменение его объема определялось отдельно для речной и озерной частей, а затем суммировалось.

Ветровые перекосы уровня в речной части невелики, и уровни, измеренные на 6 водпостах, расположенных здесь, хорошо согласовываются между собой; их отклонения от осредненных значений уровня не превышают в большинстве случаев ± 2 *см*. Поэтому средний уровень речного участка сравнительно надежно находится по графически осредненному ходу уровня всех водомерных постов. При таком осреднении легко можно отбраковывать отдельные ошибочные измерения уровней.

Средний уровень озерной части определить значительно труднее. Наблюдения за уровнем воды ведутся здесь только на двух водомерных постах: Карасуат и Аксуат, хотя по площади эта часть водохранилища занимает до 70% всего его объема. Качество наблюдений низкое: бывают случаи невыхода наблюдателей на пост, длительные систематические расхождения уровней между собой независимо от ветра и др. Для получения хорошей информации об изменении объема воды в этой части водохранилища необходимо повысить качество наблюдений на существующих двух водпостах и организовать наблюдения за уровнем еще хотя бы на двух постах, расположенных на западном и юго-западном побережье оз. Зайсан. В настоящее время можно только ориентировочно оценить изменение объема воды озерного участка водохранилища по графически осредненному ходу уровня воды, построенному по наблюдениям указанных выше двух водомерных постов. Если же из-за плохого качества наблюдений это оказывается невозможным, то изменение уровня воды здесь следует принимать таким же, как и в речном участке водохранилища.

Для повышения надежности определения величин изменения объема воды в озерной части целесообразна, по-видимому, организация наблюдений за уровнем воды в месте пересечения «нулевых линий», рассчитанных по известному методу [8] и показанных на рисунке 9. Для этого потребуется создание островной или плавучей станции.

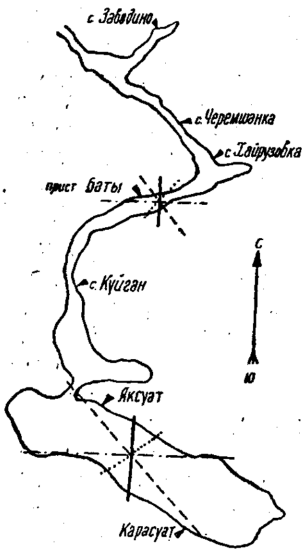


Рис. 9. Схема положений «нулевых линий» речной и озерной частей Бухтарминского водохранилища при ветре различного направления (_____ при западном и восточном,—.—.— при южном и северном, — — — — при юго-западном и северо-восточном, ... при юго-восточном и северо-западном направлении ветра).

При небольшом изменении уровня в течение расчетного интервала времени определять изменение объема водохранилища, как разность конечного и начального его объема затруднительно из-за необходимости вычислять эти объемы с большим числом знаков. Поэтому в таких случаях пользуются приближенной формулой

$$\Delta V = F_{ср} \Delta H, \qquad (15)$$

где ΔV — объем сработки или накопления воды в водохранилище, $F_{ср}$ — средняя за расчетный интервал площадь зеркала водохранилища и ΔH — изменение среднего уровня водохранилища за то же время.

Результаты расчета $V_{накоп}$ и $V_{сраб}$ помещены в сводной таблице водного баланса хранилища (таблица 15).

Сток воды через Бухтарминский гидроузел ($V_с$)

Из-за отсутствия тарировок турбин и водосливных отверстий плотины сток воды через Бухтарминский гидроузел непосредственно не определяется. Значения его находятся путем переноса от Усть-Каменогорского гидроузла, используя уравнение водного баланса этого водохранилища. Сооружения же Усть-Каменогорского гидроузла тарированы ОРГРЭСом.

Уравнение водного баланса Усть-Каменогорского водохранилища записывается так:

$$V_{с.Б} + V_{пн} + V_{ос} + \Delta V_{сраб} = V_{с.УК} + V_{ис} + \Delta V_{напол}, \qquad (16)$$

откуда:

$$V_{с.Б} = V_{с.УК} + V_{ис} + \Delta V_{напол} - (V_{пн} + V_{ос} + \Delta V_{сраб}). \qquad (17)$$

Здесь $V_{с.Б}$ и $V_{с.УК}$ — объемы стока воды через Бухтарминский и Усть-Каменогорский гидроузлы, остальные обозначения те же, что и в формуле (1). Потери воды на оседание снего-ледяного покрова на берегах и приход воды при затоплении его весной не учитываются из-за малой величины их.

Величина стока воды через Усть-Каменогорский гидроузел взята по данным районного управления «Алтайэнерго». Изменение объема Усть-Каменогорского водохранилища вычислено как произведение его площади зеркала на изменение уровня. «Боковая приточность» найдена по модулю стока реки-аналога (р. Левой Березовки), умножая этот модуль на коэффициент 0,88, на площадь водосбора р. Иртыш между Усть-Каменогорским и Бухтарминским гидроузлами (2470 *км*^{2}) и на число секунд в месяце (с приведением затем полученного результата к размерности млрд. *м*^{3}). Слой осадков принимался средневзвешенным по способу медиан по данным наблюдений на метеорологических станциях Усть-Каменогорск (0,24), Огневка (0,47) и Серебрянка (0,29). Слой испарения оценивался по аналогии с Бухтарминским водохранилищем.

Поправочный коэффициент 0,88 к модулю стока р. Левая Березовка

у с. Средигорное выведен на основании сопоставления нормы слоя годового стока той части водосбора р. Иртыш, на которой формируется «боковая приточность» Усть-Каменогорского водохранилища и водосбора р. Левая Березовка.

Результаты расчета величин $V_с$ приведены в сводной таблице водного баланса Бухтарминского водохранилища (таблица 15).

Испарение с водной поверхности водохранилища ($V_{ис}$)

Величина $V_{ис}$ рассчитывается по данным о гидрометеорологических факторах, влияющих на испарение, для такого расчета использована формула, учитывающая наряду с другими факторами влияние разности температуры поверхности воды и воздуха над ней на интенсивность испарения [4]:

$$E = 0{,}14\, n\, [1 + 0{,}8\ W_{200} + f(\Delta t)]\, (e_0 - e_{200})\ мм/мес, \qquad (18)$$

где $f(\Delta t) = 1{,}9\,(1 - e^{-0{,}085\ \Delta t})$ при $\Delta t > 0$ и $f(\Delta t) = e^{0{,}18\ \Delta t} - 1$ при $\Delta t < 0$.

Здесь n — число суток в месяце, W_{200} и e_{200} — скорость ветра *(м/сек)* и абсолютная влажность воздуха *(мб)* на высоте 2 *м* над водной поверхностью, e_0 — максимальная упругость водяных паров *(мб)* при температуре поверхности воды.

В основу вывода расчетной зависимости (18) положены материалы наблюдений на плавучем испарительном бассейне площадью 20 $м^2$, работавшем на Кенгирском водохранилище в 1962 г.

Значения гидроэлементов, входящих в формулу (18), определялись по данным метеорологических станций, расположенных в районе Бухтарминского водохранилища, с учетом изменений характеристик воздушной массы при ее движении над водоемом [2, 3]. Средняя температура поверхности воды водохранилища находилась по методу, изложенному в статье [19]. Вкратце эта методика заключается во введении поправок к температуре, измеренной на береговых постах. Поправка определена путем сопоставления синхронно наблюдавшихся температур воды на береговых постах и средней по всей акватории водохранилища, полученной путем специальной обработки термических съемок. Затем установлена зависимость величины этой поправки от календарного срока.

Результаты расчета величины потерь воды на испарение, равной произведению слоя испарения на площадь водоема, помещены в сводной таблице водного баланса водохранилища (таблица 15).

Испарение с поверхности снего-ледяного покрова водохранилища $V_{ис.з}$

Испарение с поверхности снего-ледяного покрова невелико. Однако из-за большой площади зеркала Бухтарминского водохранилища это слагаемое водного баланса все же достигает 20% приходной части его в зимние месяцы и поэтому должно быть учтено.

Величина $V_{ис.з}$ равна произведению слоя испарения на площадь водохранилища. Для определения слоя испарения с поверхности снега использована формула П. П. Кузьмина [11].

$$E_с = 0{,}18\,(1 + 0{,}68\ W_{200})\,(e_п - e_{200})\, n\ мм/мес, \qquad (19)$$

где $e_п$ — максимальная упругость водяных паров при температуре поверхности снега, а остальные обозначения те же, что и в формуле (18).

Скорость ветра и влажность воздуха берутся по материалам наблю-

дений метеорологических станций, расположенных в районе водохранилища, а значение $e_п$ находится расчетом, используя уравнение теплового баланса поверхности снега. Дело в том, что применяемые для измерения температуры поверхности снега ртутные термометры, шарик которых наполовину погружен в снег, показывают эту температуру неправильно. Объясняется это существенно различными радиационными свойствами шарика термометра и снега.

Подробное изложение методики расчета величины $V_{ис.з}$ дано в статье [5], а результаты расчета помещены в сводной таблице водного баланса водохранилища (таблица 15).

Замыкание водного баланса Бухтарминского водохранилища

Водный баланс составлен за три года: 1962, 1963 и 1964, хотя наполнение водохранилища началось в 1959 г. В первые годы его существования уровень воды в нем не измерялся, что не дает возможности подсчитать величину изменения его объема.

В таблице 15 показаны все слагаемые водного баланса по месяцам за три года без учета сработки и накопления воды в грунтах, находящихся в зоне подпора подземных вод, окружающих чашу водохранилища. Годовой баланс замыкается с наибольшей невязкой 2%, месячные — до 10%. Среднеквадратичная ошибка месячных балансов составляет 5%.

Полученный результат говорит о том, что в условиях режима уровней 1962—1964 гг. водообмен с грунтовыми водами, окружающими водохранилище, невелик и значения его лежат в пределах точности измерения слагаемых водного баланса. Однако в условиях значительного изменения уровня и связанного с этим изменения количества воды, аккумулированной в окружающих водохранилище грунтах, потребуется учет изменения емкости «грунтового бассейна», что должно являться предметом специальной работы.

Сравнительно небольшие ошибки, полученные при замыкании водного баланса водохранилища за три года, дают основание сделать вывод о том, что точность определения слагаемых баланса удовлетворительна и это позволяет использовать методы такого определения, изложенные в настоящей статье.

При дальнейшем усовершенствовании методики составления водного баланса Бухтарминского водохранилища желательно выполнить следующие работы:

1. Уточнить объем «боковой приточности» путем прямого измерения стока ряда мелких рек при впадении их в водохранилище, а не выше орошаемой территории; тогда окажется возможным оценивать сток таких рек прямым путем, а не по разности расходов воды, поступающей на орошаемую территорию и расходуемой на транспирацию растений, произрастающих на поливных землях.

2. Улучшить качество наблюдений за уровнями озерной части водохранилища, увеличить число водомерных постов в западной части оз. Зайсан, открыть пост в районе пересечения «нулевых линий» в чаше озера.

3. Протарировать турбины Бухтарминской ГЭС и водосливные отверстия плотины и определять сток воды через этот гидроузел, используя сведения о мощности и напоре ГЭС, открытии водосливных отверстий плотины и расходов воды на шлюзование.

4. Провести достаточно подробные маршрутные снегосъемки на поверхности ледяного покрова водохранилища для получения объективных данных о запасе воды в снежном покрове, лежащем на льду водохранилища.

Таблица 15

Водный баланс Бухтарминского водохранилища (объем воды в млрд. м³)

Наименование		Месяцы												Год	
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	млрд. м³	%
							1962 г.								
Приход	$V_п$	0,43	0,35	0,66	2,20	5,68	3,28	1,53	1,21	0,70	0,64	0,40	0,36	17,44	65,0
	$V_{пн}$	0,15	0,13	0,16	0,58	0,63	0,37	0,19	0,16	0,15	0,15	0,15	0,12	2,94	11,0
	$V_{ос}$	0 05	0,03	0,08	0,09	0,08	0,11	0,14	0,12	0,07	0,09	0,08	0,11	1,05	4,0
	$V_{зл}$	—	—	0,02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,02	0,1
	$\Delta V_{сраб}$	0,25	0,24	—	—	—	—	0,71	1,15	1,12	1,10	0,45	0,29	5,31	19,9
	Сумма	0,88	0,75	0,92	2,87	6,39	3,76	2,57	2,64	2,04	1,98	1,08	0,88	26,76	100,0
Расход	$V_с$	0,67	0,61	0,59	0,95	0,84	1,24	1,49	1,42	1,41	1,45	0,83	0,74	12,24	46,0
	$V_{ис}$	—	—	—	0,08	0,41	0,76	1,12	0,95	0,74	0,34	0,17	—	4,57	17,1
	$V_{ис.з}$	0,01	0,03	0,07	—	—	—	—	—	—	—	0,04	0,04	0,19	0,7
	$V_{ор}$	0,20	0,05	0,10	0,15	0,55	0,55	0,05	0,15	0,05	0,10	0,05	0,10	2,10	7,9
	$V_л$	—	0,02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,01	0,03	0,1
	$\Delta V_{накоп}$	—		0,08	1,82	4,64	0,98	—	—	—	—	—	—	7,52	28,2
	Сумма	0,88	0,71	0,84	3,00	6,44	3,53	2,66	2,52	2,20	1,89	1,09	0,89	26,65	100,0
	млрд. м³	0	0,04	0,08	—0,13	—0,05	0,23	—0,09	0,12	—0,16	0,09	—0,01	—0,01	0,11	
	Невязка, %	0	5	9	—4	—1	6	—4	5	—8	4	1	—1	0,6	
							1963 г.								
Приход	$V_п$	0,29	0,24	0,46	0,80	2,48	4,27	1,84	1,22	0,79	0,76	0,64	0,38	14,17	63,8
	$V_{пн}$	0,13	0,10	0,18	0,42	0.53	0,34	0,17	0,12	0,11	0,12	0,13	0,11	2,46	11,1
	$V_{ос}$	0,04	0,05	0,05	0,10	0,06	0,23	0,15	0,09	0,10	0,13	0,14	0,09	1,23	5,5
	$V_{зл}$	—	—	—	—	0,07	—	—	—	—	—	—	—	0,07	0,3
	$\Delta V_{сраб}$	0,64	0,42	0,19	—	—	—	0,06	0,75	0,88	0,72	0,26	0,39	4,28	19,3
	Сумма	1,10	0,81	0,88	1,32	3,14	4,84	2,22	2,18	1,88	1,73	1,17	0,97	22,21	100,0

Продолжение таблицы 15

Наименование		Месяцы												Год	
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	млрд. $м^3$	%
Расход	$V_с$	0,78	0,74	0,75	0,93	1,01	1,21	1,36	1,36	1,33	1,35	0,94	0,74	12,50	55,1
	$V_{ис}$	—	—	—	0,22	0,40	0,70	0,96	0,77	0,56	0,31	0,18	0,03	4,13	18,2
	$V_{ис.з}$	0,02	0,03	0,08	—	—	—	—	—	—	—	0,03	0,03	0,19	0,8
	$V_{ор}$	0,20	0,05	0,10	0,15	0,55	0,55	0,05	0,15	0,05	0,10	0,05	0,10	2,10	9,2
	$V_л$	0,03	0,03	0	—	—	—	—	—	—	—	—	0,01	0,07	0,3
	$\Delta V_{накоп}$	—	—	—	0,04	1,14	2,56	—	—	—	—	—	—	3,74	16,4
	Сумма	1,03	0,85	0,93	1,33	3,10	5,02	2,37	2,28	1,94	1,77	1,20	0,91	22,73	100,0
	млрд. $м^3$	0,07	—0,04	—0,05	—0,02	0,04	—0,18	—0,15	—0,10	—0,06	—0,04	—0,03	0,06	—0,52	
Невязка, %		6	—5	—6	—2	1	—4	—7	—5	—3	—2	—2	7	—2	
		1964 г.													
Приход	$V_п$	0,37	0,25	0,31	1,37	3,81	4,81	2,66	1,53	0,78	0,68	0,49	0,31	17,37	66,9
	$V_{пн}$	0,08	0,05	0,11	0,42	0,41	0,31	0,35	0,17	0,11	0,12	0,11	0,10	2,34	9,0
	$V_{ос}$	0,03	0,03	0,07	0,10	0,10	0,14	0,10	0,10	0,08	0,14	0,05	0,14	1,08	4,1
	$V_{зл}$	—	—	—	—	0,11	—	—	—	—	—	—	—	0,11	0,4
	$\Delta V_{сраб}$	0,43	0,60	0,47	0,25	—	—	—	0,60	1,17	0,77	0,45	0,37	5,11	19,6
	Сумма	0,91	0,93	0,96	2,14	4,43	5,26	3,11	2,40	2,14	1,71	1,10	0,92	26,01	100,0
Расход	$V_с$	0,75	0,76	0,82	1,82	1,85	1,08	1,32	1,41	1,42	1,35	0,95	0,81	14,31	54,7
	$V_{ис}$	—	—	—	0,05	0,29	0,60	0,95	0,75	0,56	0,33	0,12	0,02	3,67	14,0
	$V_{ис.з}$	0,01	0,03	0,08	—	—	—	—	—	—	—	0,03	0,03	0,18	0,7
	$V_{ор}$	0,20	0,05	0,10	0,15	0,55	0,55	0,05	0,15	0,05	0,10	0,05	0,10	2,10	8,0
	$V_л$	0,02	0,05	0,03	—	—	—	—	—	—	—	—	0,01	0,11	0,4
	$\Delta V_{накоп}$	—	—	—	—	1,84	3,07	0,92	—	—	—	—	—	5,83	22,2
	Сумма	0,98	0,89	1,03	2,01	4,53	5,30	3,24	2,31	2,03	1,78	1,12	0,97	26,20	100,0
	млрд. $м^3$	—0,07	0,04	—0,07	0,12	—0,10	—0,04	—0,13	0,09	0,11	—0,07	—0,02	—0,05	0,18	
Невязка, %		—8	4	—7	6	—2	—1	—4	4	5	—4	—2	—5	1	

5. Организовать наблюдения за атмосферными осадками на островных и плавучих метеорологических станциях и уточнить по этим данным количество воды, выпадающее на площадь зеркала водохранилища в виде осадков.

6. Организовать исследования величины потерь воды с зарослей полупогруженных водных растений методом теплового баланса и больших испарителей-транспираторов с целью проверки правильности принятия величины слоя этих потерь, равного слою испарения с открытой водной поверхности, поскольку единого мнения по этому вопросу не существует.

7. Продолжить наблюдения за испарением и факторами, влияющими на него на плавучем испарительном бассейне площадью 20 $м^2$, установленном в Бухтарминском заливе водохранилища; по материалам наблюдений проверить и, если потребуется, уточнить формулу, примененную для расчета слоя испарившейся воды с поверхности водохранилища.

8. Обеспечить выполнение систематических термических съемок водохранилища один раз в декаду с одновременными учащенными (ежечасными) измерениями температуры воды на береговых постах, в частности в период после схода ледяного покрова весной и перед замерзанием водохранилища осенью. На основании этих материалов уточнить поправку к температуре береговых постов для перехода от их показаний к средней для всего водохранилища температуре поверхности воды.

9. Рассмотреть вопрос о величине накопления и сработки воды в «грунтовом бассейне», окружающей чашу водохранилища, на основании гидрогеологических исследований и анализа водного баланса в периоды с резким повышением его уровня.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреянов В. Г., Руденко С. И. Об учете влияния ледяного и снежного покрова на водный баланс естественных и искусственных водоемов. «Метеорология и гидрология», 1939, № 1.

2. Браславский А. П. Исследования и расчеты гидрологического режима озер и водохранилищ. Доклад, представляемый на соискание ученой степени доктора технических наук по совокупности опубликованных работ. Алма-Ата, 1966.

3. Браславский А. П. К вопросу о расчете изменения влажности и температуры воздуха при движении воздушного потока над водной поверхностью. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 1. Алма-Ата, Изд-во АН КазССР, 1963.

4. Браславский А. П., Нургалиев С. Н. Новая формула для расчета испарения с учетом разности температур вода—воздух. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 4. Алма-Ата, «Наука», 1966.

5. Браславский А. П., Шергина К. Б. К вопросу оценки потерь воды на испарение из водохранилища Бухтарминской ГЭС. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 6. Алма-Ата, «Наука», 1968.

6. Голубев В. С. Об учете дождевых осадков различными приборами. «Труды Государственного гидрологического института», вып. 81. Л., Гидрометеоиздат, 1960.

7. Голубев В. С. Оценка точности учета осадков осадкомером Третьякова. «Труды Государственного гидрологического института», вып. 96. Л., Гидрометеоиздат, 1962.

8. Караушев А. В. Гидравлика рек и водохранилищ. Л., «Речной транспорт», 1955.

9. Константинов А. Р. Испарение в природе. Л., Гидрометеоиздат, 1963.

10. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф., Россинский К. И. Зимний термический режим водохранилищ, рек и каналов. М.—Л., Госэнергоиздат, 1947.

11. Кузьмин П. П. К методике исследований и расчета испарения с поверхности снежного покрова. «Труды Государственного гидрологического института», вып. 41 (95). Л., Гидрометеоиздат, 1953.

12. Методические указания Управления гидрометслужбы. Л., Гидрометеоиздат, 1960, № 55.

13. Никулин П. И. Осадки, выпадающие в районе Куйбышевского водохранилища, и их роль в его водном балансе. Сб. работ Комсомольской гидрометеорологической обсерватории, вып. I. Куйбышев, 1962.

14. Рымша В. А., Донченко Р. В. Исследование теплопотерь открытой водной поверхности в зимнее время. «Труды Государственного гидрологического института», вып. 65. Л., Гидрометеоиздат, 1958.

15. Соседов И. С., Болдырев В. И. Карта среднего годового стока рек Восточного Казахстана. «Вопросы географии в Казахстане», вып. 3. Алма-Ата, Изд-во АН КазССР, 1961.

16. Струзер Л. Р., Нечаев И. Н., Богданова Э. Г., Федорова С. В. Методика корректировки многолетних норм осадков. «Метеорология и гидрология», 1965, № 11.

17. Струзер Л. Р. Основные недостатки и пути улучшения методов изменения атмосферных осадков. «Труды Главной геофизической обсерватории», вып. 175. Л., Гидрометеоиздат, 1965.

18. Чертоусов М. Д. Специальный курс гидравлики. М., Госэнергоиздат, 1949.

19. Шергина К. Б. Определение средней температуры поверхности воды водохранилищ. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 4. Алма-Ата, «Наука», 1966.

SUMMARY

A method for determination of the Bukhtarma reservoir components of water balance and their coordination during monthly and yearly intervals is considered.

The Bukhtarma reservoir water balance for the years of 1962, 1963 and 1964 closed with maximum noncoordination of 2 per cent per year and up to 10 per cent per month. Standard deviation of monthly balances comprised 5 per cent. Thus a conclusion may be drawn that precision of determination of balance components is satisfactory and it would be possible to use methods, described in the paper, for their determination.

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
1970 *ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА* вып. 7.

Д. МАМАТКАНОВ

ОБ УЧЕТЕ ИНЕРЦИОННОЙ И ЦИКЛИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ПРИ ДОЛГОСРОЧНОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ВЕЛИЧИН СТОКА

Обоснованное проектирование схем комплексного использования стока рек и выбор оптимальных параметров гидроузлов и гидроэлектростанций, дающий наибольший народнохозяйственный эффект, связаны с необходимостью технико-экономического сопоставления множества вариантов развития и режимов энергетических и водохозяйственных систем, рассчитанных на длительный срок службы.

В свою очередь, параметры и режимы гидроустановок определяются режимом изменения колебаний используемого источника воды на предстоящий период его работы. Следовательно, первоочередная задача расчетов стока заключается в предвычислении характеристик, его будущего режима, свойственного периоду предстоящей эксплуатации гидротехнических сооружений [16]. Для осуществления этой задачи необходимо изучить закономерности, которые проявляются в многолетних колебаниях рассматриваемого источника воды и предвидеть будущий режим его изменения.

В настоящее время речной сток можно считать вероятностным процессом с существенными ближними и дальними внутрирядными связями. Об этом свидетельствуют корреляционные связи между величинами стока соседних интервалов времени [8—10], показывающие, что величина стока данного года зависит не только от водности одного предшествующего года, но и более ранних лет. Коэффициент же корреляции с увеличением промежутка времени между рассматриваемыми интервалами не только не уменьшается, но, как правило, увеличивается, достигая весьма высоких значений (0,7 и даже выше). При этом наблюдается тенденция к вполне определенной, но нестрогой периодичности.

Следовательно, более приемлемым является представление процесса стока как сложного процесса Маркова с дискретным временем. Поэтому в расчетах необходимо учитывать корреляционные связи не только непосредственно смежных лет, но и с более ранними годами. Однако в этом случае имеются многие неясности. Они связаны с тем, что принципиально правильным было бы представление процесса стока сложным процессом Маркова, если бы был известен предел, до которого следует учитывать связь с предшествующими годами. К сожалению, такого предела в настоящее время даже ориентировочно наметить нельзя [9].

Из изложенного ясно, что разработка методики расчетов предвидения будущего режима, учитывающая как ближнюю, так и дальнюю связь, является актуальной задачей, имеющей большое теоретическое и практическое значение. Именно этому вопросу и посвящается данная работа.

Как известно, многоводные и маловодные годы в многолетнем разрезе наступают группами. Одной из причин такого явления может быть наличие в ходе стока своеобразной «инерции», связанной с расходом

воды, поступающей в реку с ее водосбора, зависящей от уровня подземных и поверхностных вод, т. е. от состояния их запасов [16]. Поскольку эти запасы выполняют функции регулятора, то, естественно, они и являются причиной возникновения связи между стоками смежных лет. Поэтому при расчетах никак нельзя пренебречь объективно существующей «инерционной» связью. Дальше эти связи будут уменьшаться. Однако результаты исследований большинства авторов [1, 3, 4, 8—10, 13, 17 и др.] показывают, что многолетним колебаниям годовых величин стока свойственна цикличность (не вполне определенная периодичность) с различной длительностью циклов. При этом, как отмечено выше, получается, что связь элементов, разделенных промежутком времени, равным продолжительности цикла, оказывается линейной и довольно тесной. Так, например, результаты работ [9, 10] показывают, что в многолетних колебаниях средних уровней и полезной приточности в оз. Байкал наблюдается сильная тенденция к 25—26-летней периодичности. Максимальные коэффициенты корреляции при промежутках времени между сравниваемыми годами, равными циклу колебаний, соответственно получились 0,74 и 0,62. На других реках также наблюдаются сильные тенденции к периодичности: на реке Туре у г. Тюмени наблюдается тенденция к 48-летней периодичности ($r=0{,}62$), на реке Нарыне у г. Уч-Кургана — 31-летней периодичности ($r=0{,}62$), на р. Эльбе у г. Течена — 71-летней периодичности ($r=0{,}74$) и т. д. Такое большое разнообразие имеющихся и четко проявляющихся тенденций к цикличности с тесной линейной корреляционной связью ($r>0{,}6$) отражает в какой-то степени территориальные особенности колебаний процесса стока рек. Следовательно, учет разнообразия цикличности многолетних колебаний стока рек в практических расчетах вызывает вполне определенный интерес.

В частности, наличие такого рода тесной линейной «циклической» связи между стоками рассматриваемого процесса, разделенным промежутком времени τ лет, равным продолжительности цикла или кратному ему, а также существование корреляционной связи непосредственно смежных лет позволяет предвидеть возможные величины стока с учетом «циклических» и «инерционных» связей, которые свойственны данному источнику воды. При этом прогноз может быть определен с помощью выражения Q_i $(Q_{i-1}, Q_{i-\tau})$, означающего вероятность появления в i-м году величины Q_i, при условии, что в $(i-1)$-м году и $(i-\tau)$-м году она соответственно принимала значение Q_{i-1} и $Q_{i-\tau}$. Такой учет «циклических» связей наравне с «инерционной» связью для предвидения вероятностных величин стока возможен в тех случаях, когда цикличность, выявленная по прошлому ряду наблюдений, сохранится в будущем.

Однако прогнозирование вероятностных величин стока только с учетом отдельных дальних (циклических) и непосредственно смежных связей является недостаточным. В этом отношении большого внимания заслуживает графоаналитический и алгебраический способы экстраполирования Ю. М. Алехина [1]. Их преимущество состоит в том, что получаемые величины стока на i-й год учитывают корреляционные связи со стоками предшествующих n-летий, т. е. процесс стока описывается как сложный процесс Маркова. Однако в этом случае существуют неопределенности, отмеченные выше.

В связи с этим остановимся на некоторых способах предвидения всевозможных значений годового стока (с указанием присущей им вероятности появления) с учетом отдельных, явно существующих, циклических и инерционных связей, предполагая, что цикличность колебаний, выявленная по прошлому ряду наблюдений, сохранится и в будущем.

Способ 1. Если среднегодовые величины стока i-года со стоками $(i-1)$-го и $(i-\tau)$-го года имеют тесную инерционную и циклическую связи, то условное математическое ожидание стока i-го года относительно $(i-1)$-го и $(i-\tau)$-го года выражается с помощью уравнения линейной регрессии:

$$\bar{Q}_i(Q_{i-1}, Q_{i-\tau}) = \bar{Q}_i + \frac{r(i,i-1) - r(i-1,i-\tau)\cdot r(i,i-\tau)}{1-r^2(i-1,i-\tau)} \cdot \frac{\sigma(Q_i)}{\sigma(Q_{i-1})}\cdot(Q_{i-1} - \bar{Q}_{i-1}) + \frac{r(i,i-\tau) - r(i-1,i-\tau)\cdot r(i,i-1)}{1-r^2(i-1,i-\tau)} \cdot \frac{\sigma(Q_i)}{\sigma(Q_{i-\tau})}\cdot(Q_{i-\tau} - \bar{Q}_{i-\tau}), \quad (1)$$

имеющей условное среднеквадратическое отклонение:

$$\sigma(Q_i \mid Q_{i-1}, Q_{i-\tau}) = \sigma(Q_i)\cdot \sqrt{1 - \frac{r^2(i,i-1) + r^2(i,i-\tau) - 2r(i,i-1)\cdot r(i,i-\tau)\cdot r(i-1,i-\tau)}{1-r^2(i-1,i-\tau)}}. \quad (2)$$

В этих выражениях Q_{i-1} и $Q_{i-\tau}$ есть величина годового стока, наблюдавшаяся в $(i-1)$-м и $(i-\tau)$-м году, а $\bar{Q}_i$, $\bar{Q}_{i-1}$ и $\bar{Q}_{i-\tau}$ есть величина безусловного математического ожидания возможных величин стока, соответствующих i-му, $(i-1)$-му и $(i-\tau)$-му году, $r(i, j)$ есть величина корреляционной связи между стоком i-го и j-го года.

Выражение

$$r_0 = \sqrt{\frac{r^2(i,i-1) + r^2(i,i-\tau) - 2r(i,i-1)\cdot r(i,i-\tau)\cdot r(i-1,i-\tau)}{1-r^2(i-1,i-\tau)}} \quad (3)$$

называется общим коэффициентом корреляции. Следовательно, уравнение (2) пишется так:

$$\sigma(Q_i \mid Q_{i-1}, Q_{i-\tau}) = \sigma(Q_i)\sqrt{1-r_0^2}. \quad (4)$$

При этом величины стока i-го года Q_{ip} с обеспеченностью p, при условии, что в $(i-1)$-м и $(i-\tau)$-м году он принимал значение Q_{i-1} и $Q_{i-\tau}$ определяются по формуле:

$$Q_{ip}(Q_{i-1}, Q_{i-\tau}) = [1 + C_v^{(i)}\sqrt{1-r_0^2}\cdot\Phi_{ip}]\cdot\bar{Q}_i(Q_{i-1}, Q_{i-\tau}). \quad (5)$$

Здесь величины $\Phi_{ip} = \Phi_p(Q_i/Q_{i-1}, Q_{i-\tau})$ есть ординаты отклонения кривой обеспеченности от середины (в модульных коэффициентах), определяемой по таблице Фостера-Рыбкина в зависимости от условного коэффициента асимметрии $C_{s\,усл}^{(i)}$, выражаемой формулой:

$$C_{s\,усл}^{(i)} = \frac{2\sigma(Q_i)\sqrt{1-r_0^2}}{\bar{Q}_i(Q_{i-1}, Q_{i-\tau})}. \quad (6)$$

При условии статистической стационарности рассматриваемого процесса можно предполагать, что $\bar{Q}_i = \bar{Q}_{i-1} = \bar{Q}_{i-\tau} = \bar{Q}$ и $\sigma(Q_i) = \sigma(Q_{i-1}) = \sigma(Q_{i-\tau}) = \sigma$. В этом случае зависимости (1) и (6) запишутся:

$$\bar{Q}_i(Q_{i-1}, Q_{i-\tau}) = \bar{Q} + \frac{r(i,i-1) - r(i-1,i-\tau)\cdot r(i,i-\tau)}{1-r^2\cdot(i-1,i-\tau)}\cdot(Q_{i-1} - \bar{Q}) + \frac{r(i,i-\tau) - r(i-1,i-\tau)\cdot r(i,i-1)}{1-r^2(i-1,i-\tau)}\cdot(Q_{i-\tau} - \bar{Q}), \quad (7)$$

$$C_{s\,усл}^{(i)} = \frac{2\sigma\sqrt{1-r_0^2}}{\bar{Q}_i(Q_{i-1}, Q_{i-\tau})}. \quad (8)$$

Выражения (5), (7) и (8) в модульных коэффициентах соответственно запишутся в виде:

$$k_{ip}(k_{i-1},\ k_{i-\tau}) = (1 + C_v\sqrt{1-r_0^2}\cdot\Phi_{ip})\,\overline{k}_i(k_{i-1},\ k_{i-\tau}); \tag{9}$$

$$\overline{k}_i(k_{i-1},\ k_{i-\tau}) = 1 + \frac{r(i,i-1)-r(i-1,i-\tau)\cdot r(i,i-\tau)}{1-r^2(i-1,i-\tau)}(k_{i-1}-1) + \\ + \frac{r(i,i-\tau)-r(i-1,i-\tau)\cdot r(i,i-1)}{1-r^2(i-1,i-\tau)}(k_{i-\tau}-1); \tag{10}$$

$$C_{s\,усл}^{(i)} = \frac{2\,C_v\sqrt{1-r_0^2}}{\overline{k}_i(k_{i-1},\ k_{i-\tau})}. \tag{11}$$

Полученные формулы (9—11), а также (5), (7) и (8) являются расчетными формулами долгосрочного прогнозирования вероятностных величин стока, соответственно в относительных и абсолютных единицах с заблаговременностью в один год. При этом в обоих случаях общий коэффициент корреляции определяется по формуле (3).

Для проведения практических расчетов на основе имеющихся натурных данных наблюдений, необходимо выявить длительность цикла, которая соответствует регулярно повторяющимся положительным пикам вычисленной корреляционной функции. Подставляя найденное значение длительности цикла τ и C_v, а также необходимых коэффициентов корреляции в уравнения (3) и (9—11), получаем окончательные выражения для прогнозирования вероятностных величин стока на i-й год по данным $(i-1)$-го и $(i-\tau)$-го года. Для этого величины k_{i-1} и $k_{i-\tau}$, наблюдаемые в $(i-1)$ и $(i-\tau)$-м году, подставляются в расчетные формулы (9—10).

По выражению (10) определяется величина условного математического ожидания, которая подставляется в формулу (9), а по (11) определяется величина условного коэффициента асимметрии, по которой из таблицы Фостера-Рыбкина находим величину относительного отклонения ординаты биномиальной кривой распределения i-го года Φ_{ip}, соответствующего определенной величине обеспеченности p. Подставляя найденные значения Φ_{ip} в (9), находим значение $k_{ip}(k_{i-1},\ k_{i-\tau})$, соответствующее заданным значениям обеспеченностей p. Следовательно, прогноз получается в виде условной «прогностической» кривой обеспеченности.

Пример. Рассмотрим среднегодовые уровни оз. Байкал, имеющего гидрометрические наблюдения с 1887 по 1958 год длительностью $n=72$ года. По этим данным среднемноголетний уровень (над нулем графика) $\overline{H}=126{,}08$ *см*, а коэффициент вариации $C_v=0{,}12$.

Прогнозирование среднегодовых уровней оз. Байкал нам больше всего интересно тем, что, во-первых, как отмечено выше, многолетним колебаниям его свойственна 25-летняя цикличность [9, 10], во-вторых, само существование оз. Байкал, играя роль естественного регулятора, повышает корреляционную связь непосредственно смежных лет и, наконец, имеет более или менее длительные ряды наблюдений ($n=72$). Эти фактически наблюдавшиеся данные приведены на рис. 1 сплошной линией.

Для определения чистого прогноза и для сравнения его с фактическими данными характеристики колебаний среднегодовых уровней оз. Байкал получены за период наблюдений 1887—1948 гг. По этим 62-летним данным (из 72) вычислены необходимые нам величины:

$$\left.\begin{aligned} &C_v = 0{,}126,\\ &r(i,\ i-1) = 0{,}68,\\ &r(i,\ i-25) = 0{,}56,\\ &r(i-1,\ i-25) = r(i,\ i-24) = 0{,}62. \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

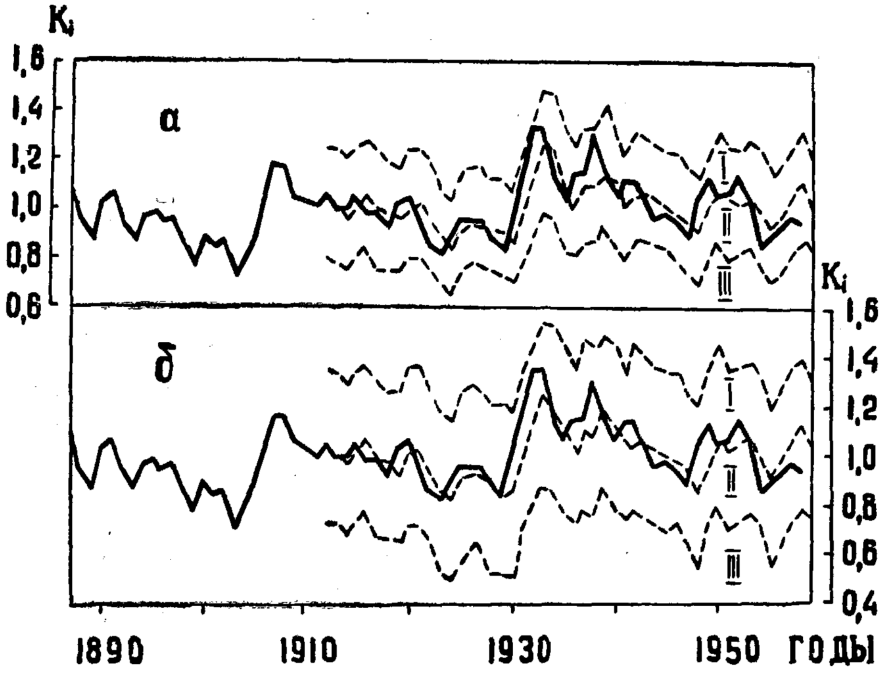


Рис. 1. Графики, иллюстрирующие долгосрочный прогноз вероятностных величин среднегодовых уровней оз. Байкал с учетом отдельных дальних и ближних связей: I — $p\,(k_i/k_{l-1}, k_{l-\tau}) = 1\%$;
II — $p(k_i/k_{l-1},\ k_{l-25}) = 48\%$, т. е. наиболее вероятной обеспеченностью;
III — $p(k_i\ k_{l-1},\ k_{l-25}) = 99\%$; _____ — фактические данные наблюдений.

Подставляя найденные коэффициенты корреляции и вариации из (12) в формулы (3) и (9—11), получим:

$$k_{ip}(k_{l-1},\ k_{l-25}) = (1+0{,}095\,\Phi_{ip})\cdot\bar{k}_i(k_{l-1},\ k_{l-25}), \tag{13}$$

$$\bar{k}_i\,(k_{l-1},\ k_{l-25}) = 0{,}53\,k_{l-1} + 0{,}23\,k_{l-25} + 0{,}24, \tag{14}$$

$$C_{s.\,усл}^{(i)} = \frac{0{,}19}{\bar{k}_i\,(k_{l-1},\ k_{l-25})}. \tag{15}$$

Полученные выражения (13—15) являются окончательными расчетными формулами для прогнозирования среднегодовых уровней оз. Байкал на любой i-й год по данным (i—1) и (i—τ)-го года. Так, например, по данным i—25 = 1887 и i—1 = 1911 года, модульные коэффициенты которых соответственно равны 1,079 и 0,999, можно составлять прогноз среднегодового уровня на 1912 год. В этом случае формулы (13—15) имеют вид:

$$k_{1912p}(1{,}079_{1887},\ 0{,}999_{1911}) = 1{,}018 + 0{,}066\ \Phi_{1912p} \tag{16}$$

$$C_{s.\,усл}^{(1912)} = 0{,}147 \approx 0{,}15. \tag{17}$$

По полученным значениям $C_{s.\,усл}^{(1912)}$ из таблицы Фостера-Рыбкина находим значение Φ_{1912}, соответствующее принятому значению обеспеченности p при условии, что в 1887 и 1911 гг. соответственно были k—$_{1887} = 1{,}079$ и k—$_{1911} = 0{,}999$.

На основании таблицы 1 можно построить условную прогностическую кривую обеспеченности на 1912 год, по которой определяются всевозможные значения среднего уровня оз. Байкал с учетом инерцион-

ной и циклической связи. По этой кривой наиболее вероятное значение его, соответствующее обеспеченности среднемноголетнего уровня ($p=48\%$ при $C_v=0{,}12$), получилось 129, 2 *см*. В действительности среднегодовой уровень был 130 *см*, что соответствует обеспеченности 47,8%. Аналогично можно составить прогноз и на следующий — 1913 год, по данным 1888 и 1912 гг., и т. д.

Таблица 1

p %	1	5	10	25	50	75	90	95	99
Φ_{1912p}	2,47	1,70	1,30	0,65	—0,03	—0,69	—1,26	—1,58	—2,18
K_{1912p} $(1{,}079_{1887}, 0{,}999_{1911})$	1,26	1,18	1,14	1,08	1,02	0,95	0,90	0,87	0,81

Однако при составлении прогнозов можно ограничиться точками прогностических кривых обеспеченностей, соответствующих обеспеченностям 1% и 99%, указывающим верхние и нижние границы прогноза и обеспеченности математического ожидания (в данном случае 48% при $C_v=0{,}12$), Для этого достаточно найти из таблицы Фостера-Рыбкина значение Φ_i, соответствующее только этим обеспеченностям при известном $C_{s.\,усл}^{(i)}$ и подставить в формулу (13). Результаты таких прогнозов, составленных с учетом инерционной и циклической связи среднегодовых уровней оз. Байкал за 1912—1959 годы, по данным 1887—1958 гг., приведены на рис. 1(а).

Проверочные прогнозы за 1912—1958 годы показывают, что почти все фактические значения среднегодовых уровней находятся в пределах, определяемых прогнозом, а наиболее вероятные величины прогноза очень хорошо согласуются с фактически наблюденными данными.

Способ 2. Предвидение возможных величин стока с учетом циклических и инерционных связей можно осуществить также с помощью условной функции распределения, выражаемой формулой:

$$F(k_i \mid k_{i-1}, k_{i-\tau}) = \int_0^\infty f(k_i \mid k_{i-1}, k_{i-\tau})\, dk_i, \qquad (18)$$

означающей вероятность того, что в любой момент времени бытовой приток не более k_i (в модульных коэффициентах), при условии, что в момент времени $(i-1)$ и $(i-\tau)$, имеющих с ним тесную инерционную и циклическую связи, он был k_{i-1}, $k_{i-\tau}$.

Здесь величина $f(k_i \mid k_{i-1}, k_{i-\tau})$ есть условная плотность распределения среднегодовых величин бытового притока. Однако, как известно, процесс стока подчиняется биномиальному закону распределения и в подавляющем большинстве случаев в гидрологии используется безусловная плотность распределения, характеризуемая формулой.

$$f(x) = \frac{\gamma^\gamma}{\Gamma(\gamma)} x^{\gamma-1} \cdot e^{-\gamma x},$$

$$\text{где} \quad \gamma = \frac{1}{C_v^2} \quad \text{или} \quad C_v = \frac{1}{\sqrt{\gamma}}. \qquad (19)$$

$\Gamma(\gamma) = \int_0^\infty t^{\gamma-1} e^t dt$ есть интеграл Эйлера, или так называемая гамма-функция, а t — текущая координата, исключаемая при подстановке пределов интегрирования.

Использование этой формулы в расчетах связано с большой затратой труда и времени. Кроме того, аналитическое выражение условной

плотности распределения этого вида, удобное для практического использования, отсутствует. И в-третьих, почти все основные вопросы теории вероятностей разработаны применительно к нормальному закону распределения, что значительно затрудняет применение аппарата теории вероятностей к водохозяйственным и водоэнергетическим расчетам, связанным условными законами биномиального распределения.

В связи с этим, можно пользоваться условной плотностью распределения бытового притока воды, выраженной через его неубывающую функцию φ, подчиняющейся нормальному нормированному закону распределения [12]

$$f(k_i \mid k_{i-1}, k_{i-\tau}) = \frac{1}{\sigma(k_i \mid k_{i-1}, k_{i-\tau})\sqrt{2\pi}} exp\left[-\frac{t^2}{2\sigma^2(k_i \mid k_{i-1}, k_{i-\tau})}\right], \quad (20)$$

где $t = \varphi(k_i) - \frac{\sigma(k_i)}{\sigma(k_{i-1})} \cdot \frac{r(i,i-1) - r(i-1,i-\tau)\cdot r(i,i-\tau)}{1-r^2(i-1,i-\tau)} \cdot \varphi(k_{i-1}) -$

$$- \frac{\sigma(k_i)}{\sigma(k_{i-\tau})} \cdot \frac{r(i,i-\tau - r(i-1,i-\tau)\cdot r(i,i-1)}{1-r^2(i-1,i-\tau)} \cdot \varphi(k_{i-\tau}). \quad (21)$$

Величина $\sigma(k_i \mid k_{i-1}, k_{i-\tau})$ есть, как и в выражениях (2—4), условное среднеквадратическое отклонение величины годового притока и выражается теми же формулами.

$\varphi(k)$ — неубывающая функция всевозможных величин стока подчиненная нормальному закону распределения и выраженная формулой:

$$F(k) = \frac{1}{2} + \Phi[\varphi(k)], \quad (22)$$

где Φ — нормированная нормальная функция Лапласа, или интеграл вероятности. При этом $\Phi[-\varphi(\kappa)] = -\Phi[\varphi(\kappa)]$. Таблица значений неубывающей функции $\varphi(\kappa)$, полученная нами, приведена в приложении 1, что облегчает применение функции (18) в практических расчетах.

Следовательно, подставляя значение условной плотности распределения (20) и проведя некоторое преобразование, получим окончательную формулу:

$$F(k_i \mid k_{i-1}, k_{i-\tau}) = \frac{1}{2} + \Phi\left[\varphi(k_i) - \frac{r(i,i-1) - r(i-1,i-\tau)\cdot r(i,i-\tau)}{1-r^2(i-1,i-\tau)} \cdot \varphi(k_{i-1}) - \frac{r(i,i-\tau) - r(i-1,i-\tau)\cdot r(i.i-1)}{1-r^2(i-1,i-\tau)} \cdot \varphi(k_{i-\tau})\right]. \quad (23)$$

Полученные формулы (22) и (23) позволяют прогнозировать возможные величины стока в виде условной прогностической кривой распределения или условной кривой обеспеченности с помощью выражения

$$P(k_i \mid k_{i-1}, k_{i-\tau})\% = [1 - F(k_i \mid k_{i-1}, k_{i-\tau})] \cdot 100\%. \quad (24)$$

Так же, как и выше, прогнозы могут быть представлены и в виде последовательности рядов с определенной вероятностью. Для этого необходимо задавать в формулах (23) или (24) определенное значение p или F. Из всего сказанного ясно, что получаемые прогнозы являются наиболее полными и отличаются простотой и легкостью расчетов.

Для примера рассмотрим среднегодовые уровни оз. Байкал при тех же данных, что и в предыдущем примере. В этом случае расчетная формула (23) имеет вид:

$$F(k_i \mid k_{i-1}, k_{i-25}) = 0{,}5 + \Phi[\varphi(k_i) - 0{,}53\varphi(k_{i-1}) - 0{,}23\varphi(k_{i-25})]. \quad (25)$$

Далее, при заданных значениях k_{i-1} и k_{i-25} на основании формулы (22), из табл. 1 находим соответствующее им значение неубывающей функции $\varphi(k_{i-1})$ и $\varphi(k_{i-25})$. Подставляя их и задавая различные значения k_i, находим величины $\varphi(k_i)$, по которым определяем вероятность

появления заданных значений бытового притока i-го года. В результате таких расчетов прогноз на любой i-й год может быть составлен в виде условной функции распределения или с помощью выражения (24) в виде условной кривой обеспеченности.

Прогноз может быть составлен и в виде последовательности рядов с определенной вероятностью ($F=const$). В частности, на рис. 1 (б) приведены результаты прогнозов среднегодовых уровней оз. Байкал, соот-

Приложение 1

Таблица значений неубывающей функции $x=\varphi(к)$

Ф (x)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,00	0,0000	0,0025	0,0050	0,0075	0,0100	0,0125	0,0150	0,0175	0,0203	0,0226
0,01	0,0253	0,0276	0,0303	0,0327	0,0353	0,0380	0,0406	0,0430	0,0456	0,0481
0,02	0,0507	0,0528	0,0553	0,0579	0,0608	0,0632	0,0655	0,0682	0,0706	0,0732
0,03	0,0760	0,0783	0,0807	0,0834	0,0859	0,0884	0,0910	0,0935	0,0960	0,0984
0,04	0,1012	0,1034	0,1060	0,1083	0,1113	0,1138	0,1162	0,1188	0,1214	0,1240
0,05	0,1268	0,1291	0,1316	0,1345	0,1369	0,1394	0,1420	0,1443	0,1470	0,1498
0,06	0,1520	0,1545	0,1570	0,1596	0,1623	0,1648	0,1674	0,1702	0,1726	0,1752
0,07	0,1779	0,1802	0,1827	0,1852	0,1874	0,1903	0,1929	0,1952	0,1976	0,2004
0,08	0,2030	0,2055	0,2078	0,2105	0,2131	0,2156	0,2181	0,2208	0,2232	0,2258
0,09	0,2282	0,2308	0,2332	0,2356	0,2383	0,2409	0,2432	0,2458	0,2484	0,2507
0,10	0,2533	0,2558	0,2580	0,2609	0,2633	0,2661	0,2689	0,2718	0,2742	0,2767
0,11	0,2794	0,2820	0,2845	0,2872	0,2898	0,2925	0,2950	0,2975	0,3000	0,3026
0,12	0,3054	0,3081	0,3105	0,3132	0,3155	0,3184	0,3212	0,3240	0,3268	0,3298
0,13	0,3320	0,3344	0,3370	0,3400	0,3426	0,3450	0,3480	0,3506	0,3532	0,3558
0,14	0,3584	0,3612	0,3640	0,3666	0,3694	0,3720	0,3746	0,3772	0,3800	0,3826
0,15	0,3856	0,3880	0,3910	0,3938	0,3964	0,3990	0,4020	0,4046	0,4070	0,4100
0,16	0,4126	0,4153	0,4200	0,4210	0,4236	0,4263	0,4290	0,4320	0,4343	0,4370
0,17	0,4400	0,4426	0,4454	0,4480	0,4510	0,4540	0,4566	0,4594	0,4620	0,4648
0,18	0,4680	0,4706	0,4736	0,4760	0,4790	0,4816	0,4844	0,4872	0,4900	0,4930
0,19	0,4958	0,4985	0,5018	0,5044	0,5072	0,5102	0,5133	0,5160	0,5188	0,5226
0,20	0,5246	0,5275	0,5304	0,5332	0,5360	0,5389	0,5418	0,5445	0,5476	0,5504
0,21	0,5533	0,5662	0,5590	0,5620	0,5650	0,5680	0,5710	0,5740	0,5770	0,5800
0,22	0,5830	0,5860	0,5890	0,5920	0,5950	0,5980	0,6012	0,6040	0,6070	0,6100
0,23	0,6128	0,6158	0,6188	0,6220	0,6250	0,6280	0,6310	0,6340	0,6374	0,6404
0,24	0,6436	0,6466	0,6500	0,6518	0,6558	0,6589	0,6620	0,6650	0,6680	0,6712
0,25	0,6742	0,6774	0,6804	0,6836	0,6870	0,6902	0,6934	0,6966	0,6996	0,7030
0,26	0,7060	0,7096	0,7116	0,7160	0,7200	0,7230	0,7260	0,7294	0,7330	0,7362
0,27	0,7400	0,7420	0,7452	0,7486	0,7520	0,7554	0,7586	0,7617	0,7650	0,7686
0,28	0,7720	0,7755	0,7790	0,7822	0,7858	0,7890	0,7926	0,7960	0,8000	0,8030
0,29	0,8066	0,8100	0,8134	0,8170	0,8204	0,8240	0,8274	0,8310	0,8346	0,8382
0,30	0,8416	0,8452	0,8490	0,8526	0,8560	0,8600	0,8636	0,8672	0,8709	0,8746
0,31	0,8790	0,8814	0,8854	0,8896	0,8933	0,8970	0,9100	0,9040	0,9080	0,9120
0,32	0,9156	0,9196	0,9230	0,9270	0,9310	0,9350	0,9390	0,9428	0,9466	0,9504
0,33	0,9524	0,9584	0,9614	0,9666	0,9706	0,9724	0,9786	0,9824	0,9864	0,9906
0,34	0,9948	0,9990	1,0030	1,0076	1,0140	1,0190	1,0200	1,0244	1,0286	1,0328
0,35	1,0370	1,0410	1,0455	1,0498	1,0540	1,0580	1,0630	1,0670	1,0718	1,0760
0,36	1,0804	1,0850	1,0900	1,0941	1,0986	1,1030	1,1076	1,1112	1,1166	1,1218
0,37	1,1260	1,1310	1,1350	1,1404	1,1450	1,1500	1,1554	1,1600	1,1654	1,1706
0,38	1,1754	1,1804	1,1860	1,1905	1,1960	1,2000	1,2060	1,2100	1,2166	1,2212
0,39	1,2266	1,2325	1,2380	1,2432	1,2490	1,2546	1,2600	1,2654	1,2710	1,2770
0,40	1,2820	1,2880	1,2934	1,2940	1,3052	1,3100	1,3160	1,3222	1,3280	1,3350
0,41	1,3404	1,3474	1,3534	1,3600	1,3660	1,3720	1,3790	1,3860	1,3926	1,3980
0,42	1,4060	1,4127	1,4190	1,4260	1,4326	1,4400	1,4470	1,4520	1,4618	1,4688
0,43	1,4760	1,4834	1,4916	1,4990	1,5070	1,5120	1,5226	1,5310	1,5390	1,5470
0,44	1,5554	1,5640	1,5730	1,5810	1,5900	1,5990	1,6060	1,6170	1,6266	1,6370
0,45	1,6460	1,6560	1,6666	1,6746	1,6850	1,6966	1,7070	1,7170	1,7280	1,7390
0,46	1,7520	1,7636	1,7750	1,7870	1,8000	1,8110	1,8250	1,8400	1,8540	1,8670
0,47	1,8810	1,8960	1,9120	1,9280	1,9420	1,9600	1,9774	1,9960	2,0150	2,0340
0,48	2,0620	2,0780	2,0970	2,1180	2,1450	2,1690	2,1980	2,2280	2,2580	2,2880
0,49	2,3270	2,3600	2,4130	2,4542	2,5120	2,5720	2,6580	2,7240	2,8880	3,2200
0,50	4,0000									

ветствующие обеспеченностям 1%, 99% и обеспеченности математического ожидания (48%). Эти данные соответственно обозначены цифрами I, III, и II. Фактически установленные в результате наблюдений данные показаны сплошной линией.

Из рис. 1(б) видно, что фактические значения среднегодовых уровней за период 1912—1958 гг. без исключения находятся в пределах, определяемых прогнозом, а наиболее вероятные величины из его возможных значений близки к фактически установленным данным.

Из всего сказанного можно прийти к заключению, что предлагаемые способы прогнозирования вероятностных величин годового стока характеризуются простотой и легкостью расчетов и полнотой получаемых прогностических характеристик, представляемых в форме прогностической кривой распределения (обеспеченности) или последовательности рядов с определенной вероятностью. При этом результаты прогноза наиболее вероятных величин, получаемые по тем и другим способам, оказались равными между собой и среднеквадратическая ошибка составила $\pm 0{,}74\%$ от фактически установленных данных. Это объясняется тем, что приведенные способы, основаны на использовании уравнений линейной регрессии. Однако при прогнозировании способом 1 интервал возможных величин прогноза намного сужается по сравнению с результатами, получаемыми по способу 2. Причиной этого может явиться и то, что величина Φ_{ip} в выражении (5) определяется в зависимости $C_{v\,усл.}^{(i)}$, которая всегда получается меньше безусловной величины его.

Кроме того, способ 2 имеет еще одно важное преимущество перед первым, заключающееся в том, что он может быть с успехом использован в аналитическом решении некоторых водохозяйственных и водоэнергетических задач, в частности, при многолетнем регулировании расчетного стока с учетом территориальных особенностей многолетних колебаний и стохастических связей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алехин Ю. М. Статистические прогнозы в геофизике. Л., Изд-во ЛГУ, 1963.

2. Алексеев Г. А. Метод определения корреляционных зависимостей и его применение для вероятностного прогноза и расчета сезонного стока. «Труды Государственного гидрологического института», вып. 31 (15). Л., 1951.

3. Андреянов В. Г. Циклические колебания годового стока и их учет при гидрологических расчетах. «Труды Государственного гидрологического института», вып. 68. Л., 1959.

4. Бусалаев И. В., Сергеева Л. В. Применение методов случайных функций при водохозяйственном проектировании. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 4. Алма-Ата, «Наука», 1966.

5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М., Физматгиз., 1962.

6. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей. М., Физматгиз, 1961.

7. Григорьев В. А. Чистое прогнозирование годовых речных стоков. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 3. Алма-Ата, «Наука», 1965.

8. Дружинин И. П., Коваленко З. П., Кукушкина В. П., Хамьянова Н. В. К вопросу о моделировании гидрологических рядов. «Известия АН СССР. Энергетика и транспорт», 1964, № 5.

9. Дружинин И. П., Коноваленко З. П., Кукушкина В. П., Хамьянова Н. В. Речной сток и геофизические процессы. М., «Наука», 1966.

10. Дружинин И. П., Коноваленко З. П., Маматканов Д., Хамьянова Н. В. Изучение внутренних связей геофизических процессов с применением ЭВМ и некоторые вопросы их математического моделирования и использования электронных вычислительных машин в энергетике. (Тезисы докладов). Иркутское книжное изд-во, 1963.

11. Картвелишвили Н. А., Цветков Е. В. и др. Использование вероятностей теории режимов энергосистемы для составления водоэнергетического плана эксплуатации Теребля-Рикской ГЭС. Труды ВНИИЭ, т. XIII. М., Госэнергоиздат, 1961.

12. Картвелишвили Н. А. О математическом описании и методике расчетов регулирования речного стока. «Известия АН СССР», ОТН, 1956, № 1.

13. Картвелишвили Н. А., Сванидзе Г. Г., Хомерики И. В., Цветков Е. В. Вероятностная модель речного стока как основа оптимизационных расчетов в условиях эксплуатации и проектирования энергосистем. Тезисы докладов симпозиума «Применение методов математического моделирования в энергетике». Иркутск, 1966.

14. Колмогоров А. Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей. «Известия АН СССР. Серия математическая», 1941, № 5.

15. Крейн М. Г. Об одной экстраполяционной проблеме А. Н. Колмогорова. ДАН, т. 46, 1945.

16. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Гидрологические основы речной гидротехники. Изд-во АН СССР, 1950.

17. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. О применении метода статистических испытаний к исследованию колебаний речного стока и к расчетам режима использующих его установок. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 2. Алма-Ата, «Наука», 1964.

18. Маматканов Д. О методе сверхдолгосрочного прогнозирования вероятностных величин стока рек. Вопросы водного хозяйства, вып. 11. Гидрология. Фрунзе, 1967.

19. Ольдекоп Э. М. О роли регулирующей емкости русловой системы при формировании паводочного стока. «Труды Государственного гидрологического ин-та», вып. 1. Л., 1947.

20. Пугачев В. С. Теория случайных функций. М., Физматгиз, 1962.

21. Сванидзе Г. Г. Основы расчета регулирования речного стока методом Монте-Карло. Тбилиси, «Мацниереба», 1964.

22. Сомов Н. В. Асинхронность и цикличность колебаний стока крупных рек СССР. «Труды Центрального института прогнозов», вып. 117, 1963.

23. Хомерики И. В. Расчет многолетней емкости регулирующего водохранилища с учетом цикличности колебаний стока. Автореферат кандидатской диссертации. Тбилиси, 1965.

24. Шарашкина А. С. Исследование цикличности годовых величин речного стока применительно к задачам гидроэнергетики. Проблемы гидроэнергетики и регулирования речного стока. Изд-во АН СССР, 1960.

25. Хинчин А. Я. Теория корреляции стационарных стохастических процессов. «Успехи математических наук», вып. 5, 1938.

26. Яглом А. М. К вопросу о линейном интерполировании стационарных случайных последовательностей и процессов. «Успехи математических наук», 1949, т. 4, вып. 4.

SUMMARY

The paper deals with methods of the long-term run-off forecast. Some practical examples of calculations are presented.

The suggested forcasting methods of run-off can also be used to calculate the stream flow control.

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
1970. *ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА* вып. 7

А. П. БРАСЛАВСКИЙ, Б. А. КРАСНОВ

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ИСПАРЕНИЕ С ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Процесс испарения воды с поверхности водоемов изучается уже почти два столетия. За это время в результате больших теоретических и экспериментальных исследований установлено, что интенсивность испарения в основном зависит от разности упругости водяных паров (Δe)[1] и скорости ветра над водной поверхностью (w). Можно также считать доказанным влияние на нее разности температур вода—воздух (Δt). В соответствии с этим многочисленные расчетные формулы, предложенные для определения интенсивности испарения, имеют вид

$$E = A\,\Delta e f(W),$$

или

$$E = A\,\Delta e f(W;\ \Delta t), \qquad (1)$$

где A — коэффициент пропорциональности и f — значок функции.

Некоторое распространение имеет также мнение о том, что на интенсивность испарения влияет атмосферное давление. Так, Зольднер [6], Стефан [6], Джеффрис [6], Максвелл [6] и Великанов [3] указывают, что интенсивность испарения с водной поверхности обратно пропорциональна атмосферному давлению. Это положение, высказанное впервые еще в 1804 г., основывалось на том, что коэффициент молекулярной диффузии обратно пропорционален атмосферному давлению. В то время процессы турбулентного обмена в атмосфере еще не были исследованы и основным механизмом испарения считалась молекулярная диффузия водяных паров в воздухе.

Несколько позднее Миллар [7] предложил для расчета испарения формулу (2), в которой влияние атмосферного давления выражается через кинематическую вязкость воздуха (ν), связанную с атмосферным давлением (p) выражением

$$\nu = (0{,}001\,t - 0{,}1299)\frac{760}{p}.$$

Формула Миллара имеет следующий вид:

$$E = A\,W\left(\frac{e_0}{\Theta_t} - \frac{e_z}{\Theta}\right)\left(\frac{\nu}{Wz}\right)^{1/4}, \qquad (2)$$

где A — коэффициент пропорциональности, Θ_t и Θ — абсолютные температуры испаряющей поверхности и воздуха над ней, w — скорость воздушного потока и z — высота измерения метеорологических элементов над водной поверхностью.

Из формулы Миллара следует, что величина испарения обратно пропорциональна корню четвертой степени из значения атмосферного давления.

В природе относ водяных паров от испаряющей поверхности в атмо-

[1] Величина Δe вычисляется как разность максимальной упругости водяных паров при температуре испаряющей поверхности (e_0) и упругости водяных паров, содержащихся в воздухе над водной поверхностью (e), т. е. $\Delta e = e_0 - e$.

сфере осуществляется почти полностью путем турбулентного обмена, величина же молекулярной диффузии по сравнению с ним ничтожна. Поэтому вызывает большое сомнение правильность высказанных выше предположений о влиянии атмосферного давления на интенсивность испарения. Б. Д. Зайков [5] и В. К. Давыдов [4] считают, например, возможным вообще не учитывать это влияние при расчете слоя испарившейся воды с поверхности водоемов, расположенных в районах с пониженным атмосферным давлением. Первый из них подтверждает это мнение материалами наблюдений за испарением на двух испарительных бассейнах, расположенных на разной высоте над уровнем моря: Форт-Колинз (1530 *м*) и Кара-Богаз-Гол (—24 *м*). Эти испарительные установки дают одинаковую зависимость интенсивности испарения от влияющих на нее гидрометеорологических факторов при существенно различных значениях атмосферного давления.

Таким образом, приходится констатировать, что в настоящее время не существует еще единого мнения о влиянии атмосферного давления на интенсивность испарения воды с поверхности водоемов в природе. Это в значительной степени явилось следствием недостаточно широко поставленных специальных опытов по исследованию испарения в естественных условиях при различных значениях атмосферного давления.

В районе расположения горных водоемов и водохранилищ Казахстана атмосферное давление существенно понижено, поэтому при расчетах потерь воды на испарение с поверхности таких водоемов потребовалось уточнить вопрос о влиянии атмосферного давления на интенсивность испарения в природных условиях. С этой целью в 1965 и 1966 гг. КазНИИ энергетики провел исследования испарения воды с поверхности высокогорного Большого Алматинского озера с помощью плавучей испарительной установки ГГИ-3000. Использовались также материалы наблюдений на подобной установке, работавшей ранее на оз. Севан, поверхность которого лежит на высоте 1910 *м* над уровнем моря (атмосферное давление около 820 *мб*).

Результаты наблюдений на этих горных водоемах сопоставлялись затем с материалами наблюдений на таких же плавучих испарительных установках ГГИ-3000, работавших в условиях нормального атмосферного давления (980—1000 *мб*), на Кенгирском водохранилище [2], Веселовском водохранилище [1], оз. Зайсан [1] и оз. Красавица [1].

Большое Алматинское озеро расположено в горах Заилийского Алатау в 50 *км* от г. Алма-Аты на высоте 2600 *м* над уровнем моря.

Атмосферное давление здесь в среднем равно 750 *мб*, т. е. около 70% нормального. Размеры и конструкция плавучей испарительной установки, с помощью которой проводились здесь исследования испарения, полностью соответствовали стандартным, принятым на сети испарительных станций Гидрометслужбы. Поэтому можно считать правомерным сопоставление полученных на этой установке данных с материалами наблюдений других плавучих испарительных станций, расположенных в зоне, где атмосферное давление близко к нормальному. На плавучей испарительной установке проводились наблюдения за слоем испарившейся воды из испарителя ГГИ-3000, за температурой воды, скоростью ветра, температурой и влажностью воздуха. Эти наблюдения выполнялись в соответствии с наставлением Гидрометслужбы. Сверх того проводилась непрерывная запись влажности и температуры воздуха с помощью стандартного гигрографа и термографа, установленных на высоте 2 *м* над поверхностью воды, а также регистрировалась скорость ветра за ночную и дневную половину суток по контактному анемометру, снабженному счетчиком импульсов.

Особенности района наблюдений (позднее вскрытие и раннее замерзание озера, частое выпадение осадков) существенно ограничивали продолжительность опытов, наблюдения велись только в период с июля по сентябрь. Из-за малого объема материала (всего около 80 точек) он использовался в осредненном виде. Все результаты наблюдений были объединены в два центра тяжести, соответствующие скорости ветра 1,5 *м/сек* и 2,2 *м/сек*. Соответственно на других плавучих испарительных станциях, использованных для сопоставления, выбирались данные при тех же скоростях ветра.

Для того, чтобы оценить изменение интенсивности испарения, связанное только с изменением атмосферного давления, сравнивались величины $\frac{E}{\Delta e}$, т. е. слой испарения за сутки, отнесенный к единице разности упругости водяных паров Δe. При этом использовались графики связи $\frac{E}{\Delta e} = f(w)$, построенные отдельно для каждой испарительной станции. Результаты исследования представлены в таблице 1, из которой следует, что значения $\frac{E}{\Delta e}$, полученные по материалам наблюдений на горных и равнинных плавучих испарительных станциях при одинаковых значениях скорости ветра, практически совпадают. Наибольшее расхождение при скорости ветра 1,5 *м/сек* составляет 0,03 *мм/мб. сут* (6%), а при скорости ветра 2,2 *м/сек*—всего 0,02 *мм/мб. сут* (4%). Эти расхождения находятся в пределах точности измерения слоя испарения из плавучих испарителей. Не замечается также тенденции увеличения интенсивности испарения с уменьшением атмосферного давления. Наоборот, значение величины $\frac{E}{\Delta e}$ для высокогорных водоемов при скорости ветра 2,2 *м/сек* оказалось даже несколько пониженным по сравнению с водоемами, расположенными в равнинных условиях. Различие это, впрочем, не выходит за пределы точности постановки опытов.

Таблица 1

Сопоставление интенсивности испарения, отнесенной к единице разности упругости водяных паров (Δ e), наблюдений на плавучих испарительных станциях ГГИ-3000, расположенных в зонах с различным значением атмосферного давления

№ п.п.	Местонахождение пункта наблюдения	Высота над уровнем моря, *м*	Среднее значение атмосферного давления, *мб*	Наблюденное значение $\frac{E}{\Delta e}$ *мм/мб сут* при скорости ветра	
				1,5 *м/сек*	2,2 *м/сек*
1	Большое Алматинское озеро	2600	750	0,49	0,53
2	Оз. Севан	1910	820	—	0,53
3	Оз. Зайсан	500	960	0,48	0,53
4	Кенгирское водохранилище	200	1000	с,49	0,55
5	Веселовское водохранилище	100	1000	0,48	0,55
6	Оз. Красавица	20	1000	0,46	0,54

Результаты проведенных исследований говорят о том, что уменьшение атмосферного давления до 70% от нормального не оказывает никакого влияния на интенсивность испарения при равенстве остальных гидрометеорологических условий, влияющих на испарение. Так как боль-

шинство горных озер и водохранилищ расположено не выше 3000 *м* над уровнем моря, то расчет величин испарения воды с поверхности этих водоемов можно производить по зависимостям, выведенным для равнинных территорий, конечно, при условии подстановки в них значений гидрометеорологических факторов, характеризующих горный водоем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Браславский А. П., Викулина З. А. Нормы испарения с поверхности водохранилищ. Л., Гидрометеоиздат, 1954.

2. Браславский А. П., Шергина К. Б. Потери воды на испарение из водохранилищ засушливой зоны Казахстана. Алма-Ата, «Наука», 1965.

3. Великанов М. А. Гидрология суши. Изд. 4. Л., Гидрометеоиздат, 1948.

4. Давыдов В. К. Испарение с поверхности оз. Севан. Материалы по исследованию оз. Севан и его бассейна, ч. II, вып. 2. Л., 1935.

5. Зайков Б. Д. Испарение с водной поверхности прудов и малых водохранилищ на территории СССР. «Труды Государственного гидрологического института», вып. 21 (75). Л., Гидрометеоиздат, 1949.

6. Практическое руководство к изучению испарения с поверхности пресных водоемов. Материалы по гидрологии, гидрографии и водным силам СССР, вып. 18. Л., 1933.

7. Руденко С. И. Испарение с водной поверхности и потери на испарение с больших водохранилищ. «Труды Государственного гидрологического института», вып. 3 (57). Л., Гидрометеоиздат, 1948.

SUMMARY

The paper deals with the problem of influence of atmospheric pressure on the intensity of free-water-surface evaporation in the water reservoirs. This problem is very important for evaluation of evaporation layer from the surface of mountain storage reservoirs.

As a result of these studies it has been found that in the ranges of 25 per cent change of atmospheric pressure from the normal, its influence on the intensity of evaporation is absent.

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
1970 *ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА* вып. 7.

И. В. БУСАЛАЕВ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ ЭРОЗИОННОГО РЕЛЬЕФА ВОДОСБОРОВ

Современная геоморфологическая наука еще не имеет достаточно четкого представления о силах и процессах, генерирующих рельеф земли. Существующие в этом отношении концепции геоморфологических циклов (Пенк, Дэвис, Марков и др.) по сути дела являются соображениями качественного характера. Они не вскрывают количественных взаимосвязей форм рельефа земли с динамическими факторами.

В связи с этим все имеющиеся математические модели рельефа поверхности земли [3] являются в значительной мере феноменологическими, описательными (за исключением, может быть, отдельных форм эрозионного рельефа: продольного профиля, склонов и пр.). По существу, используются лишь геометрические и кинематические соотношения типа уравнений движения и баланса масс.

Модели указанного типа имеют определенное познавательное значение, и вместе с тем они являются полезными для решения инженерных задач, связанных с использованием рельефа земли. Из них обычно выводятся морфометрические характеристики, успешно применяемые в геологических и гидрологических науках.

Тем не менее будущий прогресс геоморфологии связан с моделями иного динамического типа, связывающими эволюцию основных форм поверхности земли с энергетикой рельефообразующих процессов.

Вследствие сложности геофизических процессов, формирующих рельеф, их слабой изученности и частичной ненаблюдаемости подобное моделирование должно, по-видимому, основываться на тех или иных гипотезах о силах, создающих рельеф.

Именно такой путь предлагается в данной статье. В порядке постановки вопроса дается одна из простейших математических моделей развития рельефа, позволяющая проследить элементы эволюции гипсометрической кривой водосбора в процессе его геологического развития.

В основу положена гипотеза В. Г. Глушкова [2, 5, 6] о том, что интенсивность эрозии пропорциональна полной энергии стока с поверхности бассейна.

Принятая схема в общих чертах согласуется с концепцией Дэвиса.

Вывод стохастического дифференциального уравнения водосбора и его решение

Осадки, выпавшие на поверхность водосбора, обладают определенным запасом потенциальной энергии, которая пропорциональна высоте их выпадения относительно какого-либо базиса и их массе

$$d\Theta_0 = u \cdot H \cdot dF \text{ тм},$$

где dF — площадь участка в $м^2$, H и u — соответственно высота и слой осадков в метрах.

Достаточно теперь просуммировать энергию всех элементарных участков в пределах данного водосбора, чтобы убедиться в пропорциональности ее объему земляного массива бассейна в целом.

$$Э_0 = u \int_F H\,dF = uV.$$

Если далее перейти непосредственно к энергии стока (вместо слоя осадков взять сомножителем слой стока m), то мы получим потенциальную гидравлическую энергию бассейна.

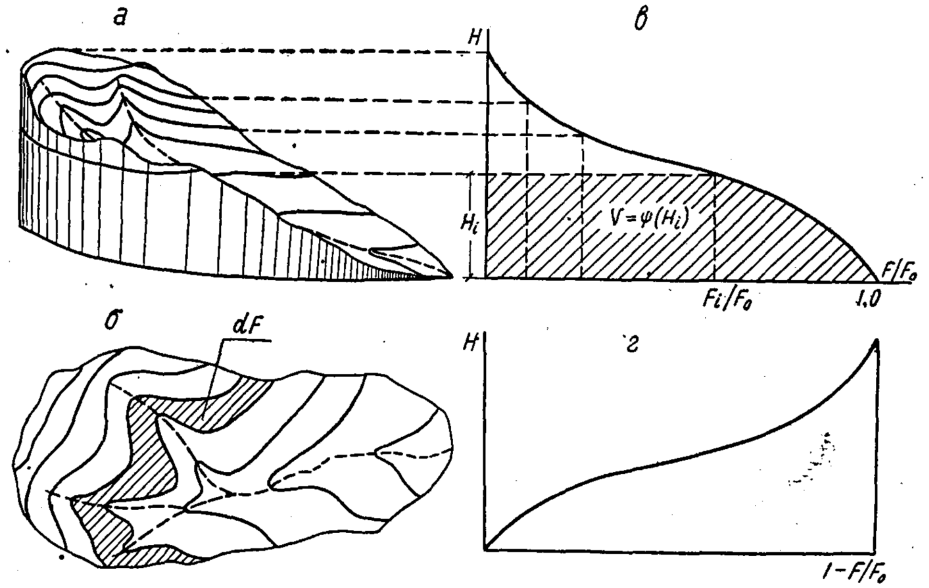


Рис. 1.

В. Г. Глушков предположил [2], что интенсивноть денудации водосборов пропорциональна полной энергии стока

$$\frac{dV}{dt} = -\text{ДЭ} = -\text{Д}\,m\,V \qquad (1)$$

Здесь V — объем массива (объем орографической фигуры по М. А. Мосткову [5], Д — коэффициент денудации, dt — единица времени, равная году. Знак минус в формуле отражает тот факт, что процесс денудации приводит к уменьшению земляного массива водосбора.

Нетрудно убедиться, что уравнение (1) представляет собой уравнение «макроскопической динамики» (т. е., по сути дела, является феноменологическим уравнением процесса). Для этого запишем правую часть уравнения в эквивалентном виде.

$$\frac{d(F_0 H_{ср})}{dt} = \frac{F_0\,d\,H_{ср}}{dt} = -\text{Д}\,m\,V = -\Phi\,(H_{ср}, t), \qquad (1а)$$

где F_0—площадь основания орографической фигуры бассейна (при денудации она остается постоянной, за исключением сравнительно редких случаев глубокой бифуркации речных систем), $H_{ср}$ — средняя высота в момент времени t.

Таким образом, соотношение (1а), а следовательно, и (1) отражают средние суммарные эффекты и являются, по сути дела, статистически осредненными. Из (1а) следует, что соотношение для актуальных (неос-

редненных) высот должно отличаться только слагаемым, среднее значение которого равно нулю (поскольку в макропроцессе флуктуации взаимно погашаются).

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{1}{F_0}\Phi(H, t) + \frac{1}{F_0}\xi(H, t), \quad <\xi(H, t)> = 0.$$

(Приведенные соображения полезны для понимания следующего шага в преобразовании соотношения (1), для вывода последующих формул они не используются).

Для дальнейших выводов уравнение (1) необходимо преобразовать и придать ему вероятностную интерпретацию.

Процесс денудации является чрезвычайно сложным, зависящим от целого ряда факторов, поэтому субстанциональная производная $\frac{dV}{dt}$ в левой части (1), если в качестве переменных взять высоту массива (гипсометрической кривой) и время t (рис. 1), может быть раскрыта следующим образом:

$$\frac{dV}{\partial t} = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial H}\frac{dH}{dt} = -Дm\,V. \tag{2}$$

Разрешив это выражение относительно производной по времени от высоты, получим

$$\frac{dH}{dt} = -Дmg(H) + \varphi(H)\xi(t),$$

где

$$g(H) = V\Big/\frac{\partial V}{\partial H}, \quad \varphi(H)\cdot\xi(t) = \frac{\partial V}{\partial t}\Big/\frac{\partial V}{\partial H} \tag{3}$$

Дифференциальное уравнение (3) является по своему смыслу стохастическим, поскольку интенсивность эрозии в разные моменты времени представляет собой процесс, зависящий от целого ряда непредсказуемых причин (сопротивление горных пород, экспозиция склонов, задернованность, тектонические движения, литология и пр.), а такие процессы и являются случайными.

Теория непосредственного интегрирования стохастических дифференциальных уравнений еще не разработана, поэтому мы здесь воспользуемся другим путем.

Предположим, что приращения денудационного процесса во времени являются независимыми или слабо связанными, тогда $\xi(t)$ будет марковским процессом и, следовательно, плотность вероятности высот удовлетворяет прямому уравнению А. Н. Колмогорова [4, 7].

$$\frac{\partial f(H,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial H}[K_1(H, t)f(H, t)] + \frac{1}{2}\frac{\partial^2}{\partial H^2}[K_2(H, t)f(H, t)], \tag{4}$$

где $f(H, t)$ — плотность вероятности в момент времени t и, следовательно,

$$f(H, t) \geqslant 0, \quad \int f(x, t)\,dx = 1.$$

В качестве начального условия может быть принята какая-либо плотность вероятности $f_0(H, t_0)$ или же дельта — распределение, если начальное значение единственно $\delta(H - H_0)$.

Если уравнение А. Н. Колмогорова записать в форме уравнения неразрывности

$$\frac{\partial f(H, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial H}G(H, t) = 0.$$

то легко формулируются граничные условия

$$G(H_{min}, t) = G(H_{max}, t) = 0$$

Здесь

$$GH(,t)=K_1(H,t)f(H,t)-\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial H}[K_2(H,t)f(H,t)]$$

интерпретируется как поток гипотетической жидкости с объемом в точке H в момент t, пропорциональным плотности вероятностей $f(H,t)$.

Этот поток складывается из систематической $K_1 f$ и случайной $-\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial H}(K_2 f)$ составляющих.

В случае стационарности марковского процесса коэффициенты $K_1(H), K_2(H)$ и плотность вероятности f не зависят от времени и от начального распределения $\frac{\partial f(H)}{\partial t}=0$ и, следовательно, уравнение (4) преобразуется в линейное обыкновенное дифференциальное уравнение относительно $f(H)$.

$$\frac{d}{dH}[K_2(H)f(H)]-2K_1(H)f(H)=0,$$

которое, очевидно, соответствует достаточно развитым речным бассейнам.

Общий интеграл его дается формулой

$$f(H)=\frac{C}{K_2(H)}\,exp\left[2\int_0^H\frac{K_1(x)}{K_2(x)}\,dx\right]. \qquad (5)$$

Коэффициенты этого уравнения $K_1(H)$ и $K_2(H)$, представляющие собой условное математическое ожидание приращения процесса и условную дисперсию его, определяются из уравнения (3) по формулам

$$K_1(H)=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{M(\Delta H)}{\Delta t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{<(H_{\Delta t}-H)>}{\Delta t},$$

$$K_2(H)=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{M(\Delta H)^2}{\Delta t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{<(H_{\Delta t}-H)^2>}{\Delta t}. \qquad (6)$$

Здесь H — значение процесса в момент t предполагается фиксированным, а $H_{\Delta t}$ — состояние в момент $t+\Delta t$. В нашем случае они, очевидно, равны *

$$K_1(H)=-m\frac{q}{H_{ср}}g(H),\quad K_2(H)=N_0\varphi^2(H),$$

где коэффициент денудации $Д$ расшифровывается В. Г. Глушковым как частное от деления средней мутности стока q на среднюю высоту орогра-

---

* Коэффициенты определяются следующим образом: находим приращение процесса за время Δt из (3) $\Delta H(t)=-\frac{q}{H_{ср}}\cdot m\cdot g(H,t)\,\Delta t+\varphi(H,t)\int_t^{t+\Delta t}\xi(t)\,dt$ и берем от полученного выражения математическое ожидание в соответствии с формулой (6) $K_1=\frac{q}{H_{ср}}m\cdot g(H)$ (так как под знаком интеграла стоит процесс с дельта-корреляцией и со средним, равным нулю). Аналогично по формуле (7) находим K_2.

$$K_2=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{1}{\Delta t}M\left\{\left[\frac{q}{H_{ср}}m\cdot g(H,t)\right]^2-2\frac{q}{H_{ср}}\cdot m\cdot g(H,t)\cdot\varphi(H,t)\cdot\int_t^{t+\Delta t}\xi(t)\,dt+\varphi^2(H)\int_t^{t+\Delta t}\cdot\int_t^{t+\Delta t}\xi(x)\xi(y)\,dx\,dy\right\}=N_0\varphi^2(H).$$

фической фигуры $H_{ср}$, N_0 — спектральная плотность белого шума процесса.

$$N_0=2\int_0^\infty <\xi(t)\,\xi(t+\Delta t)>\,d\Delta t=2\int_0^\infty \frac{N_0}{2}\,\delta(\tau)\,d\tau.$$

Подставив коэффициенты в формулу (5), получим выражение для определения плотности распределения высот рельефа водосбора

$$f(H)=\frac{C}{N_0\varphi^2(H)}\,exp\left[\frac{2}{N_0}\int_0^H \frac{-\frac{q}{H_{ср}}\cdot m\cdot g(x)}{\varphi^2(x)}\,dx\right]. \qquad (6)$$

C — постоянная нормировки.

Характерно, что в формулу (6) входит ряд гидродинамических параметров и таким образом открывается путь физического анализа динамики рельефа водосборов.

Что касается решения нестационарного уравнения (4), то оно осуществимо лишь в некоторых частных случаях, когда коэффициенты K_1 и K_2 имеют достаточно простой вид. Например, при линейной зависимости их от признака мы приходим к семейству кривых К. Пирсона [4].

Обобщенное стохастическое дифференциальное уравнение речного бассейна

Предложенная выше модель водосброса, по-видимому, может дать удовлетворительное описание только для сравнительно небольших бассейнов с более или менее однородными условиями увлажнения (постоянство модуля стока) горными породами, мутностью и пр. Поэтому большие бассейны необходимо рассматривать как совокупность бассейнов более мелкого порядка.

Применяя к ним аналогичные рассуждения и переходя к безразмерным координатам $W=\frac{V}{V_0}$, $h=\frac{H}{H_0}$, получим систему стохастических дифференциальных уравнений

$$\frac{dh_i}{dt}=-Д_i\,m_i\,g_i(h_i)-\varphi_i(h_i)\xi_i(t) \quad (i=1,2,\ldots,n).$$

В результате мы приходим к многомерному уравнению А. Н. Колмогорова

$$\frac{\partial f(h_1,\ldots,h_n,t)}{\partial t}=-\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial}{\partial h_i}\left[K_i(h_1,\ldots,h_n)\,f(h_1,\ldots,h_n,t)+\right.$$

$$\left.+\frac{1}{2}\sum_{i\,j}^{n}\frac{\partial^2}{\partial h_i\,\partial h_j}\left[K_{ij}(h_1,\ldots,h_n)\,f(h_1,\ldots,h_n,t)\right]\right.$$

Коэффициенты здесь определяются формулами $K_i=\lim\limits_{\Delta t\to 0}\frac{<(h_{i\Delta t}-h_i)>}{\Delta t}$,

$$K_{ij}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{(h_{i\Delta t}-h_i)\,(h_{j\Delta t}-hj)}{\Delta t}.$$

Многомерное уравнение даже в предположении стационарности в общем виде не решается, оно может быть решено лишь для частных типов функций g_i, φ_i.

Для численного решения уравнения (7), по-видимому, можно использовать какую-либо из процедур Монте-Карло.

Гипотезы, положенные в основу вывода стохастических уравнений водосбора, разумеется, не являются единственно возможными. Должны быть исследованы и другие предположения о механизме эрозии рельефа (тот же В. Г. Глушков выдвигал и другой вариант денудации водосбора), лучшими будут те из них, которые дают наибольшее приближение к натурным данным. Эти данные следует получить экспериментальным путем.

Рассмотренная модель может быть уточнена и усовершенствована в ряде аспектов.

Прежде всего можно попытаться обобщить исходную гипотезу В. Г. Глушкова об интенсивности денудации путем привлечения кроме речного стока и других агентов геологического развития.

Известно, что речная эрозия далеко не исчерпывает содержание денудационного процесса, в последний включается ветровая и температурная эрозия, абразия, экзарация, солифлюкция и другие виды разрушительной деятельности экзогенных сил. Кроме того, желательно было бы учесть тектонику и аккумуляцию в пределах речного бассейна.

И, наконец, наиболее важной задачей на данном этапе является экспериментальная проверка принятой идеализации с натурными измерениями рельефа реальных водосборов.

В заключение отметим, что рассмотренная модель легко может быть распространена и детализирована для описания развития продольного профиля реки или отдельного склона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бусалаев И. В. Обобщенный метод аналитического описания некоторых топографических и гидрологических характеристик речных бассейнов. «Известия АН КазССР. Серия энергетическая., вып. 2 (20). 1961.

2. Глушков В. Г. Работа стока и денудация. Сб. «За рационализацию гидрологии». Л., 1934.

3. Девдариани А. С. Математические методы. Итоги науки. «Геоморфология», вып. 1. М., ВИНИТИ, 1966.

4. Колмогоров А. Н. Об аналитических методах в теории вероятностей. «Успехи математических наук», вып. 5. М., 1938.

5. Мостков М. А. Об исчислении запасов гидравлической энергии. «Известия АН СССР»., ОТН, 1950, № 6.

6. Синявский Г. К. Механика рельефообразующих процессов. «Известия АН КазССР. Серия энергетическая» вып. 2. 1950.

7. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М., «Советское радио», 1966.

SUMMARY

A mathematical model of watershed denudation is formulated which makes it possible to follow elements of evolution of a hypsometer curve of the basin in the process of its geological development. The studies are based on V.G. Glushkov's hypotesis stating that intensity of erosion is proportional to energu of a runoff from the basin surface.

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
1970 *ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА* вып. 7

И. В. БУСАЛАЕВ

СТОХАСТИЧЕСКОЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ СТОКА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТЕЙ РАСХОДОВ ГОРНЫХ РЕК

Непосредственной основой водохозяйственного проектирования являются данные о стоке, получаемые или прямым наблюдением в натуре, или путем каких-либо косвенных вычислений. При этом оказывается, что недостаточная длительность регистраций расходов (в лучшем случае не более 50 лет) не позволяет получить вполне обоснованные оценки статистических стоковых параметров.

Вторым не менее серьезным источником ошибок является принятие априорных гипотез относительно функции распределения вероятностей стока рек.

В большинстве случаев в качестве такой модели принимается кривая Пирсона III типа, впервые использованная в гидрологии Фостером еще в 1924 г. Опыт применения таких кривых и сопоставление их с фактическими данными пока не выявили особенно значительных расхождений, по крайней мере, для среднегодовых расходов. Однако Н. А. Картвелишвили [4] показал (на примере р. Камы у г. Перми), что натурные среднедекадные расходы не описываются удовлетворительно кривой Пирсона III типа, а также кривой Крицкого-Менкеля, даже при изменении C_s в диапазоне от $2\,C_v$ до $6\,C_v$.

В предлагаемой статье мы попытаемся рассмотреть вопрос на основе уравнения водного баланса бассейна, исходя из общей картины формирования стока на водосборе и представлений о стоке как стохастическом процессе.

Простейшее уравнение водного баланса бассейна можно записать в следующем виде:

$$\frac{dW}{dt} = Q_n(t) - Q(W, t),$$

где W — динамические запасы воды в бассейне до верхнего водоупора, $Q_n(t)$ — расход, поступающий на поверхность бассейна (расход стокообразования) в момент времени t, Q — расход суммарного притока в русловую сеть с учетом возможных потерь.

Аппроксимируя *, как это обычно делается, Q простой степенной зависимостью [4] $Q = CW^n$, получим:

$$\frac{dW}{dt} + CW^n = Q_n(t). \qquad (1)$$

Далее, дифференцируя выражение $Q = CW^n$ по t как сложную функцию времени

* Указанная аппроксимация не является единственно возможной, легко предложить много других. Однако она наиболее проста. Аппроксимация экспонентой, предложенная Ю. Б. Виноградовым [3] вопреки заявлению автора не имеет никаких преимуществ. В том и другом случаях получается уравнение типа Риккати, не интегрируемое в общем виде.

$$\frac{dQ}{dt}=\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial W}\frac{dW}{dt},$$

учитывая также, что $W=\left(\frac{Q}{C}\right)^{\frac{1}{n}}$, получим из (1)

$$\frac{1}{nC^{\frac{1}{n}}}Q^{\frac{1-n}{n}}\frac{dQ}{dt}+Q=Q_n(t). \qquad (2)$$

Изложенная здесь схема трансформации стока водосбором [4] является грубо приближенной. В частности, расчет по этой схеме, как справедливо указывает Ю. Б. Виноградов [3], дает не гидрограф расхода в замыкающем створе, а ход суммарного притока в русловую сеть. Здесь совершенно не учитывается время руслового добегания стока. Это обусловливает слишком быстрый спад расчетного гидрографа по сравнению с действительным, на что указывает сам автор. Ю. Б. Виноградов предлагает учесть это обстоятельство посредством использования так называемой генетической формулы стока, для оценки руслового добегания и задержания воды. Последняя имеет вид:

$$Q_з(t)=\int_0^{\tau_{max}}Q(t-\tau)F'(\tau)\,d\tau, \qquad (3)$$

где $Q(t-\tau)$—величина суммарного притока в русловую систему в момент $t-\tau$ (рассчитывается по уравнению (2)), τ и τ_{max} время добегания, $F'(\tau)$—дифференциальная функция распределения площади водосбора по времени руслового добегания, нормированная на единицу.

$$\int_0^{\tau_{max}}F'(\tau)\,d\tau=1.$$

Разложим первый сомножитель под интегралом в выражении (3) по степеням $-\tau$ следующим образом:

$$Q(t-\tau)=Q(t)-\tau\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{1}{2}\tau^2\frac{\partial^2 Q}{\partial t^2}-\frac{1}{6}\tau^3\frac{\partial^3 Q}{\partial t^3}+\ldots$$

Отсюда, подставляя это выражение в (3) и удерживая в разложении два члена, получим

$$Q_з(t)=Q(t)-\tau_{ср}\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{1}{2}\frac{\partial^2 Q}{\partial t^2}[\sigma_\tau^2+(\tau_{ср})^2], \qquad (4)$$

где $\tau_{ср}$ и σ_τ^2 — среднее и дисперсия времени добегания.

Таким образом, расчет расхода в замыкающем створе производится в два этапа: вначале оценивается приток в русловую сеть по уравнению (2), а затем вводятся коррективы на время руслового добегания в соответствии с формулой (4).

Прежде чем приступить к решению соотношения (2), обратим внимание на особенности данного уравнения. По сути дела, оно является стохастическим дифференциальным уравнением в том смысле, что при заданных начальных и граничных условиях мы каждый год будем получать различные гидрографы, представляющие собой отдельные реализации процесса.

Это легко понять, поскольку накопление влаги на водосборе, стекание и трансформация ее в русле встречает много разнообразных неконтролируемых нами или контролируемых лишь суммарно в среднем воз-

действий. В результате на выходе в замыкающем створе неизбежно образуется типичный случайный процесс речного стока.

Перепишем уравнение (2) в эквивалентном виде

$$\frac{dQ}{dt} = -nC^{\frac{1}{n}} Q^{\frac{2n-1}{n}} + nC^{\frac{1}{n}} Q_n(t)\, Q^{\frac{n-1}{n}}. \qquad (5)$$

Последний член в правой части уравнения и является основной случайной составляющей, воздействующей на систему, поскольку режим таяния снегов и ледников в горах является, по существу, вероятностным процессом. В самом деле, поступление воды на водосбор подвержено чрезвычайно многообразным влияниям, учесть же удается только некоторые из них (в схеме Ю. М. Денисова это снегозапас, термика, ориентация склонов, водоотдача и пр.) и то в весьма схематизированном виде. Следовательно, решение уравнения (5) может быть дано только в виде кривой распределения вероятностей.

В дальнейшем для удобства записи введем сокращения

$$nC^{\frac{1}{n}} = A, \quad Q^{\frac{2n-1}{n}} = g(Q), \quad Q^{\frac{n-1}{n}} = \varphi(Q),$$

тогда будем иметь

$$\frac{dQ}{dt} = -Ag(Q) + A\varphi(Q)\, Q_n(t). \qquad (6)$$

В правой части этого уравнения $g(Q)$ и $\varphi(Q)$ являются обычными (неслучайными) функциями, а $Q_n(t)$, как уже говорилось, представляет собой некоторый случайный процесс.

Следующий шаг в рассмотрении задачи будет зависеть от характера случайного процесса поступления воды на водосбор. Здесь возможны два случая.

1) Расход, поступающий на водосбор, удовлетворительно моделируется процессом Маркова (процесс с независимыми приращениями) с математическим ожиданием, равным нулю (это не снижает общности, поскольку можно перейти к центрированным случайным величинам

$$Q_n(t) - m = \xi(t); \quad \overline{\xi(t)} = 0).$$

2) Если изменение расхода Q_n во времени описывается процессом более общего не марковского типа, то в этом случае приходится ограничиваться корреляционной теорией — определением лишь некоторых параметров распределения (например, первых двух моментов) по моментам функциям Q_n.

В данной статье мы рассмотрим более подробно только первый случай — марковской модели Q_n.

В указанных предположениях плотность переходной вероятности $f(Q, t)$ удовлетворяет прямому уравнению А. Н. Колмогорова (6)

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial Q}[K_1(Q, t) f(Q, t)] + \frac{1}{2}\frac{\partial^2}{\partial Q^2}[K_2(Q, t) f(Q, t)] \qquad (7)$$

$$f(Q, t) \geqslant 0 \quad \int f(Q, t)\, dQ = 1.$$

В качестве начального условия может быть принята какая-либо плотность вероятности в момент времени t_0 или же (если задается начальный расход Q_{no}) дельта — распределение $\delta(Q_n - Q_{no})$.

Это уравнение полностью определяется коэффициентами K_1 и K_2 и

начальными граничными условиями. В качестве последних можно принять, например $G(\infty, t)=G(0, t)=0$,
где:

$$G(Q, t)=K_1(Q, t)f(Q,t)-\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial Q}[K_2(Q, t)f(Q, t)].$$

Коэффициенты K_1 и K_2, представляющие собой условные математические ожидания, приращения процесса и условную дисперсию соответственно, определяются формулами

$$K_1(Q, t)=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{M(\Delta Q)}{\Delta t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\overline{(Q_{\Delta t}-Q)}}{\Delta t} \tag{8}$$

$$K_2(Q, t)=\lim_{\Delta t\to 0}M\frac{(\Delta Q)^2}{\Delta t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\overline{(Q_{\Delta t}-Q)^2}}{\Delta t} \tag{9}$$

с использованием уравнения (6). Для этого находим приращение процесса, описываемого уравнением (6), за интервал Δt

$$\Delta Q=-Ag(Q, t)\Delta t+A\varphi(Q, t)\left[m+\int_t^{t+\Delta t}\xi(t)\,dt\right]$$

и применяем к нему операцию взятия математического ожидания в соответствии с формулой (8).

Отсюда $K_1=-Ag(Q, t)+Am\varphi(Q, t)$ (так как под знаком интеграла стоит процесс с дельта-корреляцией и со средним, равным нулю,— белый шум).

Аналогично по формуле (9) находим:

$$K_2=N_0A^2\varphi^2(Q, t),$$

где N_0— интенсивность спектральной плотности белого шума.

Решение нестационарного уравнения А. Н. Колмогорова весьма сложно, оно возможно лишь для некоторого частного вида коэффициентов K_1 и K_2, например, $K_1=a+bx$, $K_2=const$ (кривая Гаусса) или $K_1=-bx$, $K_2=cx+d$ (кривые семейства Пирсона).

Рассмотрим несколько простых частных примеров. Пусть в уравнении (5) показатель степени равен единице $n=1$, тогда

$$K_1=AQ+m,\quad K_2=A^2N_0=\text{const},$$

откуда получим, интегрируя уравнение методом Фурье [1],

$$f(Q, t)=e^{-\frac{K_1^2}{2AK_2}}\sum_0^\infty C_p e^{-Apt}H_p\left(\frac{K_1}{\sqrt{2AK_2}}\right),$$

где H_p— полином Эрмита. Указанная формула близка к распределению Грам-Шарлье, в пределе при $t\to\infty$ она обращается в нормальную кривую. Другие частные случаи можно найти в работах [1, 5].

При n достаточно большом, практически больше трех ($h>3$), получается кривая Пирсона III типа. Таким образом, становится возможным найти условную плотность вероятности расходов в любой момент времени t при заданном значении в какой-либо предыдущий момент времени t_0.

Следует отметить, что в общем случае для любых n возможно только численное решение уравнения (7).

Постоянная N_0 получается экспериментальным путем как интенсивность корреляционной функции процесса стокообразования

$$2\int_0^\infty \frac{N_0}{2}\,\delta(\tau)\,d\tau=\sigma^2\tau_k=N_0.$$

Представляется весьма интересным найти выражение для стационарной плотности вероятности расходов, которая, очевидно, будет характерна для стабилизированных в многолетии гидрометеорологических условий бассейна. В этом случае коэффициенты K_1 и K_2 и плотность вероятности $f(Q)_{ст}$ не зависят от времени. Поэтому $\frac{\partial f_{ст}(Q)}{\partial t}=0$ и уравнение А. Н. Колмогорова преобразуется в обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\frac{d}{dQ}\left[K_2(Q)f_{ст}(Q)\right]-2K_1(Q)f_{ст}(Q)=0,$$

общее решение которого (при нулевых граничных условиях) имеет вид

$$f_{ст}(Q)=\frac{C}{K_2(Q)}\,exp\left[-2\int_0^Q\frac{K_1(x)}{K_2(x)}\,dx\right].$$

Отсюда для речного стока имеем

$$\frac{C}{N_0A^2Q^{\frac{2(n-1)}{n}}}\exp\left[-\frac{2}{N_0}\int_0^Q\frac{x-m}{Ax^{\frac{n-1}{n}}}\,dx\right]. \qquad (10)$$

Постоянная C находится из условий нормировки плотности вероятности на единицу.

Таким образом, установив плотность вероятностей для поступления воды в речную сеть Q (без руслового добегания) по уравнению (4), можно определить плотность вероятности для расхода в замыкающем створе Q_3 или же его моменты распределения.

Существенно при этом, что в число параметров кривой распределения входят характеристики водосбора, интенсивность водоотдачи, время руслового добегания и др., что позволяет связать распределение стока со стокообразующими факторами и открывает путь вероятностного прогнозирования стока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амбарцумян Г. А. Рассмотрение одного частного вида непрерывного стохастического процесса. «Ученые записки ЛГУ. Серия математическая», вып. 10. Л., 1940.

2. Бусалаев И. В., Сергеева Л. В. Применение методов теории случайных функций при водохозяйственном проектировании. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 4. Алма-Ата, «Наука», 1966.

3. Виноградов Ю. Б. Вопросы гидрологии и дождевых паводков на малых водотоках Средней Азии и Южного Казахстана. «Труды Казахского научно-исследовательского гидрометеорологического института», вып. 28, Алма-Ата, 1967.

4. Денисов Ю. М. Схема расчета гидрографа стока горных рек. Л., Гидрометеоиздат, 1965.

5. Картвелишвили Н. А. Теория вероятностных процессов в гидрологии и регулировании речного стока. Л., Гидрометеоиздат, 1967.

6. Колмогоров А. Н. Об аналитических методах в теории вероятности. Успехи математических наук, вып. 5. М., 1938.

7. Стратонович Р. Л. Избранные вопросы теории флуктуации в радиотехнике. М., «Советское радио», 1961.

SUMMARY

The author deals with possibility of obtaining the function of probability distribution of the river runoff basing on the theory of stochastic differential equations and the Markovian processes.

Thus, it has been possible to bind the form of the runoff frequency curve with the morphometric and hydrological characteristics of the watershed.

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
1970 *ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА* вып. 7

А. П. БРАСЛАВСКИЙ, К. Б. ШЕРГИНА

РАСЧЕТ ПОПРАВКИ НА ИСПАРЕНИЕ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ ОСАДКОМЕРОМ ТРЕТЬЯКОВА

На метеорологических станциях СССР измерение осадков производится с помощью осадкомера Третьякова. Можно считать бесспорно установленным, что этот прибор существенно преуменьшает истинную величину осадков: часть капель дождя или снежинок не попадает в ведро осадкомера из-за местного увеличения скорости ветра над его отверстием (ветровой недоучет осадков); некоторое количество воды смачивает стенки ведра и не выливается из него при переливании собранных в ведре осадков в измерительный стакан (потери на смачивание ведра); часть воды испаряется из ведра за период между выпадением осадков и моментом их измерения (потери на испарение). Из-за этого в показания осадкомера Третьякова необходимо вводить три поправки: на ветровой недоучет, на смачивание внутренней поверхности ведра осадкомера и на испарение собранных в ведре осадков.

В настоящее время методика определения первых двух поправок уже хорошо разработана [3, 4, 7, 9 и др.]. Приемы же расчета поправок на испарение собранных в ведре осадков еще недостаточно надежны.

Потеря воды из-за испарения собранных осадков в осадкомерном ведре может быть весьма ощутимой, слой испарения достигает иногда за дневные полусутки 1—3 *мм* [10, 12]. Сам конструктор прибора отмечает [11], что эти потери в среднем за полусутки могут составлять 0,2—0,8 *мм*. Он считал необходимым в дальнейшем найти зависимость этих потерь от метеорологических факторов и вводить соответствующие поправки в показания прибора.

В последние годы Гидрометслужба уделила этому вопросу большое внимание. На метеорологических станциях были поставлены опыты по определению величины испарения воды и снега из осадкомерных ведер с одновременным измерением температуры воздуха, влажности его, скорости ветра и иногда температуры воды в осадкомерном ведре. На основании этих материалов был предложен ряд формул, связывающих интенсивность испарения воды или снега из осадкомерного ведра со скоростью ветра и дефицитом влажности воздуха, например, В. С. Голубева [4]

$$E' = 0{,}014 + 0{,}01\ W\ \text{мм/час}, \tag{1}$$

И. Н. Нечаева [8] для жидких осадков

$$E' = (0{,}02 + 0{,}0013\ W^{2/3})\ d + 0{,}0015\ W + 0{,}004\ \text{мм/час} \tag{2}$$

и для твердых осадков

$$E' = (0{,}01 + 0{,}004\ W)\ d + 0{,}0005\ W\ \text{мм/час}. \tag{3}$$

Использование дефицита влажности воздуха в качестве аргумента при построении формулы, предлагаемой для расчета величины испарения воды или снега из осадкомерного ведра, является не вполне право-

мерным. Это отмечается и самими авторами формул. Как известно, интенсивность испарения воды зависит от разности максимальной упругости водяных паров, вычисленной по температуре испаряющей поверхности воды и содержащихся в воздухе над ней, а эта разность будет совпадать с дефицитом влажности воздуха только в том случае, если температура воды равна температуре воздуха. Температура же осадкомерного ведра и содержащихся в нем осадков далеко не всегда будет совпадать с температурой окружающего ведро воздуха. Поэтому применение формул вида (1) или (2) может привести к появлению ошибок в тех случаях, когда разность в температуре ведра и воздуха (перегрев ведра Δt) будет отличаться от его значения, имевшегося в опытах, на основании которых выведена расчетная зависимость. Так как величина Δt имеет широтный ход и систематически изменяется во времени, а также зависит от скорости ветра (как это показывается ниже), то при использовании дефицита влажности воздуха для оценки величины испарения осадков из осадкомерного ведра будут возникать систематические ошибки, избежать которые можно только при использовании для этой цели разности упругости водяных паров.

В 1964 г. на Кенгирском водохранилище и в 1965 г. на Бухтарминском гидрофизическом стационаре Отделом гидрофизики Казахского научно-исследовательского института энергетики были проведены специальные наблюдения за испарением воды и снега из осадкомерных ведер, температурой воды в них, скоростью ветра, температурой и влажностью воздуха. Материалы этих наблюдений послужили основой для вывода расчетной формулы, в которой устанавливалась связь слоя испарившейся воды из осадкомерного ведра не с дефицитом влажности воздуха, а с упомянутой выше разностью упругости водяных паров и со скоростью ветра на уровне ведра осадкомера.

Измерение величины испарения производилось одновременно в трех осадкомерных ведрах с последующим осреднением результатов. Количество испарившейся за полусутки воды определялось как разность веса ведра с водой в начале и конце полусуток. Взвешивание производилось на высокоточных весах Т-20 в 7 и 19 часов среднего местного солнечного времени. Весы обеспечивали точность взвешивания 0,05 *г*, что в пересчете на слой испарения дает 0,0025 *мм*, или в среднем около 2% слоя испарения. Как видно, применение весов Т-20 позволило измерять величину испарения в 40 раз точнее, чем при обычном измерении слоя воды в осадкомерном ведре с помощью мерного стакана.

Так как площадь ведра осадкомера Третьякова равна 200 $см^2$, то интенсивность испарения (E^1), выраженная в *мм/час*, получалась как частное от деления разности веса ведра в начале и конце полусуток на 20 и на 12.

Температура воды в осадкомерном ведре ($t_в$) записывалась ежечасно на ленте электронного самопишущего автоматического потенциометра ЭПП-09. Датчиком температуры являлся термистор типа ММТ-1, вмонтированный в водонепроницаемый футляр. Кроме того, два раза в сутки температура воды в ведре для контроля измерялась дополнительно полупроводниковым электротермометром. По записи на ленте ЭПП-09 определялась ежечасно температура воды в ведре (с введением соответствующих поправок) и затем находилось среднее значение этой температуры за полусутки по формуле

$$t_{ср} = \frac{0{,}5\,t_7 + t_8 + t_9 + \ldots t_{18} + 0{,}5\,t_{19}}{12}. \qquad (4)$$

Скорость ветра (W_{200}) измерялась контактным анемометром, уста-

новленным на метеорологической площадке вблизи осадкомеров на высоте 2 *м*. Анемометр был снабжен счетчиком импульсов специальной конструкции, обеспечивающим отсутствие ложных импульсов от сдваивания контактов, отсутствие подгорания контактов анемометра и одинаковость электрических импульсов, поступающих на регистрирующую часть счетчика при любой скорости вращения чашек анемометра. Отсчеты по счетчику производились в 7 и 19 часов по местному среднему солнечному времени.

Температура (t_{200}) и влажность воздуха (e_{200}) записывались непрерывно с помощью термографа и гигрографа, установленных рядом с осадкомерами на метеорологической площадке. Обработка лент этих самописцев производилась по Наставлению вып. 3. Затем по аналогичной формуле (4) подсчитывалась средняя за полусутки температура и влажность воздуха.

Эксперименты, проводившиеся в 1964 г. на Кенгирском водохранилище, отличались несколько меньшей точностью, измерение температуры воды в осадкомерном ведре производилось только 6 раз в сутки и слой испарившейся в ведре воды оценивался с помощью обычного мерного стакана.

Общее число полусуток, за которые были получены сведения о слое испарившейся из осадкомерного ведра воды и о сопутствующих гидрометеорологических факторах, получилось равным 250.

Эти материалы были обработаны обычным способом: вычислены интенсивности испарения, отнесенные к единице разности упругости водяных паров, и построена зависимость этой величины от скорости ветра (рис. 1). Разброс точек на этом графике оказался значительным, но

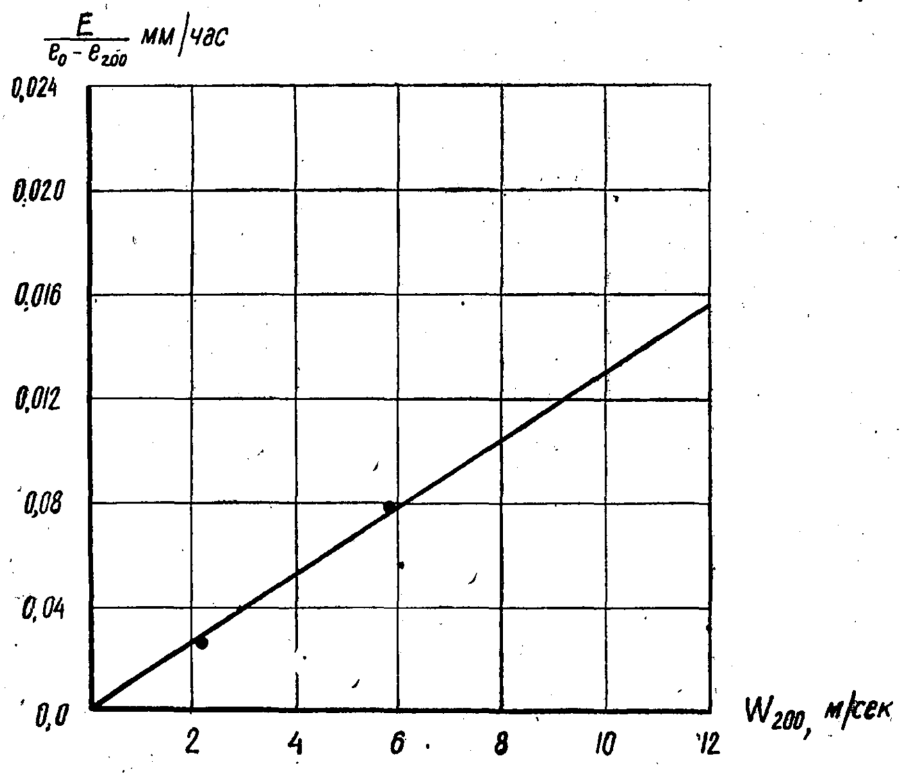


Рис. 1. Зависимость $\frac{E}{e_0 - e_{200}} = f(W_{200})$ для осадкомерного ведра осадкомера Третьякова.

тенденция увеличения интенсивности испарения с усилением ветра ясно прослеживается. Как показал И. Н. Нечаев [8], этот разброс возникает из-за неодинаковой величины щелей между воронкой осадкомера и ведром при повторной установке воронки на место.

Линия связи на рис. 1, проведенная по центрам тяжести групп точек, описывается уравнением:

$$\frac{E}{e_0-e_{200}}=0{,}0013\ W_{200},$$

откуда

$$E=0{,}0013\ (e_0-e_{200})\ W_{200}\ мм/час. \qquad (5)$$

Напомним, что максимальная упругость водяных паров e_0 определяется в этом уравнении по температуре воды в осадкомерном ведре.

Уравнение (5) и является основой для расчета количества испарившейся воды из ведра осадкомера Третьякова.

Практически испарение жидких осадков из ведра осадкомера происходит в промежуток времени от момента прекращения выпадения осадков до срока их измерения. Во время же выпадения дождя вода из ведра осадкомера не испаряется, так как влажность воздуха близка к 100%, а температура воды в ведре осадкомера равна температуре воздуха или даже ниже ее из-за охлаждения смоченных снаружи стенок ведра путем испарения. Средняя продолжительность испарения жидких осадков из ведра осадкомера (τ) по И. Н. Нечаеву колеблется от 3 до 6 часов при измерении осадков 2 раза в сутки, увеличиваясь по территории СССР при движении с севера на юг. Для Казахстана величина τ равна примерно 5 часам (табл. 1).

Испарение твердых осадков из ведра осадкомера происходит и во время выпадения снега. Поэтому величину τ при снегопадах можно принять везде равной 6 часам при измерении осадков 2 раза в сутки, полагая равновероятным выпадение твердых осадков в любое время суток.

Таблица 1

Месяц	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
τ, часов	4,7	5,2	5,0	5,5	5,2	5,2	5,0

Величина слоя потерь жидких осадков за месяц вследствии испарения их из ведра осадкомера будет равна

$$E_ж=E'\tau n=0{,}0013\,(e_0-e_{200})\ W_{200}\ мм/мес, \qquad (6)$$

где n — число полусуток с осадками в течение месяца.

Испарение твердых осадков из осадкомерного ведра происходит при прочих равных условиях существенно быстрее, чем жидких, так как зимой воронку из осадкомерного ведра вынимают. По И. Н. Нечаеву [8] такое увеличение достигает пятикратного размера, как это следует из сопоставления формул (2) и (3). В соответствии с этим можно рекомендовать для расчета величины слоя испарения твердых осадков из осадкомерного ведра формулу:

$$E=0{,}0065\,(e_0-e_{200})\ W_{200}\tau n\ мм/мес. \qquad (7)$$

Для того, чтобы полученные уравнения (6) и (7) можно было использовать для вычисления поправок на испарение к показаниям осадкомера Третьякова, необходимо разработать методику оценки температуры осадков, собираемых в ведре осадкомера, пользуясь только данными стандартных наблюдений метеостанций, поскольку систематических

измерений температуры осадков в осадкомерных ведрах не производится. Кроме того, надо знать также величину скорости ветра и упругости водяных паров, содержащихся в воздухе за период между концом выпадения осадков и сроком их измерения.

Для определения величины среднесуточной температуры осадков, накопленных в ведре осадкомера, используем уравнение теплового баланса осадкомерного ведра, полагая, что температура этого ведра и находящихся в нем осадков близки между собой. В этом уравнении будут учитываться следующие слагаемые:

1. Поглощенная наружной поверхностью ведра суммарная солнечная радиация

$$(1-r_в)\,S_{р.\,в},$$

где $r_в$ — альбедо наружной поверхности осадкомерного ведра для суммарной солнечной радиации, $S_{р.\,в}$ — количество суммарной солнечной радиации, падающее за сутки на наружную поверхность ведра осадкомера.

2. Поглощенное поверхностью ведра осадкомера встречное излучение атмосферы

$$S_а \frac{\varepsilon}{0{,}96} F_3 + 0{,}5\, S_а \frac{\varepsilon}{0{,}96} F_2 K_\lambda = \frac{\varepsilon}{0{,}96} S_а (F_3 + 0{,}5\, F_2 K_\lambda),$$

где $S_а$ — величина поглощенного горизонтальной водной поверхностью встречного излучения атмосферы в *кал/см²* сутки, ε — коэффициент поглощательной способности наружной поверхности ведра осадкомера для длинноволновой радиации, 0,96 — то же водной поверхности, $K_\lambda = 0{,}79$ — коэффициент, учитывающий защищенность ведра осадкомера лепестковой защитой со скважностью 0,5, F_3 — площадь приемного отверстия ведра осадкомера, F_2 — площадь боковой поверхности вертикальных стенок ведра. Коэффициент 0,5, стоящий перед вторым слагаемым, и K_λ получены в предположении изотропного характера распределения встречного излучения атмосферы по небосводу.

3. Теплоотдача наружной поверхности ведра осадкомера излучением

$$\varepsilon \sigma T_в^4 F_3 + 0{,}5\, \varepsilon \sigma T_в^4 F_2 K_\lambda = \varepsilon \sigma T_в^4 (F_3 + 0{,}5\, F_2 K_\lambda),$$

где σ — постоянная Стефана-Больцмана $(11{,}88 \cdot 10^{-8}$ *кал/см² сут* $^0C^4)$. $T_в$ — температура наружной поверхности ведра в градусах Кельвина, остальные обозначения те же, что и в п. 2.

4. Теплоотдача наружной поверхности ведра осадкомера путем турбулентной конвекции

$$\alpha_к (t_в - t_{200}) F_1,$$

где $\alpha_к$ — коэффициент теплоотдачи турбулентной конвекцией, $t_в$ — температура наружной поверхности ведра в °С; t_{200} — температура воздуха около ведра осадкомера в °С; F_1 — площадь наружной поверхности ведра, если полагать, что теплоотдача нижней и верхней поверхности ведра одинакова, то $F_1 = 2F_2 + F_3$. Значение коэффициента теплоотдачи турбулентной конвекцией будем находить по формуле

$$\alpha_к = 7\, D^{-0{,}3} (1 + 1{,}26\, W_{200})\ \textit{кал/см² сут}\ °С,$$

полученной на основании экспериментов по изучению теплоотдачи поверхности трубопроводов, проводившихся Отделом гидрофизики КазНИИЭ в 1966 и 1967 гг. В этой формуле D — диаметр осадкомерного

ведра в метрах, W_{200} — скорость ветра на уровне верхнего края ведра осадкомера в *м/сек*.

Затрата тепла на испарение осадков из ведра осадкомера выражается формулой:

$$\alpha_{и}(e_0-e_{200})F_3,$$

где $\alpha_{и}$ — коэффициент теплоотдачи испарением. Принимая величину скрытой теплоты испарения, равной 590 *кал/г*, и учитывая уравнения (6) и (7) получаем для жидких осадков

$$\alpha_{и}=\frac{590\times0{,}0013\times24}{10}W_{200}=1{,}84\,W_{200}\ кал/см^2\ \text{сут мб}$$

и для твердых осадков

$$\alpha_{и}=\frac{590\times0{,}0065\times24}{10}W_{200}=9{,}2\,W_{200}\ кал/см^2\ \text{сут мб}.$$

Радиационным теплообменом между наружной поверхностью ведра осадкомера, поверхностью окружающей осадкомер суши и поверхностью лепестковой защиты будем пренебрегать, поскольку они близки между собой.

Уравнение теплового баланса ведра осадкомера в среднем за сутки для стационарных условий запишется так:

$$(1-r_{в})S_{р.в}+\frac{\varepsilon}{0{,}96}S_{а}(F_3+0{,}5F_2K_{\lambda})-\varepsilon\sigma T_{в}^4(F_3+0{,}5F_2K_{\lambda})-$$

$$-\alpha_{к}(t_{в}-t_{200})F_1-\alpha_{и}(e_0-e_{200})F_3=0. \qquad (8)$$

Определение температуры ведра осадкомера из этого трансцендентного уравнения производится подбором:

$$t_{в}=\frac{1}{\alpha_{к}}\left[\frac{1-r_{в}}{F_1}S_{р.в}+\frac{\varepsilon(F_3+0{,}5F_2K_{\lambda})}{F_1}\left(\frac{S_{а}}{0{,}96}-\right.\right.$$

$$\left.\left.-\sigma T_{в}^4\right)-\frac{F_3}{F_1}\alpha_{и}(e_0-e_{200})\right]+t_{200}. \qquad (9)$$

Входящую в это уравнение величину $S_{а}$, можно определить по зависимости, приведенной в работе [2].

$$S_{а}=[(1-N_0)A+\alpha_{н}N_{н}+\alpha_{в+с}(N_0-N_{н})]\,\sigma T_{200}^4=(b_1+b_2)\,\sigma T_{200}^4, \qquad (10)$$

где $b_1=A(1-N_0)$.

$$b_2=\alpha_{н}N_{н}+\alpha_{в+с}(N_0-N_{н}).$$

В этих формулах: N_0 и $N_{н}$ — общая и нижняя облачность в долях единицы, A, $\alpha_{и}$ и $\alpha_{в+с}$ — параметры, зависящие от температуры и влажности воздуха, T_{200} — температура воздуха на высоте 2 *м* в градусах Кельвина.

Для облегчения расчетов величины $S_{а}$ можно пользоваться таблицами значений b_1 и b_2, приведенными в работе [2].

Определение величины $S_{р.в}$, входящей в уравнение (8), более сложно, так как количество солнечной радиации, поглощенное наружной поверхностью осадкомерного ведра, зависит от интенсивности падающей солнечной радиации и от высоты Солнца, а последняя в течение суток существенно и непрерывно меняется. Поэтому величина $S_{р.в}$ определяется путем интегрирования количества, падающего на осадкомерное ведро суммарной солнечной радиации в пределах от восхода до захода

Солнца:

$$S'_{р.\,в} = \int_{-\omega_0}^{+\omega_0} S_в \, d\tau, \qquad (11)$$

где $S'_в$ — интенсивность падающей на ведро осадкомера суммарной солнечной радиации, $-\omega_0$ и $+\omega_0$ — часовые углы восхода и захода Солнца, отсчитываемые от полудня.

Значение ω_0 находится по общеизвестной формуле

$$\omega_0 = \arccos(-\operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\delta),$$

где φ — широта местности, δ — склонение Солнца.

Как известно, ведро осадкомера Третьякова окружено ветровой лепестковой защитой, которая может частично затенять от попадания прямой солнечной радиации боковую поверхность ведра; величина затенения зависит от высоты Солнца над горизонтом. Ветровая защита задерживает также и часть рассеянной солнечной радиации. В периоды, когда выпадают осадки, небо бывает почти полностью закрыто облаками и поэтому можно полагать, что распределение интенсивности рассеянной солнечной радиации по небосводу изотропно. Для таких условий можно оценить значение коэффициента уменьшения рассеянной солнечной радиации величиной $K_\lambda = 0{,}79$, учитывая геометрические размеры ведра осадкомера и ветровой защиты его, показанные на рис. 1, а также скважность лепестковой защиты (p), равную 0,5.

Обозначим диаметр ведра осадкомера через D, площадь его поперечного сечения через $F_з = 0{,}25\pi D^2$, длину освещенной Солнцем боковой поверхности ведра через x (рис. 2) и высоту ведра через l. Из рисунка 2

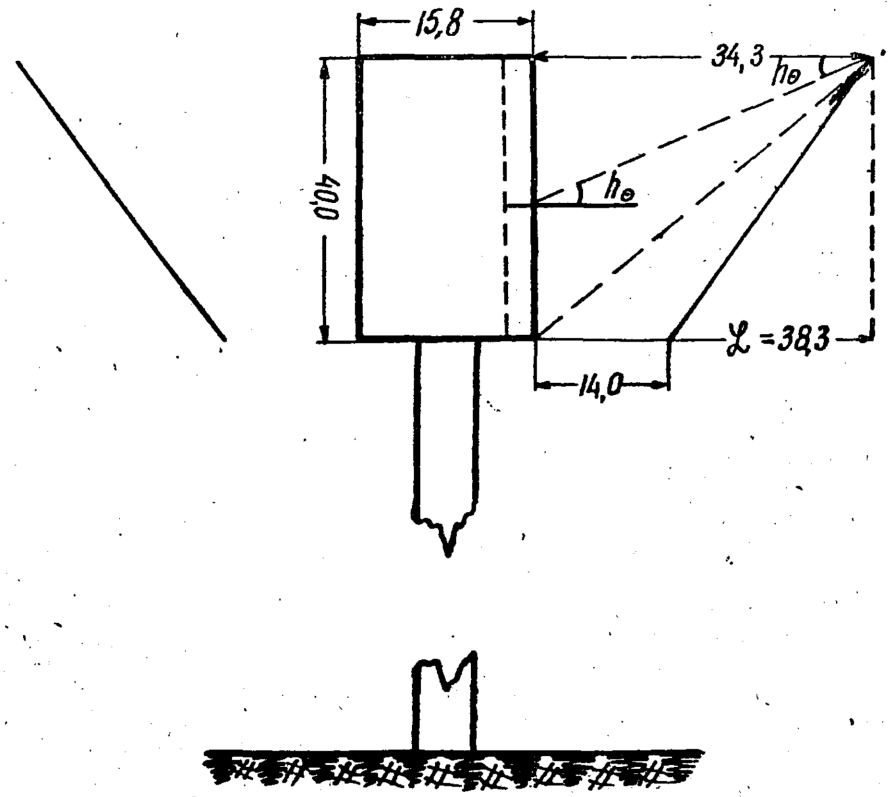


Рис. 2. Схема освещения Солнцем осадкомерного ведра осадкомера Третьякова.

следует, что на ведро осадкомера будет попадать то количество прямой солнечной радиации, которое падает на горизонтальную поверхность, равную

$$F_3 + \frac{xD}{\operatorname{tg} h_\Theta} + \frac{(l-x)\,p\,D}{\operatorname{tg} h_\Theta} \tag{13}$$

и, следовательно, эта радиация равна

$$Q_в = Q\,D\left\{0{,}25\pi D + \frac{1}{\operatorname{tg} h_\Theta}\,[x + p\,(l-x)]\right\}. \tag{14}$$

Здесь Q — количество прямой солнечной радиации, падающее на единицу горизонтальной поверхности, h_Θ — высота Солнца над горизонтом.

Как видно из рисунка 2, среднюю длину освещенной Солнцем части ведра можно приближенно определить по формуле:

$$x = L \operatorname{tg} h_\Theta \tag{15}$$

при условии $x \leqslant l$.

Высота Солнца определяется по известной зависимости

$$h_\Theta = \operatorname{arc}\sin y, \tag{16}$$

где

$$y = \sin h_\Theta = \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega. \tag{17}$$

Падающая на осадкомерное ведро рассеянная солнечная радиация будет равна

$$q_в = (F_3 + 0{,}5\,F_2\,K_\lambda)\,q, \tag{18}$$

где $F_2 = \pi D l$ — площадь наружной поверхности стенок ведра осадкомера, q — количество рассеянной солнечной радиации, падающей на единицу горизонтальной поверхности. (19)

Суммарная солнечная радиация, падающая на ведро осадкомера, будет равна сумме $Q_в$ и $q_в$, т. е.

$$S'_в = Q_в + q_в \tag{20}$$

и, следовательно

$$S_{р.\,в} = \int_{-\tau_0}^{+\tau_0} (Q_в + q_в)\,d\tau. \tag{21}$$

Величины Q и q можно определять по формулам, приведенным в работе [2]:

$$Q = (Q+q)_{r=0}\,\frac{1}{0{,}955\,\beta_т}\,[1 - N_о + K_{проп}\,(N_о - N_н)], \tag{22}$$

$$q = S_{р.\,г.} - Q, \tag{23}$$

где

$$(Q+q)_{r=0} = \sin h_\Theta \left(a - \frac{100}{в \sin h_\Theta + c}\right) + 0{,}8\ \textit{кал/см}^2\ \text{час}, \tag{24}$$

$$\beta_т = a_\beta\, m + 1, \tag{25}$$

$$K_{проп} = (0{,}0205 - 0{,}000117\ h^0_\Theta)\,h^0_\Theta - 0{,}2817 \geqslant 0, \tag{26}$$

$$S_{р.\,г.} = (Q+q)_{r=0}\,K_r\,K_N, \tag{27}$$

$$K_r = \frac{1}{1-(0{,}3+0{,}46\,N_0)\,r_{\text{тер}}}, \tag{28}$$

$$K_N = 1-K_{\text{н}}\,N_{\text{н}}-K_{\text{в+с}}\,(N_0-N_{\text{н}}). \tag{29}$$

Формула (26) аппроксимирует данные, помещенные в таблице 9 работы [2].

В этих формулах N_0 и $N_{\text{н}}$ — общая и нижняя облачность в долях единицы, $r_{\text{тср}}$ — среднее альбедо территории, окружающей осадкомер (значения $r_{\text{тер}}$ могут быть взяты из работы [1], а α_β, a, $в$, и c—параметры, зависящие от фактора мутности атмосферы (T), значения a, b и c приведены в таблице 1 работы [2], а зависимость $\alpha_\beta = f(\text{T})$ показана на рис. 3, она получена на основании рис. 16 работы [2]. Величина фактора

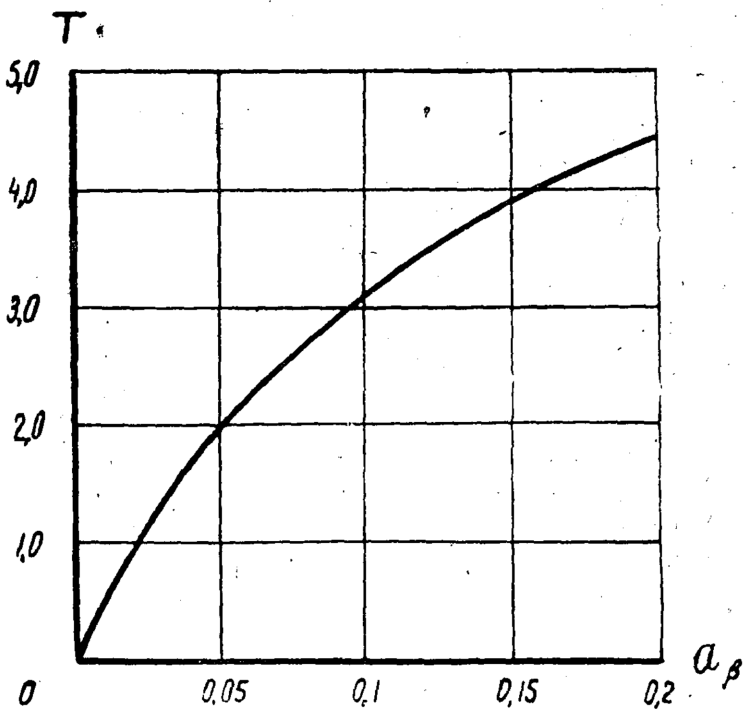


Рис. 3. Зависимость α_β от фактора мутности атмосферы (T).

мутности атмосферы зависит от широты местности и времени года, эта зависимость показана на рис. 18 работы [2].

Расчет температуры ведра осадкомера по уравнению (9) технически сложен. Поэтому для облегчения его составлена программа расчета его на ЭЦВМ «Проминь», по которой вычислен ряд значения Δt (среднесуточного перегрева осадкомерного ведра по отношению к температуре воздуха) и построены номограммы $\Delta t = f(\tau, \varphi, W_{200})$, показанные на рис 4. Они составлены для значения облачности характерного для полусуток с осадками для всей территории СССР (таблица 2).

Таблица 2

Характеристика облачности за полусутки с осадками

Месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
N_0	9	9	9	9	9	8	8	8	9	9	9	9
$N_{\text{н}}$	6	6	6	6	6	6	6	6	6	8	7	7

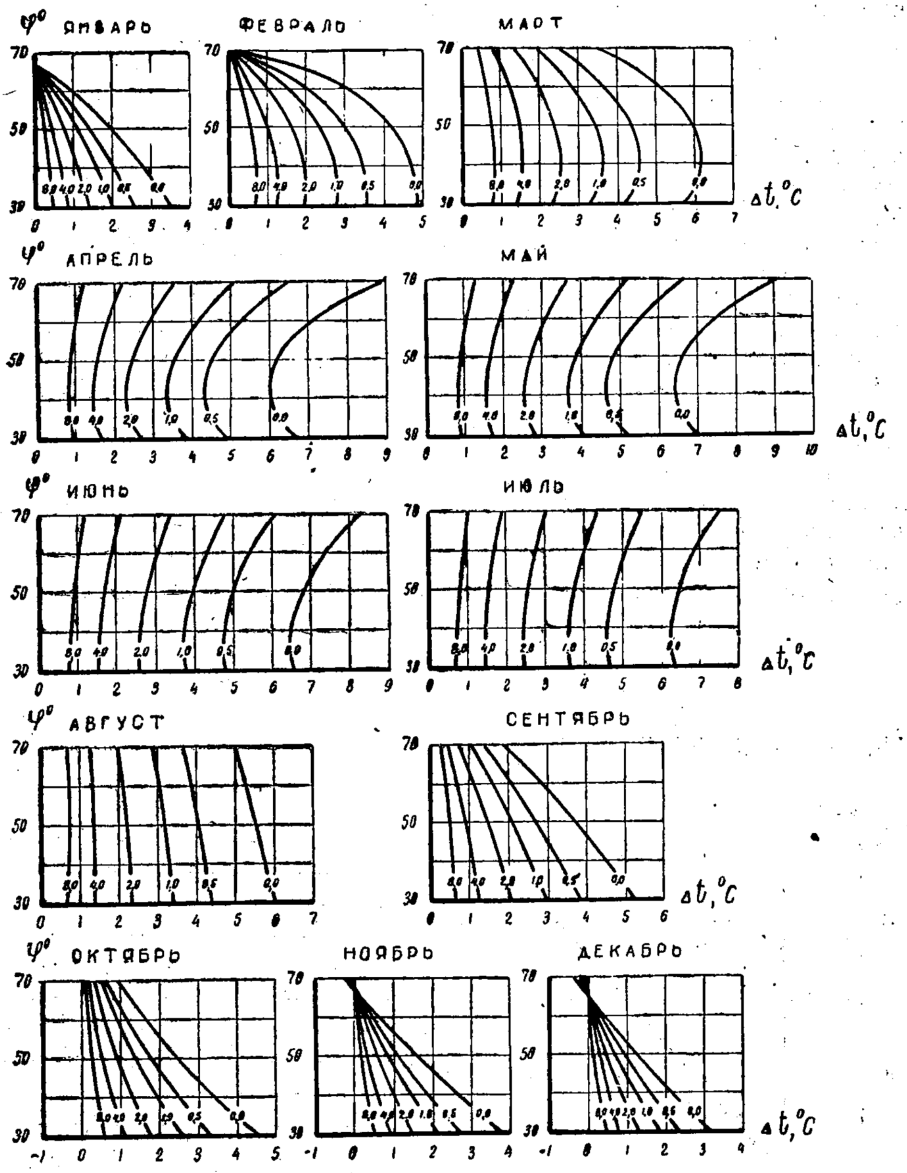


Рис. 4. Графики зависимости Δt от скорости ветра W_{200}, *м/сек*, широты местности (φ^0) и времени года.

Определение температуры осадкомерного ведра (средней за сутки) с помощью рис. 4 производится простым прибавлением Δt к температуре воздуха t_{200}:

$$t_в = t_{200} + \Delta t. \qquad (30)$$

Значения Δt колеблются от 0,0 до 7,0 °С в зависимости от времени года, широты местности и скорости ветра.

Достоверность изложенной выше методики расчета перегрева осадкомерного ведра может быть установлена путем сопоставления результатов расчета с измеренными значениями перегрева во время выполнения описанных выше опытов по исследованию испарения осадков из

ведра осадкомера Третьякова (таблица 3). Результаты такого сопоставления можно считать удовлетворительными. Среднее отклонение расчетных величин $t_в$ от измеренных составляет всего 0,1 °С.

При расчете поправок на испарение к показаниям осадкомера Третьякова по уравнениям (6) и (7) необходимо знать скорость ветра, температуру и влажность воздуха за полусутки с осадками. Эти элементы можно вычислить по данным срочных наблюдений метеостанции, однако для облегчения расчета может быть предложен иной приближенный способ их нахождения — путем перехода от среднемесячных значений этих элементов.

Как показала Л. П. Кузнецова [5], скорость ветра за полусутки с осадками в среднем за месяц больше, чем среднемесячное ее значение для всех календарных дней. Ею составлены карты разности этих скоростей ветра, которыми и можно воспользоваться для перехода от среднемесячной скорости ветра к средней скорости ветра за полсутки с осадками.

Соответствующие сопоставления, сделанные для температуры и влажности воздуха, также указывают на систематические различия их для полусуток с осадками по сравнению со среднемесячным значением. Для соответствующего пересчета можно пользоваться зависимостями $t_{ос} = f(t_{ср})$ и $r_{ос} = f(r_{ср})$, показанными на рис. 5 и 6, или уравнениями

$$t_{ос} = 1 + 0{,}9\, t_{ср} \tag{31}$$

$$r_{ос} = r_{ср,\ мес.} + 16\, e^{-0{,}00172\,(r_{ср.\ мес.} - 50)^2}, \tag{32}$$

аппроксимирующими эти зависимости.

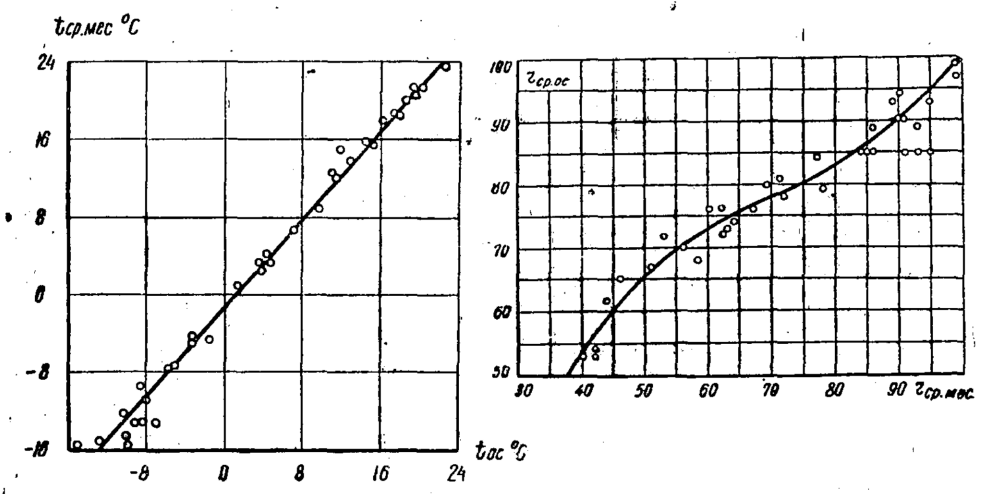


Рис. 5. График связи среднемесячной температуры воздуха (t_{200}) и температуры воздуха в период выпадения осадков ($t_{ос}$).

Рис. 6. График связи влажностей воздуха среднемесячной ($r_{ср}$,%) и в период выпадения осадков ($r_{ос}$,%).

Переход от относительной влажности $r_{ос}$ к упругости водяных паров, содержащихся в воздухе, осуществляется по известной формуле

$$e_{ос} = e_{0,\ ос}\,\frac{r_{ос}}{100} \tag{33}$$

Максимальную упругость водяных паров $e_{0,\ ос}$ можно вычислять по несколько преобразованной формуле Магнуса:

Таблица 3

Сопоставление измеренных и рассчитанных по уравнению (6) температур воды в ведре осадкомера Третьякова

Пункт наблюдений	Период наблюдений	Температура воздуха, °С	Влажность воздуха, *мб*	Скорость ветра у осадкомера, *м/сек*	Облачность в долях единицы		Температура воды в осадкомерном ведре, °С		Расхождения, °С
					общая	нижняя	измеренная	рассчитанная	
Бухтарминский гидрофизический стационар КазНИИЭ (Восточно-Казахстанская область)	май 1965 г.	14,8	7,5	2,6	0,6	0,2	16,0	17,0	1,0
	июнь 1965 г.	18,4	11,7	2,2	0,6	0,3	21,9	21,0	—0,9
	июль 1965 г.	25,2	14,0	2,1	0,3	0,2	27,1	27,0	0,1
Джезказганская водно-испарительная станция на Кенгирском водохранилище (Карагандинская область)	август 1964 г.	18,8	10,8	4,5	0,4	0,2	19,2	21,0	0,9
	сентябрь 1964 г.	14,6	7,9	4,1	0,2	0,1	16,9	15,8	—1,1
Валдайская научно-исследовательская гидрологическая лаборатория (Валдай, Новгородская область)	май 1965 г.	10,9	8,6	2,7	0,9	0,6	11,4	12,4	1,0
	июнь 1965 г.	15,8	11,2	2,5	0,5	0,2	17,1	18,6	1,5
	май 1966 г.	18,3	12,4	2,7	0,7	0,3	21,6	20,4	—1,2
	июнь 1966 г.	20,3	11,6	3,2	0,6	0,2	22,4	23,2	0,8
	июль 1966 г.	20,7	13,9	2,7	0,6	0,3	23,0	22,9	—0,1
	август 1966 г.	17,3	13,5	3,3	0,7	0,4	18,8	18,7	—0,1
	июнь 1967 г.	18,3	10,4	3,2	0,6	0,3	20,4	20,4	0,0
	июль 1967 г.	19,6	12,8	3,1	0,6	0,8	21,8	21,6	—0,2
	август 1967 г.	20,6	16,1	2,9	0,7	0,3	22,4	22,2	—0,2
	сентябрь 1967 г.	15,2	11,7	2,2	0,3	0,1	17,6	16,9	—0,7
							Среднее		0,1

Таблица 4

Пункт наблюдений	Период наблюдений	Число суток в периоде наблюдений	t_{200}, °С	e_{200}, *мб*	W_{200}, *м/сек*	$t_{\text{ведра}}$, °С	d, *мб*	E, *мм/сут*	Расчет испарения, в *мм*/ период			Отклонения в		
									по тепловому балансу	по И.Н. Нечаеву [8]	по Е.А. Шувахину [12]	$\frac{E_1-E}{E_1}\cdot 100$	$\frac{E_2-E}{E_2}\cdot 100$	$\frac{E_3-E}{E_3}\cdot 100$
									E_1	E_2	E_3			
Бухтарминский гидрофизический стационар КазНИИЭ (Восточно-Казахстанская область)	V — 1965	22	14,3	6,4	2,5	16,5	9,9	16,5	21,3	27,1	23,8	—22	—39	—31
	VI — 1965	18	18,5	10,9	2,2	21,1	10,4	11,2	17,4	22,0	21,6	—36	—48	—48
	VII — 1965	24	25,3	12,7	2,4	27,7	19,6	42,2	43,9	53,8	54,7	— 4	—21	—23
Джезказганская водно-испарительная станция на Кенгирском водохранилище	VIII — 1964	16	18,8	10,8	4,5	20,1	10,4	25,0	28,5	26,3	23,0	—12	— 5	9
	IX — 1964	28	14,6	7,8	4,1	15,8	8,8	45,5	36,2	38,3	32,9	26	19	38
Валдайская научно-исследовательская гидрологическая лаборатория (г. Валдай, Новгородская область)	V — 1965	4,2	10,9	8,6	2,7	12,4	3,7	1,65	2.1	2,5	1,6	—20	—34	2
	VI — 1965	13,3	15,8	11,2	2,5	18,6	6,8	12,9	10,6	12,0	8,9	22	7	44
	VI — 1966	9,5	20,3	11,6	3,2	23,2	12,2	13,0	15,9	15,4	14,8	—18	—16	—12
	VII — 1966	8,5	20,7	13,9	2,7	22,9	10,5	10,4	10,0	11,3	10,0	4	— 8	4
	VIII — 1966	9,5	17,3	13,5	3,3	18,7	6,3	10,1	7,9	9,1	6,6	27	12	53
	VI — 1967	8,5	18,3	10,4	3,2	20,4	10,6	14,1	11,5	12,2	11,0	22	15	28
	VII — 1967	12,5	19,6	12,8	3,1	21,6	10,0	15,0	15,7	16,9	14,1	— 5	—11	6
	VIII — 1967	4,3	20,6	16,1	2,9	22,2	8,2	3,7	4,2	4,8	4,1	—11	—23	—10
	IX — 1967	6,2	15,2	11,7	2,2	16,9	5,6	3,8	3,2	4,6	3,3	19	—17	16
											Ср	—06	—12	54
											Ср. кв.	±21	±24	±30

$$e_0 = 6{,}11^{\frac{17{,}16\,t_{oc}}{235+t_{oc}}} \qquad (34)$$

Влажность воздуха за полусутки с осадками всегда больше, чем в среднем за месяц, но различие это неодинаково: при очень большой ($\geqslant 80\%$) и при очень малой ($\leqslant 35\%$) относительной влажности оно незначительно, наибольшее же расхождение наблюдается при влажности 40—50%. Это связано, по-видимому, с тем, что большая относительная влажность бывает там, где территория, окружающая метеостанцию, хорошо увлажнена и добавление влаги за счет выпадающих осадков уже почти не влияет на процесс формирования влажности воздуха. Весьма малая относительная влажность бывает там, где подстилающая поверхность иссушена и осадков вообще выпадает мало (пустыни, полупустыни). В этих условиях испарения небольшого количества выпавших осадков не хватает для заметного повышения полусуточного значения влажности воздуха.

Температура воздуха за полусутки с осадками по сравнению со среднемесячным ее значением оказывается выше зимой и ниже летом.

В заключение приводим пример расчета поправок за счет испарения накопленных в ведре осадкомера Третьякова осадков (таблица 4). Проверка рекомендуемой методики по материалам наблюдений за испарением осадков из ведра осадкомера Третьякова показала, что применение уравнения теплового баланса дает более высокую точность расчета, чем ранее предложенные эмпирические зависимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барашкова Е. П., Гаевский В. Л., Дьяченко Л. Н., Лугина К. М., Пивоварова З. И. Радиационный режим территории СССР. Л., Гидрометеоиздат, 1961.

2. Браславский А. П. Исследование и расчеты гидрологического режима озер и водохранилищ. Доклад, представляемый на соискание ученой степени доктора технических наук по совокупности опубликованных работ. Алма-Ата, 1966.

3. Временные указания по введению поправок в месячные суммы осадков при расчетах водных балансов речных бассейнов. Валдай, 1967.

4. Голубев В. С. Об учете дождевых осадков различными приборами. «Труды Государственного гидрологического института», вып. 81. Л., 1960.

5. Кузнецова Л. П. Сравнение скорости ветра и температуры воздуха во время выпадения осадков с их средними месячными значениями. «Труды Главной Геофизической обсерватории», вып. 195. Л., 1966.

6. Курс метеорологии. Под редакцией проф. П. Н. Тверского. Л., Гидрометеоиздат, 1961.

7. Меликишвили О. Е. Некоторые результаты исследований погрешностей измерения осадков на экспериментальной базе в Поти. «Труды Главной геофизической обсерватории», вып. 195. Л., 1966.

8. Нечаев И. Н. Исследование погрешности измерения атмосферных осадков, вызванной испарением их из прибора. «Труды Геофизической обсерватории», вып. 215. Л., 1968.

9. Нечаев И. Н.Корректировка месячных и годовых норм осадков поправками на смачивание осадкомерных сосудов. «Труды Главной геофизической обсерватории», вып. 195. Л., 1966.

10. Пашинский А. З. Об испарении из осадкомерных сосудов. «Труды Главной Геофизической обсерватории», вып. 195. Л., 1966.

11. Третьяков В. Д. Измерение атмосферных осадков. «Труды Главной геофизической обсерватории», вып. 34. Л., 1952.

12. Шувахин Е. А. Об ошибках измерения жидких осадков в условиях Казахстана. «Труды Главной геофизической обсерватории», вып. 195. Л., 1966.

Приложение

Программа
расчета на ЭВМ «Проминь» температуры осадкомерного ведра по уравнению его теплового баланса

Расчетные формулы

$$\omega_0 = \arccos(-\operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\delta)$$

$$\Delta\omega = 0{,}1\,\omega_0$$

$$\omega_1 = 0 + 0{,}5\,\Delta\omega$$

$$\omega_{n+1} = \omega_n + \Delta\omega < \omega_0$$

$$\sin h_\Theta = \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega$$

$$h_\Theta = \arcsin h_\Theta$$

$$(Q+q)_{r=0} = \sin h_\Theta \left(a - \frac{100}{b \sin h_\Theta + c}\right) + 0{,}8 \ \textit{кал/см}^2 \text{ час}$$

$$Q_0 = \frac{1}{0{,}955\,\beta_T}(Q+q)_{r=0} = \frac{1{,}048}{a_\beta\, m+1}(Q+q)_{r=0}$$

$$Q = Q_0\,[1 - N_0 + K_{\text{проп}}(N_0 - N_\text{н})]$$

$$K_{\text{проп.}} = 0{,}458\,h_\Theta, \ (h_\Theta \text{ в радианах})$$

$$K_r = \frac{1}{1-[0{,}3+0{,}5\,N_\text{н}+0{,}42\,(N_0-N_\text{н})]\,r_{\text{тер}}}$$

$$K_N = 1 - K_\text{н}\,N_\text{н} - K_{\text{в+с}}\,(N_0 - N_\text{н})$$

$$S_{\text{р. г}} = (Q+q)_{r=0}\,K_N\,K_r$$

$$q = S_{\text{р. г}} - Q$$

$$X = L \operatorname{tg} h_\Theta \leqslant l$$

$$Q_\text{в} = Q\,D\left\{\frac{\pi D}{4} + \frac{1}{\operatorname{tg} h_\Theta}[l\rho + X(1-\rho)]\right\}$$

$$q_\text{в} = \left(F_3 + \frac{1}{2}F_2\,K_\lambda\right)q$$

$$S'_{\text{р. в}} = \frac{24}{\pi}\Delta\omega\,(Q_\text{в} + q_\text{в})$$

$$S_{\text{р. в}} = \sum_{-\omega_0}^{+\omega_0} S'_{\text{р. в.}}$$

$$\alpha_\text{к} = \frac{7}{D^{0,3}}(1 + 1{,}26\,W_{200}) \ \textit{кал/см}^2 \text{ в сут. град, } (D \text{ — в метрах})$$

$$\alpha_\text{и} = 1{,}84\,W_{200} \ \textit{кал/см}^2 \text{ сут. } \textit{мб}$$

$$e_0 = 6{,}11\ 10^{\frac{7{,}45\,t}{235+t}} = 6{,}11\ e^{\frac{17{,}16\,t}{235+t}} \ \textit{мб}$$

$$S_\text{а} = (\text{в}_1 + \text{в}_2)\,\sigma\,T_{200}^4 \ \textit{кал/см}^2 \text{ сут.}$$

$$t = \frac{1}{\alpha_\text{к}}\left[\frac{1-r_\text{в}}{F_1}S_{\text{р. в.}} + \varepsilon\left(\frac{S_\text{а}}{0{,}96} - \sigma\,T_\text{в}^4\right)(F_3 + 0{,}5\,F_2\,K_\lambda) - \alpha_\text{и}\frac{F_3}{F_1}(e_0 - e_{200})\right] + t_{200}$$

$$F_1 = \frac{\pi Д^2}{2} + \pi Д l \ см^2$$

$$F_2 = \pi Д l \ см^2$$

$$F_3 = 0{,}25\,\pi Д^2 \ см^2$$

Распределение ячеек памяти ЭВМ

№ ячейки	Наименование величины
01	t_{200} — температура воздуха на высоте 2 *м* над поверхностью земли.
02	e_{200} — упругость водяных паров, содержащихся в воздухе *(мб)* на высоте 2 *м* над поверхностью земли.
03	$W_{фл}$ — скорость ветра *(м/сек)* на высоте флюгера.
04	N_o — общая облачность в долях единицы.
05	$N_н$ — нижняя облачность в долях единицы.
06	$K_н$ — коэффициент непропускания суммарной солнечной радиации облаками нижнего яруса.
07	$K_{в+с}$ — то же, облаками верхнего и среднего ярусов.
08	δ — склонение Солнца (°).
09	$r_{тер}$ — среднее значение альбедо окружающей осадкомер территории для суммарной солнечной радиации.
10	φ — широта места расположения осадкомера (°).
11	a — параметр, зависящий от фактора мутной атмосферы *(кал/см²)*.
12	в — то же *(см²час/кал)*.
13	с — то же *(см²час/кал)*.
14	α_β — коэффициент, зависящий от фактора мутности атмосферы.
15	b_1 — коэффициенты, зависящие от e_{200}, $N_в$ и $N_н$, определяются по таблицам 13.
16	b_2 и 14 работы [2]
17	$0{,}1 \div 0{,}9 \approx 0{,}5$
18	$\frac{24}{\pi}\left(\frac{1-r_в}{F_1}\right) = 0{,}00254.$
19	235
20	—1
21	0,42
22	0,3
23	0,0
24	0,458
25	0,96
26	$\frac{\varepsilon\left(F_3 + \frac{1}{2} F_2 K_\lambda\right)}{F_1} = 0{,}33$
27	100
28	0,8
29	$F_3 + \frac{1}{2} F_2 K_\lambda = 992$
30	$L = 38{,}3$ *см*.
31	$l_\rho = 20$ *см*
32	$0{,}25\ \pi D = 12{,}5$ *см*
33	$D = 16$ *см*
34	$l = 40$ *см*
35	$1 - \rho = 0{,}5$

Продолжение

№ ячейки	Наименование величины
36	$\frac{7}{D^{0,3}}=12,2$
37	1,26
38	273,16°
39	0,01
40	0,1
41	$\frac{1}{0,96}=1,042$
42	$11,88=10^8\,\delta$
43	17,16
44	$\frac{F_3}{F_1}=0,0830$
45	$e_0=6,11$ *мб*
46	4
47	11,88 *кал/см²сут* (°К)⁴
48	1,84 *кал сек/см²* сут *мб м*
49	K_Φ — коэффициент для перехода от скорости ветра, измеренной на высоте флюгера к скорости ветра на высоте 2 *м* над поверхностью земли.
50	1,048

Программа I

№ команды	Операция	Адрес	Примечание	№ команды	Операция	Адрес	Примечание
00	Чт	10	φ	26	Бп	30	
01	Ум	97		27	Чт	20	
02	Зп	60	$\varphi_{рад}$	28	Бп	30	
03	cos	00		29	Чт	76	
04	Зп	56	$\cos\varphi$	30	arc cos w	00	
05	Чт	08	δ	31	Зп	68	ω_0
06	Ум	97					
07	Зп	52	$\delta_{рад}$	32	Ум	40	
08	cos	00	$\cos\delta$	33	Зп	75	Δw
09	Ум	56		34	Ум	88	
10	Зп	79	$\cos\varphi\cdot\cos\delta$	35	Зп	74	$0,5\,\Delta w$
11	Чт	60					
12	sin	00	$\sin\varphi$	36	Чт	05	
13	Зп	60		37	Ум	88	
14	Чт	52		38	Зп	51	$0,5\,N_н$
15	sin	00	$\sin\delta$	39	Чт	04	
16	Ум	60		40	Выч 1	05	
17	Зп	77	$\sin\varphi\cdot\sin\delta$	41	Зп	78	$N_0-N_н$
				42	Ум	21	
18	Дел	79	$\operatorname{tg}\varphi\cdot\operatorname{tg}\delta$	43	Сл	51	
19	Ум	20		44	Сл	22	
20	Зп	76	$-\operatorname{tg}\varphi\cdot\operatorname{tg}\delta$	45	Ум	09	
				46	Выч 2	86	
21	Сл	86		47	Зп	60	
22	Уп 1	27		48	Чт	86	
23	Выч 1	87		49	Дел	60	
24	Уп 1	29		50	Зп	61	K_r
25	Чт	86		51	Чт	78	

Продолжение

№ команды	Операция	Адрес	Примечание
52	Ум	07	
53	Зп	76	
54	Чт	05	
55	Ум	06	
56	Сл	76	
57	Выч 2	86	
58	Ум	61	
59	Зп	52	
60	Чт	23	
61	Зп	76	$\Sigma S_{р.\,в}=0$
62	Чт	15	
63	Сл	16	
64	Зп	60	
65	Чт	01	
66	Сл	38	
67	Ум	39	
68	In	00	
69	Ум	46	
70	exp	00	
71	Ум	47	
72	Ум	60	$S_а$
73	Ум	41	
74	Зп	73	$0{,}5\,\varepsilon\,K_\lambda\,S_а$
75	Чт	01	
76	Зп	50	$t_{зад}=t_{200}$
77	Чт	48	
78	Ум	49	
79	Ум	03	
80	Ум	44	$\alpha_и \frac{F_3}{F_1}$
81	Зп	59	
82	Чт	03	
83	Ум	49	
84	Ум	37	
85	Сл	86	
86	Ум	36	
87	Зп	57	$\alpha_к$
88	Чт	86	
89	Выч 1	04	
90	Зп	72	$1-N_о$
91	Ост	00	
92	Бп	00	

Программа II

Номер команды	Код операции	Адрес	Примечание
00	Чт	74	ω_1
01	cos	00	
02	Ум	79	
03	Сл	77	
04	Зп	70	$\sin h_\Theta$
05	arc sin	00	
06	Зп	71	h_Θ
07	tg	00	
08	Зп	60	$\operatorname{tg} h_\Theta$
09	Чт	71	
10	Ум	24	
11	Ум	78	
12	Сл	72	
13	Зп	51	
14	Чт	70	
15	Ум	12	
16	Сл	13	
17	Зп	69	
18	Чт	27	
19	Дел	69	$1-N_о+K_{пр}\,(N_о-N_н)$
20	Выч 2	11	
21	Ум	70	
22	Сл	28	
23	Зп	56	
24	Ум	52	
25	Зп	53	
26	Чт	14	
27	Дел	70	
28	Сл	86	
29	Зп	55	$(Q+q)_{r=0}$
30	Чт	50	
31	Дел	55	
32	Ум	56	
33	Ум	51	
34	Зп	58	
35	Выч 2	53	
36	Ум	29	
37	Зп	54	q
38	Чт	30	
39	Ум	60	$q_в$
40	Зп	55	
41	Выч 2	34	
42	Уп 1	45	
43	Чт	55	$l-2\operatorname{tg} h_о$
44	Бп	46	
45	Чт	34	
46	Ум	35	
47	Сл	31	
48	Дел	60	
49	Сл	32	
50	Ум	33	

Продолжение

Номер команды	Код операции	Адрес	Примечание	Номер команды	Код операции	Адрес	Примечание
51	Ум	58		76	Ум	43	
52	Сл	54		77	Дел	64	
53	Ум	18	$Q_в$	78	exp	00	
54	Ум	75		79	Ум	45	e_0
55	Сл	76		80	Выч 1	02	Δe
56	Зп	76	$S_{р.в}$	81	Ум	59	$Z\frac{F}{f}$
57	Чт	74		82	Выч 2	61	
58	Сл	75	$\Sigma S_{р.в}$	83	Сл	76	
59	Зп	74		84	Дел	57	
60	Выч 1	68		85	Сл	01	$t_{пол}$
61	Уп 1	00	$\omega_{n+1}=\omega_n+\Delta\omega$	86	Выч 1	62	
62	Чт	62	$\omega_n-\omega_0$	87	Зп	69	
63	Сл	38		88	Ум	17	
64	Ум	39	$t_{зад}$	89	Сл	62	
65	Iп	00		90	Зп	62	
66	Ум	46		91	Чт	69	
67	exp	00		92	Фр	86	
68	Ум	42		93	Выч 2	40	
69	Выч 2	73	$S_a\int_{0,96}-\sigma T_в^4$	94	Уп 1	62	
70	Ум	26		95	Чт	62	
71	Зп	61	$\varepsilon\left(F_8+\frac{1}{2}F_2K_\lambda\right)\left(S_a\int_{0,96}-\sigma T_в^4\right)$	96	Выч 1	01	
				97	Ост	01	Δt
				98	ОО	99	
				99	ОСТ	00	
72	Чт	62	$t_{зад}$				
73	Сл	19					
74	Зп	64					
75	Чт	62					

SUMMARY

As a result of experiments, relation $\frac{E}{e_0-e_{200}}=f(W_{200})$ has been obtained which binds the precipitation evaporation value from the rain gauge not with a vapour pressure deficit as it has already been done, but with the difference of water vapour pressure. Maximal water vapour presure (e_0) is calculated in accordance with the evaporating surface (of precipitation) temperature. A method has been developed for calculation of this temperature to evaluate overheating of the rain guage (Δt) depending on the site width (C°), wind velocity and the season.

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ

1970 *ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА* вып. 7.

IV. ГИДРАВЛИКА СООРУЖЕНИЙ И ОТКРЫТЫХ РУСЕЛ

Н. А. КАРТВЕЛИШВИЛИ

О ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ И ЗАМЫКАНИИ УРАВНЕНИЙ РЕЙНОЛЬДСА ДЛЯ УСТАНОВИВШИХСЯ РУСЛОВЫХ ПОТОКОВ

Введение*

Для решения задачи о движении турбулентного потока в области, ограниченной твердыми стенками и свободными поверхностями, необходимо дополнить систему уравнений Рейнольдса соотношениями, связывающими компоненты тензора пульсации (тензора турбулентных напряжений) с полем усредненных скоростей, т. е. замкнуть эту систему. На возможности решения задачи замыкания могут быть различные взгляды, занимающие то или иное промежуточное место между двумя противоположными (но не альтернативными) точками зрения, которые сводятся к следующему:

1. Связь между компонентами тензора пульсации и полем усредненных скоростей полностью определяется уравнениями гидродинамики, т. е. уравнениями Навье-Стокса и граничными условиями. Пульсация гидродинамических величин есть свойство решений этих уравнений и, следовательно, ее связь с полем усредненных скоростей принципиально должна вытекать из этих уравнений, т. е. компоненты тензора пульсации могут быть получены из уравнений Навье-Стокса чисто математическим путем, без привлечения каких-либо дополнительных физических закономерностей. Если эта точка зрения верна, то ее использование связано только с чисто математическими трудностями. Однако эти трудности должны быть совершенно исключительными и вряд ли их можно преодолеть с помощью имеющегося математического аппарата. Это ясно уже из того, что если пульсация есть следствие уравнений Навье-Стокса, то эти нелинейные уравнения не могут обладать свойством единственности решения в обычном понимании. Уже одно это обстоятельство требует разработки совершенно новых математических путей.

2. Пульсация гидродинамических величин не есть следствие уравнений Навье-Стокса и, следовательно, связь компонентов тензора пульсации с полем усредненных скоростей вытекает из каких-то физических связей, не содержащихся в этих уравнениях (аналогичных соотношениям механики сплошных сред: обобщенному закону Гука, связывающему тензор напряжений упругого тела с тензором деформаций, обобщенному закону Ньютона, связывающему тензор напряжений в ламинарном потоке с тензором скоростей деформации и т. п.). В настоящее время трудно указать эксперимент, который мог бы выявить эти физические связи непосредственно. Значит, необходимо принять какую-то гипотезу об этих связях и проверять ее косвенно, по вытекающим из нее следствиям (такая гипотеза, конечно, не может быть особенно простой, хотя бы уже потому, что она касается достаточно сложного объекта — тензора).

---

* Предположения, высказанные во введении и в первых двух параграфах статьи, выработаны автором совместно с Л. А. Телаксом.

Отдать предпочтение той или иной из этих двух точек зрения можно будет только после того, как детальный математический анализ первой из них приведет к негативным или к позитивным результатам. Но даже в случае позитивного результата, исследования, исходящие из второй точки зрения, очевидно, не будут бесполезными. В случае удачи они эмпирическим путем приведут к зависимостям, которые впоследствии будут уточнены, обобщены и обоснованы строгим математическим анализом. Исходя из этого, мы предпринимаем попытку конструирования гипотезы о связи тензора пульсации с полем усредненных скоростей, оправдываемую соображениями интуитивного характера. Проверка этой гипотезы требует решения на ее основе ряда внутренних задач гидродинамики турбулентного потока и сопоставления результатов с опытными данными. Для построения интересующей нас гипотезы введем прежде всего понятие призматического потока с однородной по периметру шероховатостью.

Призматическим потоком называется поток, в котором линии тока усредненных местных скоростей суть параллельные прямые. Призматические потоки с однородной шероховатостью есть, во-первых, напорные потоки в прямых призматических или цилиндрических трубах с однородной внутренней поверхностью, а, во-вторых, равномерные безнапорные потоки в бесконечно широких прямоугольных руслах с однородной поверхностью дна. Все другие призматические безнапорные потоки, даже при однородном характере смоченной поверхности, не могут быть отнесены к категории потоков с однородной шероховатостью. Причины последнего обстоятельства будут ясны из дальнейшего.

Концепции классической гидравлики в вопросе о сопротивлениях, безусловно, верны для двух видов призматических потоков с однородной шероховатостью: 1) в круглой трубе, 2) в бесконечно широком прямоугольном русле. Эти случаи будут служить в качестве эталонных.

В общем случае непризматического потока необходимо предположить, что существуют две системы касательных напряжений: первая, связанная с шероховатостью границ потока, аналогичная существующей в призматическом потоке, и вторая, зависящая от кривизны линий тока и не связанная с шероховатостью непосредственно. Существование второй системы касательных напряжений вытекает из двух факторов. Во-первых, водоворотные зоны в реках и водохранилищах не могли бы существовать без нее. Если бы ее не было, энергия, диссипирующаяся в этих зонах за счет напряжений, связанных с шероховатостью, не восполнялась бы за счет основного потока, который не мог бы вызывать вращательное движение в этих зонах. Во-вторых, если бы не существовало касательных напряжений, зависящих от кривизны струй, не могло бы существовать и местных потерь напора, не зависящих от шероховатости. Мы рассмотрим здесь сначала призматические потоки, что приведет к некоторым отправным положениям, а затем обратимся к общему случаю непризматического потока. При этом мы будем всюду иметь в виду поток с развитой турбулентностью и пренебрегать вязкими напряжениями.

1. Призматические потоки с однородной по периметру шероховатостью

Основной принцип учения о гидравлическом турбулентном трении выражается известной формулой

$$\frac{T_c}{\gamma} = \frac{V^2}{C_2}, \qquad (1.1)$$

в которой V — средняя по сечению скорость потока, γ — удельный вес жидкости, T_c — среднее касательное напряжение на смоченной поверхности, C — коэффициент Шези. Классическая гидравлика ставит последний в зависимость от гидравлического радиуса потока R и коэффициента шероховатости смоченной поверхности n. Так как, с другой стороны, в силу бесспорных законов механики, $T_c = \gamma RI$, *где* I — гидравлический уклон потока, то из (1.1) вытекает известная формула для расхода $Q = V\omega = K\sqrt{I}$, в которой

$$K = C\omega\sqrt{R} \tag{1.2}$$

есть пропускная способность русла.

Нетрудно заметить, что формула (1.2) при изложенной трактовке коэффициента Шези в некоторых случаях приводит к физически невозможным результатам. Действительно, пусть $K_а$ и $K_б$ — пропускные способности труб, имеющих сечения, представленные соответственно на рис. 1а и б. Если определять C формулой Маннинга, то элементарные

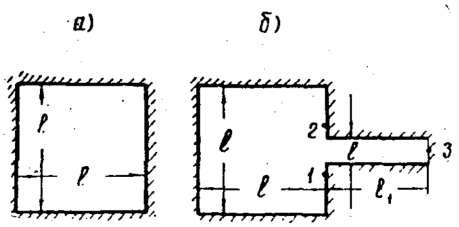


Рис. 1

выкладки приводят к тому, что

$$K_б = \varphi K_а,\quad \varphi = \sqrt[3]{\frac{(1+\alpha\lambda)^5}{\left(1+\frac{\lambda}{2}\right)^2}},\quad \alpha = \frac{b}{l},\quad \lambda = \frac{l_1}{l}.$$

При малых α, т. е. при малых b, будет $\varphi < 1$, т. е. $K_б < K_а$, в то время как физически очевидно, что $K_б > K_а$. Такое противоречие не дает себя знать на практике только потому, что при распространенных в природе и в технике формах сечения потоков оно проявляется слабо. Но тем не менее оно свидетельствует, по крайней мере, о неполноте классических концепций.

Попробуем рассмотреть более детально касательные напряжения в потоке. Гидродинамические уравнения Рейнольдса для несжимаемой вязкой жидкости могут быть записаны в ортогональной системе криволинейных координат x_1, x_2, x_3 с коэффициентами Лямэ H_1, H_2, H_3 в такой форме:

$$\rho\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{1}{H_i}\left\{\sum_{k=1}^{3}\frac{1}{H_1 H_2 H_3}\frac{\partial}{\partial x_k}\left[\frac{H_1 H_2 H_3 H_i}{H_k}(\rho v_i v_k - T_{ik})\right] - \right.$$

$$\left. - \frac{\rho v_k^2 - T_{kk}}{H_k}\frac{\partial H_k}{\partial x_i}\right\} = \rho F_i - \frac{1}{H_i}\frac{\partial p}{\partial x_i},\quad i = 1, 2, 3. \tag{1.3}$$

Здесь v_1, v_2, v_3, p — усредненные по времени компоненты вектора скорости и усредненное давление (символ усреднения для простоты опу-

щен), $T_{ik}=-\rho<v_i' v_k'>+T_{ik}^{(0)}$—полные составляющие тензора напряжений, $T_{ik}^{(0)}$—усредненные составляющие тензора вязких напряжений, v_1', v_2', v_3'—компоненты вектора пульсации, F_1, F_2, F_3 — компоненты ускорения объемных сил. Имея в виду призматический поток, примем за координатные линии x_1 линии тока вектора усредненной скорости, а за координату x_1—расстояния вдоль этих линий. Тогда $\partial/\partial x_1=0$ для всех переменных, кроме давления, $H_1=1$, $v_2=v_3=0$. Для потока в поле силы тяжести

$$\rho F_1-\frac{1}{H_1}\frac{\partial p}{\partial x_1}=-\rho g I=-\gamma I$$

(I — гидравлический уклон) и уравнение (1.3) дает для $i=1$

$$\frac{1}{H_2 H_3}\left[\frac{\partial}{\partial x_2}(H_3 T_{12})+\frac{\partial}{\partial x_3}(H_2 T_{13})\right]=\gamma I. \tag{1.4}$$

Уравнения, получающиеся из (1.3) при $i=2$ и $i=3$, содержат p и определяют отличия закона распределения давления по сечению потока от гидростатического закона. Эти уравнения пока не потребуются.

Координатные линии x_2 и x_3 лежат в плоскости сечения потока. Примем за линии x_2 изотахи, а за линии x_3 — семейство линий, ортогональных изотахам. Это есть траектории вектора градиента скорости v_1, мы их будем называть просто линиями градиента (рис. 2). Рассмотрим напряжение T_{12}, т. е. напряжение, действующее в направлении координатных линий x_1 по площадкам нормальных к координатным линиям x_2. Иначе говоря, T_{12} есть касательное напряжение на цилиндрических поверхностях, для которых линии градиента суть направляющие. Для потока в круглой трубе или в бесконечно широком прямоугольном русле, в силу симметрии

$$\frac{\partial}{\partial x_2}(H_3 T_{12})=0,\quad T_{12}=0. \tag{1.5}$$

Естественно предположить, что соотношения (1.5) имеют место и в общем случае, так как иначе существовали бы силы, приводящие к тому, что на линиях градиента было бы $\partial v_1/\partial x_2\neq 0$, что противоречит физическому смыслу линии градиента. Точно такие же соображения приводят к тому, что $T_{13}=0$ при $x_3=0$, т. е. в точке максимума скорости. Тогда для касательных напряжений T_{13} в направлении линий x_1 по цилиндрическим поверхностям, для которых образующие суть изотахи, получим из (1.4)

$$T_{12}(x_2, x_3)=\frac{\gamma J}{H_2(x_2, x_3)}\int_0^{x_3} H_2(x_2, \xi) H_3(x_2, \xi)\, d\xi. \tag{1.6}$$

Здесь интегрирование выполняется вдоль координатной линии x_3. Для касательного напряжения на смоченной поверхности ($x_3=x_*$) эта формула дает

$$T_{13}(x_1, x_*)=\frac{\gamma I}{H_2(x_2, x_*)}\int_0^{x_*} H_2(x_2, x_3) H_3(x_2, x_3)\, dx_3. \tag{1.7}$$

Выделим двумя бесконечно близкими линиями градиента элемент площади сечения потока (рис. 2). В данном случае это некоторый криволинейный треугольник OAB. Площадь элемента есть

$$\Delta\omega=\int_0^{x_*} H_2(x_2, x_3)\, H_3(x_2, x_3)\, dx_2\, dx_3,$$

а твердая часть его периметра составляет

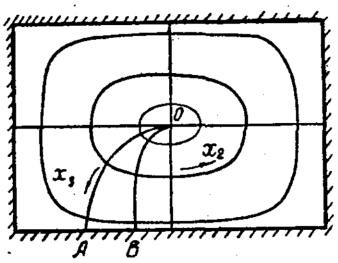


Рис. 2.

$$AB=H_2(x_2, x_*)\,dx_2.$$

Введем длину

$$L=L(x_2)=\frac{\Delta\omega}{AB}=\frac{1}{H_2(x_2,x_*)}\int_0^{x_*}\times$$

$$\times H_2(x_2, x_3)\,H_3(x_2, x_3)\,dx_3$$

и перепишем формулу (1.7) так:

$$T_{13}(x_2, x_*)=\gamma I L(x_2). \qquad (1.8)$$

В случае равномерного потока в бесконечно широком прямоугольном русле глубиной h и в случае потока в круглой трубе радиуса r, длина L равна, соответственно, h и $r/2$, т. е. в обоих этих случаях она совпадает с гидравлическим радиусом R. Средняя же скорость v в элементе совпадает со средней по сечению скоростью V. В потоках с иной формой сечения длина L зависит от x_2 и ее можно рассматривать как обобщение понятия гидравлического радиуса. Это подсказывает следующую гипотезу, по аналогии с (1.1).

$$\frac{T_{13}(x_2,x_*)}{\gamma}=\frac{v^2}{C^2}. \qquad (1.9)$$

Здесь C —коэффициент Шези, рассчитанный по обобщенному гидравлическому радиусу L, т. е. зависящий от x_2. Из (1.8) и (1.9)

$$v=v(x_2)=\frac{\int_0^{x_*} v_1(x_2,x_3)\,H_2(x_2,x_3)\,H_3(x_2,x_3)\,dx_3}{\int_0^{x_*} H_2(x_2,x_3)\,H_3(x_2,x_3)\,dx_3}. \qquad (1.10)$$

Для средней скорости потока при этом получается

$$V=\frac{1}{\omega}\int_\omega v_1\,d\omega=\frac{1}{\omega}\oint v(x_2)\,dx_2\int_1^{x_*} H_2(x_2, x_3)\,H_3(x_2, x_3)\,dx_3=$$

$$=\frac{\sqrt{I}}{\omega}\oint C\sqrt{L}\cdot L\,dx_2\,H_2(x_2, x_*). \qquad (1.11)$$

В этих формулах $\oint$ есть символ интегрирования по замкнутым координатным линиям x_2. Так как $H_2(x_2, x_*)\,dx_2=d\chi$, где $d\chi$ — элемент смоченного периметра потока, то из (1.11) получается следующая формула для пропускной способности:

$$K=\oint C L\sqrt{L}\,d\chi. \qquad (1.12)$$

Эта формула, в отличие от (1.2), ставит пропускную способность в зависимость от распределения скоростей в потоке и, следовательно, в зависимость от формы русла.

2. Призматические потоки с различной по периметру шероховатостью

Рассмотрим теперь потоки, у которых коэффициент шероховатости различен по смоченному периметру. Простейший случай такого рода, который может дать путеводную нить для соответствующего обобщения гипотезы, высказанной в предыдущем параграфе, есть поток в бесконеч-

но широком русле, у которого шероховатость дна неодинакова по различные стороны от точки A на рис. 3а. В бесконечном удалении от этой точки как влево, так и вправо, изотахи будут поэтому прямыми линиями, параллельными дну и свободной поверхности, и коэффициент C в

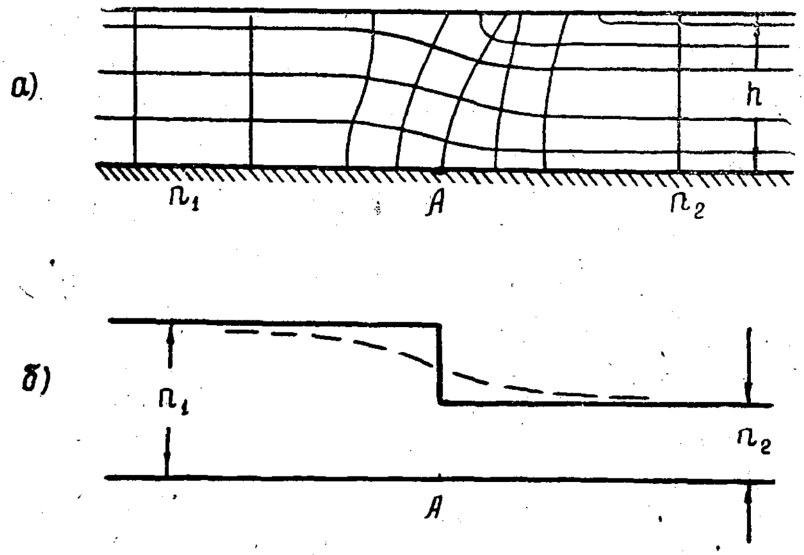


Рис. 3.

бесконечном удалении от точки A должен, очевидно, рассчитываться по обычным формулам гидравлики, например, по формуле Маннинга $C=\frac{1}{n}L^{\frac{1}{6}}$, где $L=h$, а коэффициент шероховатости слева от A будет $n=n_1$, а справа — $n=n_2$. Однако распространить этот принцип на окрестность точки A, очевидно, нельзя. Обобщенный гидравлический радиус L вблизи точки A будет отличен от h, но при движении поперек потока он будет изменяться плавно, в то время как коэффициент шероховатости n при переходе через точку A сделает скачок (рис. 3б). В связи с этим при таком подсчете получится, что средняя скорость v в отсеке между двумя бесконечно близкими линиями градиента по формуле (1.10) также сделает скачок при переходе через точку A, а в действительности такого скачка не может быть. Чтобы обойти это противоречие, можно предположить, что в формулу (1. 12) следует ввести некоторый действующий коэффициент шероховатости, изменяющийся поперек потока по плавной пунктирной кривой так, что его значения асимптотически приближаются соответственно к n_1 или n_2 при отдалении от точки A. Если дно состоит из нескольких полос постоянной ширины с различной шероховатостью, ориентированных по течению, то действующий коэффициент шероховатости также будет изменяться по некоторой плавной кривой. На рис. 4 дана общая картина для случая трех полос; по мере уширения средней полосы ординаты пунктирной кривой в некотором отдалении от краев полосы будут все ближе и ближе к ординатам графика фактического коэффициента шероховатости. Иными словами, следует предположить, что действующий коэффициент шероховатости n_* при любом фиксировании значении $\xi=x$ (рис. 4) зависит от фактического коэффициента шероховатости n при всех остальных значениях ξ. Но при этом влияние фактического коэффициента шероховатости в

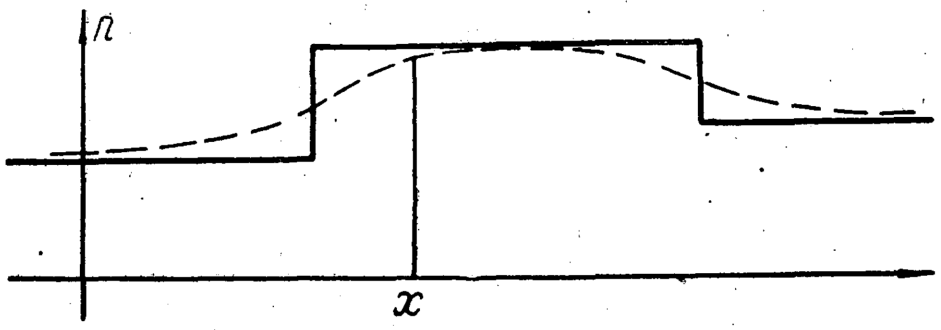


Рис. 4.

точке ξ на действующий коэффициент в точке x уменьшается с увеличением расстояния $|x-\xi|$ между этими точками. Такая связь между функциями $n_*(x)$ и $n(\xi)$ может быть передана, например, зависимостью

$$n_*(x)=\frac{1}{A\sqrt{\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} n(\xi)\exp\left\{-\left(\frac{x-\xi}{A}\right)^2\right\}d\xi. \qquad (2.1)$$

Здесь A — некоторая постоянная, имеющая размерность длины, об определении которой будет сказано ниже. При $n(\xi)=const$ эта формула дает $n_*=n$, как и должно быть.

Обратимся теперь к напорным потокам с сечением конечных размеров и с различной по периметру шероховатостью. Под x здесь будет пониматься расстояние χ по периметру сечения от некоторой фиксированной точки в определенном направлении. При этом χ считается положительным при таком движении от этой фиксированной точки, когда сечение остается слева. Обходить контур сечения в ту и другую сторону можно неограниченное число раз, поэтому χ (или ξ) можно считать изменяющимся от $-\infty$, до ∞, а $n(\chi)$ — периодической функцией χ с периодом, равным периметру сечения χ_0. Введем понятие выпуклого сечения, т. е. сечения, две любых точки которого можно соединить прямой, нигде не пересекающей периметра. Очевидно, что всякое выпуклое сечение есть односвязная область (но обратное, конечно, неверно).

Для действующего коэффициента шероховатости выпуклых сечений можно принять (2.1) как формулу, подлежащую экспериментальной проверке. Для сечений невыпуклых эта формула может оказаться неверной, что ясно из самых простых соображений. В частности, очевидно, что влияние на действующий коэффициент шероховатости в точке 2 на рис. 1б фактического коэффициента в точке 1 может быть значительно сильнее влияния фактического коэффициента в точке 3, в то время как формула (2.1) будет давать прямо противоположный результат. Иными словами, для невыпуклых сечений явление передается более сложной зависимостью, чем формула (2.1)

Поток со свободной поверхностью, фактический коэффициент шероховатости которой можно считать равным нулю, следует рассматривать как поток с неодинаковой по периметру шероховатостью. Из формулы (2.1) видно, что действующий коэффициент шероховатости свободной поверхности в противоположность фактическому всегда отличен от нуля. Этим и объясняется то, что свободную поверхность нельзя рассматривать как плоскость симметрии напорного потока, что очень часто пытаются делать. Этим объясняется, в частности, и то, почему максимум скорости потока лежит ниже свободной поверхности. Это принципиаль-

ное заключение оказывается, таким образом, простым следствием непрерывности поля усредненных скоростей.

3. Непризматические потоки

Попробуем обобщить высказанную в предыдущих параграфах гипотезу на непризматические потоки, имея в виду при этом не только касательные напряжения, а все компоненты тензора турбулентных напряжений (тензора пульсации), вызванные как шероховатостью дна и стенок потока (первая система), так и кривизной линий тока (вторая система).

В призматическом потоке действует только первая система напряжений, связанная, согласно предположениям предыдущего параграфа, с линиями тока вектора v и ортогональными к ним траекториями градиента нормы $\| v \|$ этого вектора. Попробуем найти соответствующее обобщение понятия линий градиента для непризматического потока, сохраняя требование ортогональности к линиям тока v. В непризматическом потоке

$$\| v \| = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2} \tag{3.1}$$

и траектории $grad\ \|v\|$ в общем случае не ортогональны линиям тока v. Рассмотрим элементарную площадку Ω, нормальную к линии тока. Нетрудно найти, что направление, определяемое уравнениями

$$\begin{aligned} &\frac{dx_1}{A_1(v_2^2+v_3^2)-v_1(A_2 v_2 + A_3 v_3)} = \\ &= \frac{dx_2}{A_2(v_3^2+v_1^2)-v_2(A_3 v_3+A_1 v_1)} = \\ &= \frac{dx_3}{A_3(v_1^2+v_2^2)-v_3(A_1 v_1+A_2 v_2)}, \end{aligned} \tag{3.2}$$

есть направление наибольшего среди всех направлений на площадке Ω изменения $\|v\|$. В уравнениях (3. 2)

$$A_i = v_1 \frac{\partial v_1}{\partial x_i} + v_2 \frac{\partial v_2}{\partial x_i} + v_3 \frac{\partial v_3}{\partial x_i}. \tag{3.3}$$

Эти уравнения можно рассматривать как дифференциальные уравнения семейства некоторых кривых, которые мы будем называть кривыми Γ. Кривая Γ обладает тем свойством, что касательная к ней дает направление наибольшего изменения $\|v\|$ среди всех кривых, ортогональных к линиям тока v. В частном случае призматического потока кривые Γ отображаются в траектории $grad\ \|v\|$. В точках максимума $\|v\|$ направление кривых Γ не определено. Эти точки образуют динамическую ось потока. В общем случае динамических осей может быть несколько.

Примем следующее предположение. Касательные напряжения гидравлического трения по площадке, которая является спрямляющей для линий тока вектора v и кривых Γ, равны нулю, т. е. эта площадка есть одна из главных площадок. Касательное напряжение T' на площадках, ортогональных к кривым Γ, направлено по касательной к линии тока и и является одним из главных касательных напряжений первой системы. На стенке потока, в конце линии Γ, это касательное напряжение определяется, как и в призматическом потоке, формулой $T'/\gamma \cdot v^2/C^2$. Здесь

$$V = \lim_{\Delta p \to 0} \frac{1}{\Delta\omega} \int_{\Delta\omega} (vn)\, d\omega, \tag{3.4}$$

интеграл берется по площадке $\Delta\omega$ между кривыми Γ, исходящими из одной и той же точки динамической оси, n — орт нормали к площадке, Δp — расстояние между кривыми Γ по смоченной поверхности потока, а C — коэффициент Шези, рассчитанный по обобщенному гидравлическому радиусу $L=\lim\limits_{\Delta p\to 0}\Delta\omega/\Delta p$ и действующему коэффициенту шероховатости. Гипотеза о распределении касательных напряжений T' в толще потока может быть получена путем обобщения соответствующих гипотез для потоков в круглых трубах и прямоугольных руслах бесконечной ширины. Если в последнем случае принять степенное распределение скоростей

$$v = v_m\left(1-\frac{h}{H}\right)^{1/m} \tag{3.5}$$

(v — скорость на глубине h, v_m — скорость на поверхности, H — полная глубина потока), то для касательных напряжений легко получить такую зависимость:

$$\frac{T'}{\gamma}=\frac{V^2}{C^2}\left[1-k\left(\frac{v}{V}\right)^m\right],\ k=\left(\frac{m}{m+1}\right)^m. \tag{3.6}$$

Эту зависимость естественно распространить и на непризматические потоки, определяя обобщенный гидравлический радиус L по линии Γ, проходящей через рассматриваемую точку потока.

Для второй системы напряжений, вызванной кривизной линий тока, естественно предположить, что площадка, соприкасающаяся с линией тока v, будет одной из главных площадок, а напряжение, действующее по спрямляющей площадке,— одним из главных касательных напряжений. Это напряжение T'' должно быть пропорционально v^2, поскольку местные потери напора пропорциональны квадрату скорости. Оно должно быть пропорционально кривизне линии тока $1/|R|$, ибо оно стремится к нулю с уменьшением кривизны, т. е. при $|R|\to\infty$. Учитывая сказанное и привлекая соображения размерности, нетрудно прийти к выводу, что

$$T''=\varepsilon\gamma\lambda\frac{v^2}{g|R|}, \tag{3.7}$$

где ε — безразмерная постоянная, g — ускорение силы тяжести, а λ — некоторая длина, к рассмотрению которой мы еще вернемся ниже.

Рассматривая поток в окрестности некоторой фиксированной точки O, введем локальную систему координат y_1, y_2, y_3, направив ось y_1 по касательной к линии тока v, а ось y_3 — по касательной к кривой Γ. Напряженное состояние в точке O, вызванное гидравлическим трением, представлено на рис. 5. В соответствии со сказанным выше, T' — главное касательное напряжение, S'_1, S'_2, S'_3 — главные нормальные напряжения, причем S'_1 и S'_3 действуют по площадкам, нормальным к плоскости y_1Oy_3 и наклоненным под углом 45° и 135° к оси y_1.

Обратимся теперь к другой системе: y_1, z_2, z_3, направив ось z_2 по главной нормали, а ось z_3 — по бинормали к линии тока. Напряженное состояние в точке O, вызванное кривизной струй (вторая система), представлено на рис. 6.

Обозначим через W_i компонент скорости пульсации по оси y_i, и далее

$$S'=\frac{S'_1+S'_3}{2},\quad S''=\frac{S''_1+S''_2}{2}.$$

В случае призматического потока

$$S'=-\rho\langle u_3' u_3'\rangle=-\rho\langle u_1' u_1'\rangle,\quad S_2'=-\rho\langle u_2' u_2'\rangle$$

обычное для гидравлики предположение (например, при подсчете полного количества движения потока) состоит в том, что члены такого рода пропорциональны квадрату усредненной скорости. Это дает основание принять, что в общем случае непризматического потока будет

$$S'=-c_1\rho v^2,\quad S_2'=-c_2\rho v^2, \tag{3.8}$$

где c_1 и c_2 — некоторые безразмерные постоянные. Нормальное напряжение S'' второй системы естественно связать с центробежным ускорением, так же, как это было сделано для касательного напряжения T'', т. е. принять

$$S''=-\varepsilon_1\gamma\lambda\frac{v^2}{g|R|}, \tag{3.9}$$

где ε_1 — безразмерная постоянная. Нормальное же напряжение S_3'' не может быть связано с кривизной линии тока. Если бы такая связь была, то нужно было бы предположить, что в том случае, когда линия тока есть плоская кривая, центробежное ускорение вызывает напряжения, действующие нормально к плоскости линии тока, а такое предположение совершенно неестественно. Напряжение S_3'' может быть связано (кроме скорости v) только с кручением $\varkappa$ линии тока, и для него естественно принять

$$S_3''=-\varepsilon_2\gamma\lambda|\varkappa|v^2, \tag{3.10}$$

где ε_2 — безразмерная постоянная.

Введем следующие обозначения для косинусов углов между осями y_1, y_2, y_3, z_2, z_3 и осями единой для всего потока системы координат x_1, x_2, x_3:

	y_1	y_2	y_3	z_2	z_3
x_1	α_{11}	α_{12}	α_{13}	β_{12}	β_{13}
x_2	α_{21}	α_{22}	α_{23}	β_{22}	β_{23}
x_3	α_{31}	α_{32}	α_{33}	β_{32}	β_{33}

С помощью элементарных формул теории векторного поля и дифференциальной геометрии нетрудно вычислить:

$$\alpha_{i1}=\frac{v_i}{\|v\|},\quad \alpha_{i2}=\frac{a_i}{\|a\|},\quad \alpha_{i3}=\frac{\varepsilon_i}{\|\varepsilon\|}$$

$$a_1=A_2v_3-A_2v_2,\quad a_2=A_3v_1-A_1v_3,\quad a_3=A_1v_2-A_2v_1$$

$$\varepsilon_1=A_1(v_2^2+v_3^2)-v_1(A_2v_2+A_3v_3)$$

$$\varepsilon_2=A_2(v_3^2+v_1^2)-v_2(A_3v_3+A_1v_1)$$

$$\varepsilon_3=A_3(v_1^2+v_2^2)-v_3(A_1v_1+A_2v_2)$$

$$\|a\|=\sqrt{a_1^2+a_2^2+a_3^2},\quad \|\varepsilon\|=\sqrt{\varepsilon_1^2+\varepsilon_2^2+\varepsilon_3^2}$$

$$\beta_{i2}=\frac{v_i}{\|v\|},\quad \beta_{i3}=\frac{c_i}{\|c\|},\quad v_i=v_1\frac{\partial v_i}{\partial x_1}+v_2\frac{\partial v_i}{\partial x_2}+v_3\frac{\partial v_i}{\partial x_3}$$

$$c_1 = v_2\dot{v}_3 - \dot{v}_2 v_3,\quad c_2 = v_3\dot{v}_1 - \dot{v}_3 v_1,\quad c_3 = v_1\dot{v}_2 - \dot{v}_1 v_2$$

$$\|\dot{v}\| = \sqrt{\dot{v}_1^2 + \dot{v}_2^2 + \dot{v}_3^2},\quad \|c\| = \sqrt{c_1^2 + c_2^2 + c_3^2}$$

$$|R| = \frac{\sqrt{\{\|v\|\}^3}}{\|c\|},\quad \varkappa = \frac{1}{\|v\|_1}\begin{vmatrix} v_1 & v_2 & v_3 \\ \dot{v}_1 & \dot{v}_2 & \dot{v}_3 \\ \ddot{v}_1 & \ddot{v}_2 & \ddot{v}_3 \end{vmatrix},\quad \ddot{v} = \sum_{k=1}^{3}\left(\dot{v}_k\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + v_k\frac{\partial \dot{v}_i}{\partial x_k}\right).$$

Обозначим через $\tau_{ik} = -\rho\langle v_i' v_k'\rangle$ напряжение по площадке нормальной к оси x_k в направлении оси x_i. Здесь v_i' и v_k' — компоненты вектора скорости пульсации по осям x_i и x_k. Используя формулу преобразования компонентов тензора при переходе от одной системы координат к другой и рис. 5 и 6, легко найти

$$\tau_{ik} = (\alpha_{1i}\alpha_{1k} + \alpha_{3i}\alpha_{3k})S' + (\alpha_{2i}\alpha_{2k}S_2' + \alpha_{1i}\alpha_{3k} + \alpha_{3k}\alpha_{1i})T' +$$
$$+ (\beta_{1i}\beta_{1k} + \beta_{2i}\beta_{2k})S'' + (\beta_{3i}\beta_{3k}S_3'' + \beta_{1i}\beta_{2k} + \beta_{2i}\beta_{2k})T''. \qquad (3\cdot 11)$$

Таким образом, напряженное состояние в потоке определено полностью; с точностью до значений величин ε, ε_1, ε_2, c_1, c_2, λ.

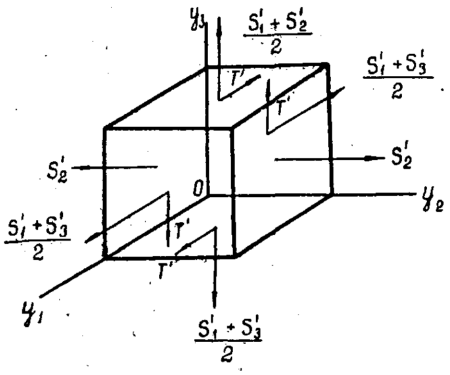


Рис. 5.

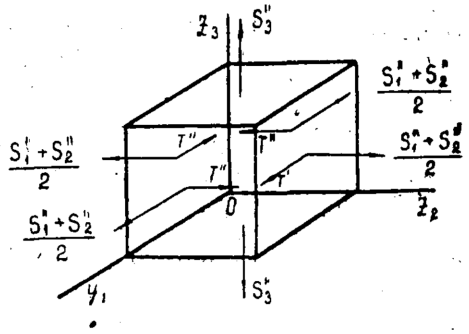


Рис 6.

Длина λ должна характеризовать масштабы потока, как это очевидно из принципа подобия. С другой стороны, она должна быть локальной характеристикой, т. е. не связанной с потоком в целом. Этим двум условиям удовлетворяет обобщенный гидравлический радиус L. Примем поэтому $\lambda = L$. Коэффициенты c_1 и c_2 можно оценить исходя из того, что они, в конечном счете, определяют изменение количества движения потока за счет пульсаций. По оценке, принятой в гидравлике для этого изменения, должно быть $c_1 + c_2 \cong 0{,}04$, т. е. можно принять $c_1 = c_2 \cong 0{,}02$. Значительно сложнее определение коэффициентов ε, ε_1, ε_2, которые могут быть найдены сопоставлением теоретических решений с опытными данными. В частности, коэффициент ε может быть найден, по-видимому, из данных теории плоского гидравлического прыжка и относящихся к нему экспериментов.

SUMMARY

A hypothesis is suggested which allows to express components of pulsation tensor through elements of the field of averaged local velocities for prismatic and non-prismatic flows.

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
1970 *ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА* вып. 7.

Н. А. КАРТВЕЛИШВИЛИ

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ БЕЗВОЛНОВОГО ТЕЧЕНИЯ НА БЫСТРОТОКАХ

1. О коррективе количества движения

Подробный вывод критерия устойчивости установившегося равномерного течения в призматическом русле, т. е. условия, при выполнении которого исключается самопроизвольное возникновение бегущих волн, имеется в [1]. Этот критерий записывается так:

$$\frac{1}{\lambda^2} > \omega^2 = \mu^2 - 2\alpha\mu + \alpha \qquad (1.1)$$

$$\lambda^2 = \frac{B Q^2}{g F^3}, \quad \mu = \frac{F K'}{BK}, \quad K' = \frac{\partial K}{\partial H}.$$

Здесь α — полный корректив количества движения, учитывающий как неравномерность распределения по сечению усредненных локальных скоростей, так и пульсацию мгновенных скоростей; остальные же обозначения — общепринятые. Корректив α Е. П. Федоров [2], следуя Е. Я. Минскому, выражает формулой.

$$\alpha = 2\alpha_* - 1, \qquad 1.2$$

в которой α_* — корректив количества движения, учитывающий только неравномерность распределения по сечению потока усредненных локальных скоростей. Величину α_* Е. П. Федоров определял по изотахам, на основании натурных наблюдений по 30 быстротокам. Распределение полученных им значений α по количеству случаев, в которых эти значения наблюдались, дано на рис. 1. Е. П. Федоров отмечает, что по самой природе измерений на быстротоках (особенно при наличии волн), эти измерения, а значит, и рассчитанные по ним значения α_*, не могут быть

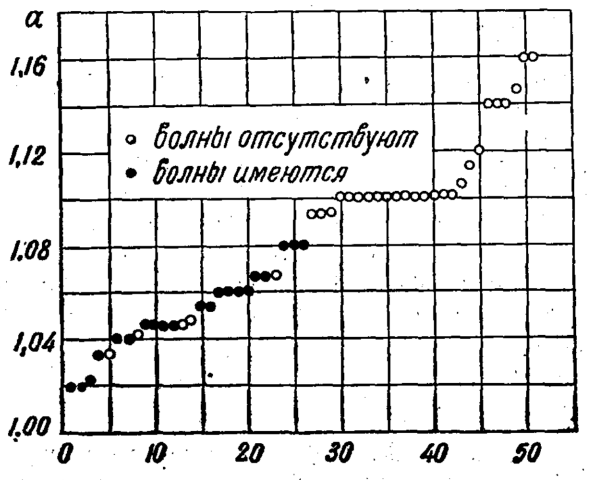


Рис. 1

особенно точными. К этому необходимо добавить, что, по-видимому, полученные Е. П. Федоровым значения α несколько преуменьшены: измерения поля скоростей в строго призматических потоках указывают [3], что даже в этих потоках всегда имеется поперечная циркуляция (исключение составляют лишь круглые трубы, работающие полным сечением), влияние которой на величину α не учитывалось ни Е. П. Федоровым, ни кем-либо другим. Но тем не менее критерий (1. 1) при значениях α, принятых Е. П. Федоровым, хорошо согласуется с натурными наблюдениями. В тех же немногих случаях, когда этот критерий приводит к результатам, расходящимся с действительностью, он дает более пессимистическую оценку устойчивости, а это как раз и можно объяснить преуменьшением α: из критерия (1. 1) видно, что увеличение α способствует устойчивости, как это неоднократно подчеркивалось в литературе. Таким образом, данные Е. П. Федорова можно принять как осторожные.

Правая часть критерия (1. 1), т. е. ω^2 есть величина отрицательная при

$$\alpha+\sqrt{\alpha^2-\alpha}>\mu>\alpha-\sqrt{\alpha^2-\alpha}. \qquad (1.3)$$

Если μ лежит в этом диапазоне, то волн на быстротоке не будет ни при каких значениях λ. Верхняя и нижняя границы по условию (1. 3) даны на рис. 2.

Возникает естественный вопрос: какое же именно значение α следует рекомендовать для проектирования быстротоков. Самым правильным было бы, конечно, установить зависимость α от формы и наполнения русла и пользоваться этой зависимостью. Но для этого необходимы надежные данные о распределении скоростей по сечению потока. В этом направлении имеются некоторые предложения [4,5], требующие, однако, постановки дополнительных исследований.

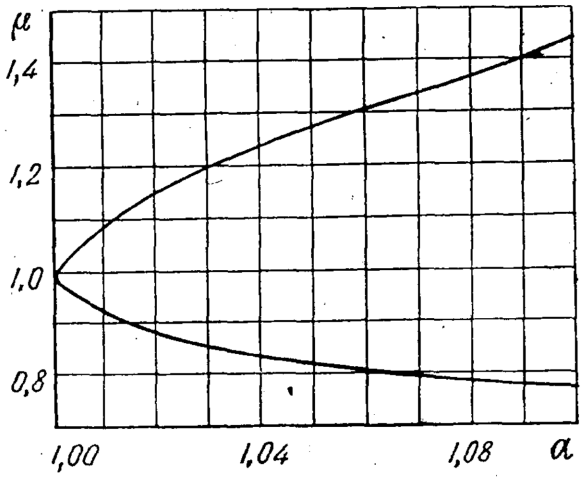


Рис. 2.

Сейчас мы не располагаем результатами таких исследований и поэтому не остается ничего иного, как принять для α преуменьшенные достаточно осторожные значения. Наиболее осторожное из них есть $\alpha=1$. Но, как следует из данных Е. П. Федорова, это значение заведомо дает излишний запас. Из этих же данных видно, что α тем больше, чем ближе профиль русла к безволновому. А так как при проектировании быстротоков следует применять именно эти профили, то, как видно из рис. 1, достаточно осторожны значения $\alpha=1{,}06\div1{,}08$. Надо полагать, что если при этих значениях α критерий (1. 1) будет удовлетворен, то фактическое значение α больше принятого и, следовательно, в действительности критерий (1. 1) удовлетворяется с бо́льшим запасом. Для остальных случаев можно, по-видимому, принимать $\alpha=1{,}02$.

2. Призматические русла некоторых конкретных форм

Критерий (1. 1) для дальнейшего удобно записать в виде:

$$\lambda < \frac{1}{\omega}. \tag{2·1}$$

При такой записи диапазону (1. 3) значений μ будут соответствовать мнимые значения правой части критерия (2. 1). Имея $Q = K\sqrt{I}$, где I — уклон русла, и, выражая коэффициент Шези формулой Маннинга, легко привести критерий (2. 1) к виду

$$\frac{1}{n}\sqrt{\frac{I}{g}} = \frac{1}{\omega}\sqrt[3]{\frac{\chi}{B}}, \tag{2·2}$$

причем

$$\mu = 1 + \frac{2}{3}\left(1 - \frac{F}{B\chi}\frac{d\chi}{dH}\right). \tag{2·3}$$

Здесь χ — смоченный периметр русла. Для трапецеидальних русел в [1] имеются таблицы, облегчающие использование критерия (2. 1). В данном параграфе рассматриваются русла некоторых иных профилей.

1. Очень широкое прямоугольное русло $H/B \to 0$. В этом случае $\mu = 5/3$ и критерий (2. 1) приводится к виду

$$\frac{H^{1/6}}{n}\sqrt{\frac{I}{g}} < \frac{3}{\sqrt{25 - 21\alpha}}. \tag{2·4}$$

Отсюда легко усмотреть, что форсировка расхода, т. е. увеличение глубины H в практически реальном диапазоне, приводит к нарушению устойчивости даже при $\alpha = 1{,}08$.

2. Очень узкое прямоугольное русло $B/H \to 0$. Как легко проверить $\mu = 1$ и, следовательно, согласно рис. 2, возникновение волн не может иметь места ни при каких наполнениях (значительно превосходящих ширину русла).

3. Треугольное русло с любым заложением откосов. Для всех треугольных русел $\mu = 4/3 = 1{,}333$ и, согласно рис. 2, волны не будут иметь места ни при каких H, если $\alpha > 1{,}068$. Это последнее условие для треугольных русел, по-видимому, всегда выполняется. Поэтому треугольное русло можно считать практически абсолютно безволновым (т. е. руслом, в котором образование волн исключено при любых расходах).

4. Параболическое русло, в котором ширина зеркала и глубина связаны соотношением $B^2 = 8pH$ (p — параметр параболы, т. е. расстояние от ее фокуса до директриссы). В этом случае, полагая $\eta = H/p$, имеем

$$\mu = \frac{1}{3}\left\{5 - \frac{4}{3\left[1 + \frac{\ln\left(\sqrt{2\eta} + \sqrt{1+2\eta}\right)}{\sqrt{2\eta(1+2\eta)}}\right]}\right\}, \tag{2·5}$$

что дает $\mu = 13/9 = 1{,}444$ при $\eta = 0$ и $\mu \to 11/9 = 1{,}222$ при $\eta \to \infty$. Критерий же (2. 1) записывается так:

$$\frac{p^{1/6}}{n}\sqrt{\frac{I}{g}} < \Psi(\eta\alpha) = \frac{1}{2}\sqrt[6]{\frac{3}{2}}\frac{\eta^{-3/2}}{\omega}\left[\sqrt{2\eta(1+2\eta)} + \ln\left(\sqrt{2\eta} + \sqrt{1+2\eta}\right)\right]. \tag{2·6}$$

Из рис. 2 видно, что при каждом $\alpha > 1{,}03$ существует такое $\eta = \eta_*(\alpha)$, что при $\eta > \eta_*$ функция ω^2 становится и с дальнейшим увеличением η остается отрицательной, т. е. устойчивость обеспечивается при любых p, n, I. Правая часть критерия (2.6.) при этом становится мнимой. Пря-

мые $\eta=\eta_*$ суть асимптоты кривых $\psi(\eta, \alpha)$, представленных на рис. 3.

5. Русло с круговым профилем радиуса r. Для такого русла

$$\mu=\frac{1}{3}\left(5-\frac{1-\frac{\sin 2\varphi}{2\varphi}}{\sin^2\varphi}\right), \quad (2.7)$$

а критерий (2. 1) приводится к виду

$$\frac{r^{1/6}}{n}\sqrt{\frac{I}{g}}<\Phi(\varphi,\alpha)=$$

$$=\frac{2^{1/6}}{\omega}\left(\frac{\varphi}{\sin\varphi}\right)^{1/2}\left(1-\frac{\sin 2\varphi}{2\varphi}\right)^{-1/6}. \quad (2.8)$$

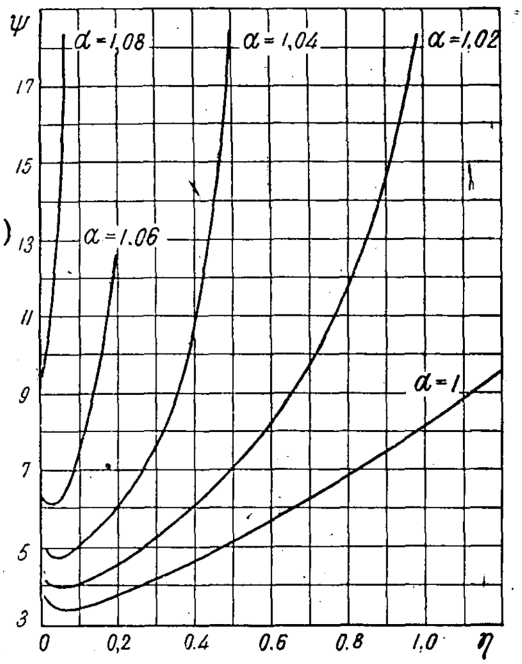


Рис. 3.

В этих формулах φ — угол между вертикалью и радиусом, соединяющим центр круга с урезом воды. При $\varphi=0$ из (2.7) получается $\mu=13/9=1{,}444$, что, как и следовало ожидать, совпадает с соответствующим значением для параболического русла. С увеличением φ параметр μ монотонно уменьшается и при $\varphi=\pi$, т. е. при полном наполнении русла, принимает значение $\mu=-\infty$ С точки зрения проектирования быстротоков зона $\varphi>\frac{\pi}{2}$ (а тем более, наполнения, близкие к полным) не представляет, конечно, никакого интереса. Но она имеет значение в связи с тем, что анализ критерия устойчивости для этой зоны лишний раз указывает на неприменимость формул классической гидравлики к замкнутым сечениям при наполнениях, близких к полным. Действительно, то обстоятельство, что μ становится отрицательным, когда угол φ приближается к π, вызвано тем известным фактом, что, согласно формулам гидравлики, максимум пропускной способности K круглого сечения наступает при наполнении русла меньшем, чем полное. Когда наполнение превышает то значение, при котором K имеет максимум, производная $\partial K/\partial H$ отрицательна. Такой характер изменения μ и рис. 2 объясняют вид кривых Φ на рис. 4. При увеличении φ и падении μ эти кривые, в соответствии с рис. 2, указывают на наличие безволновой зоны, за которой (т. е. при дальнейшем увеличении φ) лежит спадающая ветвь кривой Φ. Так как $\Phi=0$ при $\varphi=\pi$ (при любом α), то наличие этой спадающей ветви означает, что с приближением к полному наполнению волны должны возникать при любых r, n, и I. Другими словами, все безнапорные тоннели должны захлебываться при достаточно больших наполнениях. Однако ни практикой эксплуатации безнапорных тоннелей, ни лабораторными опытами этот вывод не подтверждается, что и дает еще одно основание для пересмотра формул гидравлики в аспекте их применимости к замкнутым сечениям.

Для удобства пользования критериями (2. 6) и (2. 8) здесь приводятся таблицы функций $\Psi(\eta, \alpha)$ и $\Phi(\varphi, \alpha)$.

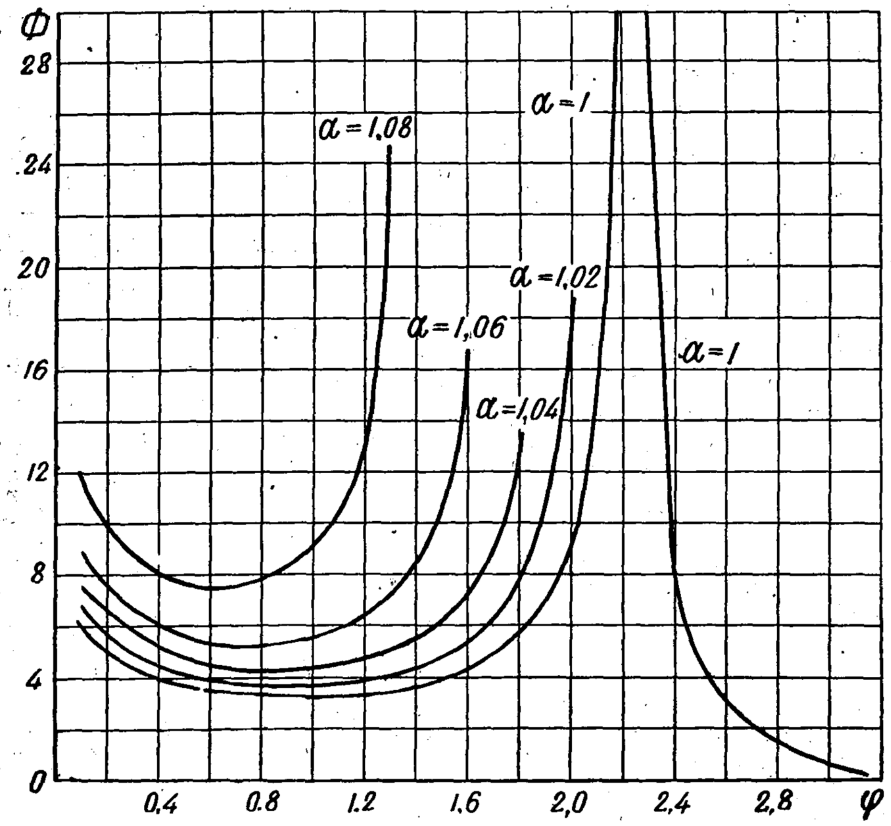


Рис. 4.

3. Непризматические русла

Метод, которым был установлен критерий устойчивости (1. 1) для равномерного течения в призматическом русле, требует, чтобы уравнения возмущенного движения были уравнениями с постоянными коэффициентами. В случае непризматического русла коэффициенты уравнений возмущенного движения переменны и поэтому здесь приходится использовать иной метод.

Общие уравнения неустановившегося одноразмерного движения записываются так:

$$I-\frac{\partial H}{\partial x}=\frac{Q^2}{K^2}+\alpha\frac{U}{g}\frac{\partial U}{\partial x}+\frac{1}{g}\frac{\partial U}{\partial t}-\frac{\alpha-1}{g}\frac{U}{F}\frac{\partial F}{\partial t}+\Omega \qquad (3.1)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=0. \qquad (3.2)$$

Через Ω здесь обозначена совокупность членов, содержащих производные высших порядков, остальные обозначения — общепринятые. Члены, входящие в Ω, отражают действие сил, связанных с перемещениями и искривлением свободной поверхности потока. В [1] показано, что в случае призматического потока эти члены не влияют на устойчивость. Это дает основание предположить, что в случае непризматического потока они также либо не влияют на устойчивость, либо влияют слабо. Хотя они не создают каких-либо принципиальных затруднений в исследовании устойчивости, но приводят к исключительно громоздким выкладкам.

В данной работе мы не будем учитывать эти члены. Отбрасывая величину Ω в (3, 1), можно привести систему (3. 1) и (3. 2) к виду

$$I-\left(1-\alpha\frac{BQ^2}{gF^3}\right)\frac{\partial H}{\partial x}=\left(\frac{1}{K^2}-\frac{\alpha}{gF^3}\frac{\partial F}{\partial x}\right)Q^2+2\frac{\alpha Q}{gF^2}\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{1}{gF}\frac{\partial Q}{\partial t} \tag{3.3}$$

$$B\frac{\partial H}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=0. \tag{3.4}$$

Из (3. 3) видно, что уравнение невозмущенного установившегося движения есть

$$I-\left(1-\alpha\frac{B_0 Q_0^2}{gF_0^3}\right)\frac{dH_0}{dx}=\left(\frac{1}{K_0^2}-\frac{\alpha}{gF^3}\frac{\partial F_0}{\partial x}\right)Q_0^2. \tag{3.5}$$

Рассматривая малые возмущения с малыми производными, положим $H=H_0+\Delta H$, $Q=Q_0+\Delta Q$ и отбросим в (3. 3) и (3. 4) высшие степени и произведения ΔH, ΔQ и их производных. Используя далее уравнение (3. 5), придем к следующим уравнениям возмущенного движения:

$$2\left(I-\frac{\partial H}{\partial x}\right)\frac{\Delta Q}{Q}+2\frac{\alpha Q}{gF^2}\frac{\partial\Delta Q}{\partial x}+\frac{1}{gF}\frac{\partial\Delta Q}{\partial t}+\left(1-\alpha\frac{BQ^2}{gF^3}\right)\frac{\partial\Delta H}{\partial x}-\left\{Q^2\left[\frac{2}{K^3}\frac{\partial K}{\partial H}-\right.\right. \tag{3.6}$$

$$\left.\left.-\frac{\alpha}{gF^3}\left(3\frac{B}{F}\frac{\partial F}{\partial x}-\frac{\partial B}{\partial x}\right)\right]-\alpha\frac{BQ^2}{gF^3}\left(3\frac{B}{F}-\frac{1}{B}\frac{\partial B}{\partial H}\right)\frac{\partial H}{\partial x}\right\}\Delta H=0$$

$$B\frac{\partial\Delta H}{\partial t}+\frac{\partial\Delta Q}{\partial x}=0. \tag{3.7}$$

В этих уравнениях индекс нуль при H, Q, F и т. д. для простоты опущен. Во избежание недоразумений следует заметить, что производные $\partial F/\partial x$ и $\partial B/\partial x$ здесь и всюду ниже берутся при постоянной глубине H, которая в невозмущенном движении отвечает данному x.

Из (3. 7) видно, что существует такая функция $\Phi(x, t)$, для которой

$$\Delta Q=\frac{\partial\Phi}{\partial t},\quad \Delta H=-\frac{1}{B}\frac{\partial\Phi}{\partial x}. \tag{3.8}$$

Подставляя ΔQ и ΔH из (3. 8) в (3. 6), придем к уравнению

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2}+p_1(x)\frac{\partial\Phi}{\partial t}+2\alpha U\frac{\partial^2\Phi}{\partial t\,\partial x}+p_2(x)\frac{\partial\Phi}{\partial x}+p_3(x)\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2}=0, \tag{3.9}$$

в котором

$$p_1(x)=\frac{2g}{U}\left(I-\frac{\partial H}{\partial x}\right),\quad p_3(x)=W^2(\alpha\lambda^2-1),\quad W=\sqrt{\frac{gF}{B}}$$

$$p_2(x)=W^2\left\{U^2\left[\frac{2BF\mu}{K^2}-\frac{\alpha}{W^2}\left(\frac{3}{F}\frac{\partial F}{\partial x}-\frac{1}{B}\frac{\partial B}{\partial x}\right)\right]-\right.$$

$$\left.-\alpha\lambda^2\left(3\frac{B}{F}-\frac{1}{B}\frac{\partial B}{\partial H}\right)\frac{\partial H}{\partial x}+(\alpha\lambda^2-1)\frac{1}{B}\frac{\partial B}{\partial x}\right\},$$

а λ и μ определяются теми же формулами, что и в (1. 1), но теперь это, конечно, будут не постоянные величины, а функции x.

Пусть при $x=0$ имеет место гармоническое возмущение с угловой частотой ω, тогда решением уравнения (3. 9) будет

$$\Phi(x,t)=\varphi(x)\cos\omega t+\psi(x)\sin\omega t. \tag{3.10}$$

Из (3. 10) и (3. 9) следует:

$$\left.\begin{aligned}&-\omega^2\psi+\omega p_1\psi+2\omega\alpha U\psi'+p_2\varphi'+p_3\varphi''=0\\&-\omega^2\psi-\omega p_1\varphi+2\omega\alpha U\varphi'+p_2\psi'+p_3\psi''=0\end{aligned}\right\}, \tag{3.11}$$

где штрихи обозначают дифференцирование по x. Из (3. 10) видно, что квадрат амплитуды волны в сечении с абсциссой x есть $\varphi^2+\psi^2$ и что, следовательно, волна затухает при своем перемещении вниз по руслу, если

$$\varphi\varphi'+\psi\psi'<0. \tag{3.12}$$

Рассмотрим граничный случай, когда волна не затухает и не нарастает, т. е. когда неравенство (3. 12) заменяется равенством

$$\varphi\varphi'+\psi\psi'=0. \tag{3.13}$$

Выясним, каким условиям должны удовлетворять функции p_1, p_2, p_3, U, для того, чтобы имело место равенство (3. 13). Из этого равенства следует

$$\frac{\varphi'}{\psi}=-\frac{\psi'}{\varphi}=\rho(x), \tag{3.14}$$

где $\rho(x)$ — некоторая неизвестная функция. Из (3. 14) получается

$$\varphi'+\psi'=-\rho(\varphi-\psi),\quad \varphi'-\psi'=\rho(\varphi+\psi). \tag{3.15}$$

Складывая уравнения (3. 11), а затем вычитая второе из этих уравнений из первого и используя соотношения (3. 15), получим:

$$(\omega^2+2\omega\alpha U\rho+p_3\rho^2)(\varphi+\psi)+(\omega p_1+p_2\rho+p_3\rho')(\varphi-\psi)=0$$
$$(\omega p_1+p_2\rho+p_3\rho')(\varphi+\psi)-(\omega^2+2\omega\alpha U\rho+p_3\rho^2)(\varphi-\psi)=0.$$

Для совместности этих двух уравнений должен быть равен нулю определитель образуемой ими системы, откуда немедленно вытекает

$$\omega^2+2\omega\alpha U\rho+p_3\rho^2=0,\quad \omega p_1+p_2\rho+p_3\rho'=0. \tag{3.16}$$

Из первого уравнения (3. 16)

$$\rho=-\omega\frac{\alpha U\pm\sqrt{\alpha^2U^2-p_3}}{p_3}.$$

Подставляя это значение ρ во второе уравнение, приходим после элементарных преобразований к искомому соотношению, которое, как и следовало ожидать, не зависит от частоты ω:

$$p_1(\alpha^2U^2-p_3)[p_1p_3-2\alpha[(p_2-p_3')U+p_3U']]-\alpha^2p_3U'^2+$$
$$+p_2(p_2-p_3')(\alpha U^2-p_3)+\alpha^2p_3p_3'UU'-\frac{p_3p_3'^2}{4}=0 \tag{3.17}$$

Нас, однако, интересует выполнение условия (3. 12), а не (3. 13). Очевидно, что для того чтобы получить критерий выполнения условия (3. 12), в (3. 17) знак равенства следует заменить знаком «больше» или знаком «меньше». Чтобы сделать выбор между этими двумя знаками, достаточно установить знак неравенства для одного какого-либо случая. Таким частным случаем может служить призматическое русло, для которого левая часть (3. 17), с точностью до положительного множителя равна

$$\mu^2-2\alpha\mu+\alpha-\frac{1}{\lambda^2}.$$

Сопоставляя этот результат с критерием (1. 1), легко прийти к выводу, что критерий устойчивости для непризматического потока получается из (3. 17) заменой знака равенства знаком «меньше»:

$$p_1(\alpha^2U^2-p_3)[p_1p_3-2\alpha[(p_2-p_3')U+p_3U']]-\alpha^2p_3U'^2+$$
$$+p_3(p_2-p_3')(\alpha U^2-p_3)+\alpha^2p_3p_3'UU'-\frac{p_3p_3'^2}{4}<0. \tag{3.18}$$

Значения функций Ψ и Φ

$\psi(\eta, \alpha)$

η \ α	1,00	1,02	1,04	1,06	1,08
0,01	3,796	4,273	4,990	6,258	9,573
0,02	3,580	4,049	4,771	6,101	10,097
0,03	3,492	3,966	4,707	6,121	11,008
0,04	3,450	3,933	4,699	6,208	12,312
0,05	3,432	3,925	4,718	6,334	14,236
0,06	3,427	3,932	4,756	6,488	17,420
0,07	3,432	3,949	4,805	6,667	24,296
0,08	3,444	3,974	4,864	6,868	85,654
0,09	3,458	4,004	4,931	7,093	
0,1	3,477	4,039	5,004	7,343	
0,2	3,781	4,531	6,032	12,647	
0,3	4,184	5,196	7,783		
0,4	4,643	6,015	10,610		
0,5	5,143	7,009	18,545		
0,6	6,681	8,231			
0,7	6,251	9,772			
0,8	6,852	11,804			
0,9	7,482	14,687			
1,0	8,140	19,358			
1,1	8,825	29,623			
1,2	9,539				
1,3	10,274				
1,4	11,036				
1,5	11,823				
1,6	12,633				
1,7	13,468				
1,8	14,326				
1,9	15,207				
2,0	16,111				
2,1	17,037				

$\Phi(\varphi, \alpha)$

ψ \ α	1,00	1,02	1,04	1,06	1,08
0,01	12,54	13,95	15,96	19,21	25,87
0,02	9,96	11,07	12,67	15,25	20,54
0,03	8,70	9,67	11,07	13,32	17,94
0,04	7,90	8,79	10,06	12,11	16,31
0,05	7,34	8,16	9,34	11,24	15,14
0,06	6,91	7,68	8,79	10,58	14,26
0,07	6,56	7,30	8,35	10,05	13,55
0,08	6,28	6,98	7,99	9,62	12,97
0,09	6,04	6,71	7,69	9,25	12,47
0,1	5,83	6,49	7,42	8,94	12,05
0,2	4,65	5,18	5,93	7,15	9,67
0,3	4,10	4,57	5,24	6,33	8,60
0,4	4,78	4,21	4,83	5,85	8,02
0,5	3,57	3,98	4,57	5,57	7,71
0,6	3,43	3,83	4,44	5,40	7,59
0,7	3,34	3,74	4,33	5,32	7,63
0,8	3,29	3,70	4,30	5,33	7,84
0,9	3,28	3,69	4,32	5,41	8,28
1,0	3,30	3,73	4,39	5,58	9,03
1,1	3,35	3,81	4,51	5,86	10,39
1,2	3,44	3,93	4,71	6,28	13,27
1,3	3,57	4,11	5,00	6,93	25,13
1,4	3,75	4,36	5,42	8,01	
1,5	3,99	4,71	6,03	10,06	
1,6	4,33	5,21	7,01	16,17	
1,7	4,80	5,96	8,81		
1,8	5,50	7,21	13,54		
1,9	6,62	9,70			
2,0	8,64	18,59			
2,1	13,6				

Формы непризматических русел столь многообразны, что анализ критерия (3. 18) должен составить предмет специального исследования.

Следует заметить, что к непризматическим потокам нужно относить не только потоки в непризматических руслах, но и неравномерные потоки в призматических руслах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Картвелишвили Н. А. Неустановившиеся открытые потоки. Л., Гидрометеоиздат, 1968.

2. Федоров Е. П. Результаты натурных исследований катящихся волн на быстротоках. «Труды координационных совещаний по гидротехнике», вып. 7. М., Госэнергоиздат, 1963.

3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. ИЛ, 1956.

4. Гавриленко В. А. Распределение осредненных скоростей в турбулентных равномерных потоках жидкости. «Известия ВНИИГ», т. 19, 1936.

5. Ибрагимов М. Х., Исупов И. А., Кобзарь Л. Л., Субботин В. И. Расчет касательных напряжений на стенке канала и распределение скоростей при турбулентном течении жидкостей. «Атомная энергия», т. 21, 1966, № 2.

SUMMARY

Design values of a momentum correction are recommended. Criterion of waveless current stability for prismatic channels of certain concrete forms is being analyzed. Stability criterion for non-prismatic channels is being established.

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
1970 *ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА* вып. 7

Т. Х. АХМЕДОВ

О РОЛИ АБРАЗИВНОГО ИСТИРАНИЯ СКАЛЫ ПРИ МЕСТНОМ РАЗМЫВЕ ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Опыт эксплуатации водосливных плотин показывает, что, если в основании заложена достаточно прочная скала, в нижнем бьефе все равно могут возникнуть значительные размывы. В литературе имеется немало описаний разрушений скального основания под воздействием сбросного потока [1, 2].

В нижнем бьефе одной высоконапорной плотины в первые же годы эксплуатации были обнаружены размывы скального дна и прилегающего участка берега. Они достигли таких размеров, что угрожали устойчивости сооружения и его отдельных элементов. В течение ряда лет проводились ремонтные работы. Размывы в непосредственной близости от сооружения заделывались с помощью подводного бетонирования. К сожалению, эти меры не дали желаемого результата. Отремонтированные участки разрушались при первом же паводке*.

Нужно отметить, что продукты разрушения дна и левого берега уносились потоком вниз по течению и откладывались в виде бара в нижнем бьефе здания ГЭС и шлюза. Это создавало нежелательный подпор и затрудняло судоходство. За десять лет эксплуатации на ремонтные работы по нижнему бьефу водосливной плотины и расчистке бара было израсходовано около 1,5 млн. руб.

В 1965 году были приняты решительные меры по предотвращению размывов. Конструкция носка водосливной плотины была изменена (рис. 1). Короткий носок заменен удлиненным носком-трамплином, создающим сопряжение бьефов свободно-отброшенной струей вместо поверхностного режима. Для проведения строительных работ нижний бьеф водосливной плотины был отделен перемычкой и осушен. Такой редчайший случай в практике эксплуатации сооружения дал возможность осмотреть разрушения скального основания. Наблюдения за размывами в нижнем бьефе этой плотины проводятся нами с 1958 г. Очевидно, в связи с изменением режима сопряжения бьефов изменится и характер размывов. Поэтому мы считаем возможным изложить в данной статье свои соображения о процессе размыва скальных грунтов, основанные отчасти и на материалах проведенных натурных исследований.

При осмотре осушенного дна было обнаружено, что оно завалено окатанными обломками скалы. Диаметр окатанных глыб был не менее 5—10 *см*. На всем осмотренном участке (15—20 *м* от носка плотины и 80 *м* по ее фронту) не было обнаружено мелких частиц. Они уносились потоком далеко за пределы ямы размыва (на 150—200 *м*) вниз по течению и образовали песчано-галечниковую отмель. На всей территории осушенного дна не обнаружено ни одного неокатанного обломка.

---

* Аналогичным способом пытались ликвидировать размывы в нижнем бьефе плотины Ринкон дель Бонет (Уругвай). Как отмечает О. Маджиоло [3], «такое решение не дало удовлетворительных результатов, поскольку уложенный бетон был унесен потоком».

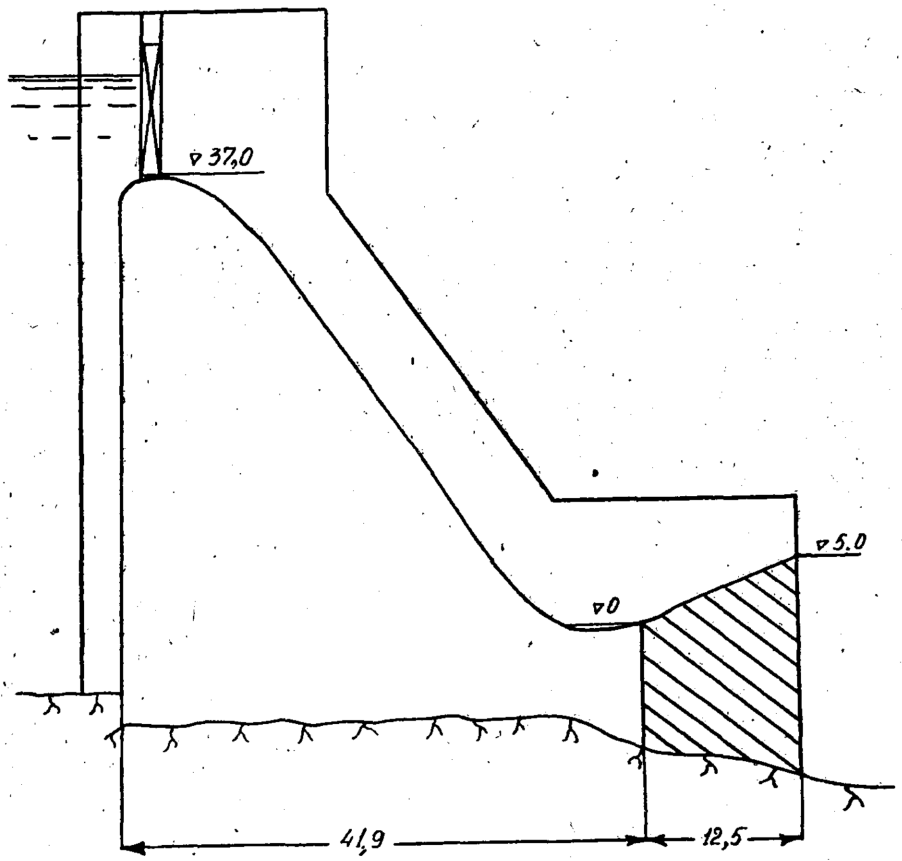


Рис. 1. Изменение конструкции носка водосливной плотины.

Непосредственно у основания плотины оказались глубокие (5—6 *м*) колодцы, на дне которых лежали окатанные валуны. Все это указывает на то, что в процессе разрушения скалы в нижнем бьефе описанной плотины абразивное истирание играло значительную роль.

Интенсивное истирание дна и окатывание отдельностей разрушившейся скалы отмечено и в натурных исследованиях Н. Т. Смольянинова [4] и О. Маджиоло [3].

В настоящее время в гидравлике нет единого мнения о характере процесса разрушения скалы *. Так, в недавно вышедших «Временных указаниях по расчету размыва скального русла за водосливными плотинами с носком-трамплином», ВСН—07—65 [5] принята следующая схема разрушения скалы. «Под воздействием значительных сильно пульсирующих давлений на поверхности скального дна и на поверхности трещин внутри массива скальное дно в области падения струи начинает расшатываться... Следует отметить, что процесс выброса отдельности из гнезда и вынос ее из ямы размыва происходит обычно без трения о дно ямы размыва. Отдельность, как правило, поднимается над дном ямы и выносится за ее пределы без всякого трения».

В этой схеме исключено из рассмотрения взаимодействие выброшенной из своего гнезда отдельности с остальным массивом скалы. Это приводит к отрицанию абразивного разрушения в процессе размыва.

* См., например, [2] стр. 568—570, «Журнал координационного совещания».

Вынос отдельности во взвешенном состоянии, без трения о дно и стенки ямы возможен только в начальный момент.

Рассмотрим схему движения потока в яме размыва (рис. 2). На глыбу скалы в сечении 1—1 (для упрощения примем, что она лежит

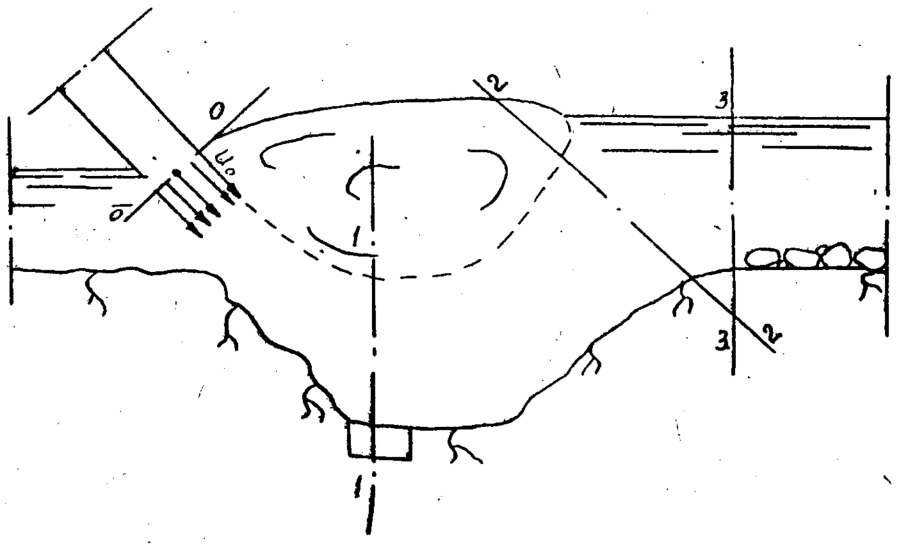


Рис. 2. Схема движения потока в яме размыва.

свободно) действует поток, средняя скорость которого больше, чем на выходе из ямы, в сечении 2—2. Кинетическая энергия потока в сечении 1—1 (E_1) больше, чем в сечении 2—2 (E_2). Для того, чтобы перенести глыбу во взвешенном состоянии «без всякого трения», необходимо, чтобы энергии E_2 было достаточно для этого. Но тогда процесс размыва будет продолжаться, т. к. всегда $E_1 > E_2$. Следовательно, должен наступить момент, когда на участке между сечениями 1—1 и 2—2 глыба коснется стенки и скатится вниз. Опустившись на дно, она вновь будет подхвачена потоком. В этом вращательном процессе участвует одновременно большое количество глыб разного размера. Скорость их перемещения, а следовательно, и точки их соприкосновения со стенкой ямы различны. Соударение глыб между собой и о массив скалы вызовет их взаимное разрушение и истирание. Измельченные частицы будут выноситься из ямы размыва. Скорость разрушения зависит от свойств горной породы (прочность, трещиноватость, абразивность).

Известно, что абразивность пород обратно пропорциональна их крепости [6]. Это означает, что глыбы более слабых пород при размыве разрушаются по микротрещинам, глыбы более крепких пород раскалываются при ударах меньше, но для них большее значение имеет абразивное истирание. В соответствии с этим возрастает и длительность процесса размыва.

Ряд исследователей [4, 7, 8] считает, что глубина и профиль размыва не зависят от свойств материала. Это мнение получило распространение и послужило основой «эквивалентного» метода моделирования скалы. Однако оно не подтвердилось натурными материалами. То, что профиль и положение ямы размыва существенно зависят от свойств размываемого материала, было показано в нашей статье [2] на основе анализа натурных и модельных исследований. Наши опыты показали

также, что глубина размыва в заменителях скалы на модели зависит от прочности размываемого материала.

Изучение опубликованных данных, а также наши опыты и натурные наблюдения позволяют предложить следующую схему разрушения скалы. В начальный период под ударным воздействием струи из скального массива выламываются значительные по объему отдельности, размеры которых определяются трещиноватостью скалы. По мере возрастания глубины воронки скорости потока на дне уменьшаются и наступает момент, когда отдельность уже не может быть выброшена целиком. Как показывают расчеты по зависимостям теории турбулентных струй [9], глубина размыва на этом этапе достигает 50—60% максимальной. Дальнейший размыв происходит за счет интенсивного абразивного истирания как уже отделившихся глыб, так и стенок и дна ямы.

Следовательно, процесс разрушения скалы можно разделить на три этапа. Первый — активное разрушение, когда поток выламывает из массива отдельные глыбы. В этот период важнейшую роль играет схема разбивки массива трещинами, свойства скалы (ее прочность) оказывают меньшее влияние.

С углублением размыва скорость потока падает и наступает момент, когда она уже не может вырвать отдельность из массива. Однако энергии потока еще достаточно для того, чтобы вывести ее из равновесия и заставить колебаться. Эти колебания приводят к расширению трещин и уменьшению веса самой отдельности за счет абразивного истирания. Силы сцепления по граням глыбы исчезают, и она может быть выброшена из своего гнезда. Это вторая — активно-абразивная стадия разрушения.

И наконец, наступает момент, когда поток не может вывести из равновесия отдельности скалы. Но размыв продолжается за счет того, что ранее отделившиеся глыбы находятся в непрерывном движении и разрушают стенки ямы размыва. Это третья, чисто абразивная стадия разрушения.

На втором и третьем этапах решающее значение имеет прочность размываемого материала, его сопротивляемость абразивному истиранию.

Скорость размыва (углубления ямы) на этих этапах различна. Первый этап может быть завершен в течение нескольких лет. Так, по данным В. Е. Ляпина [10], в нижнем бьефе строительных водосбросов Красноярской ГЭС за первые три года глубина размыва достигла 10—12 *м*. На втором этапе скорость размыва падает и значительно уменьшается на третьем.

На рис. 3 приведены данные модельных исследований размыва скалы в нижнем бьефе средненапорной плотины на р. Тентек *. На этом рисунке отмечены этапы разрушения. В качестве размываемого материала в данном опыте использовались бетонные кубики, прочность которых была пересчитана. При других опытах в качестве размываемого материала использовались песчано-цементные и песчано-алебастровые смеси, а также щебень. Смеси укладывались как сплошным массивом, так и слоями. Толщина слоев, размеры кубиков и щебня были приняты соответствующими натурным отдельностям скалы. При укладке смеси слоями они пересыпались негашеной известью, которая при разложении разрывала слои и тем самым создавала трещиноватость.

Опыты показали, что в процессе размыва грани бетонных кубиков

* Исследования выполнены в КазНИИЭ И. П. Шаг и Л. П. Русских при консультации автора.

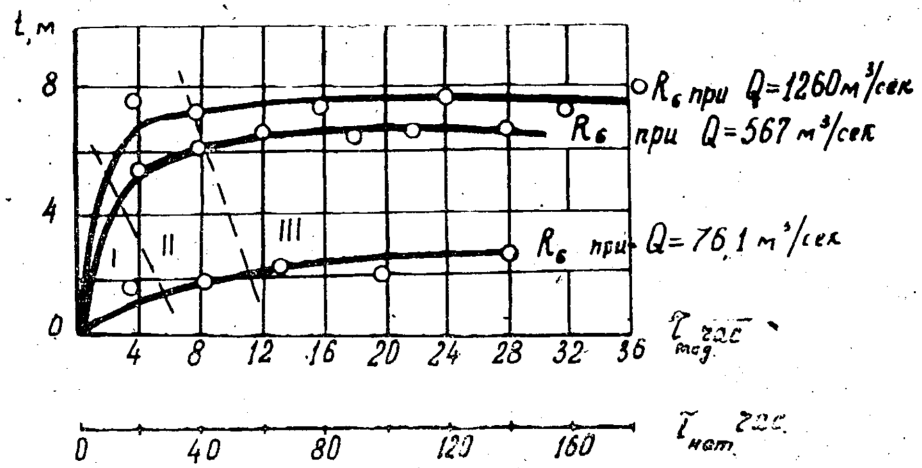


Рис. 3. Исследование на модели местного размыва скалы.

и отдельностей песчано-цементной и песчано-алебастровой смесей истирались и они принимали округленные формы.

Конечно, на модели процесс разрушения скалы воспроизводится приближенно, так как пересчет свойств натурного материала на модель по правилам гравитационного подобия невозможен [2]. Однако эти опыты дают качественную картину размыва более достоверную, чем при замене скалы несвязным материалом.

Нами собраны также материалы о росте размыва во времени за высоконапорной водосливной плотиной, изображенной на рис. 1 (плотина вступила в эксплуатацию в 1954 г.). Эти данные приведены на рис. 4.

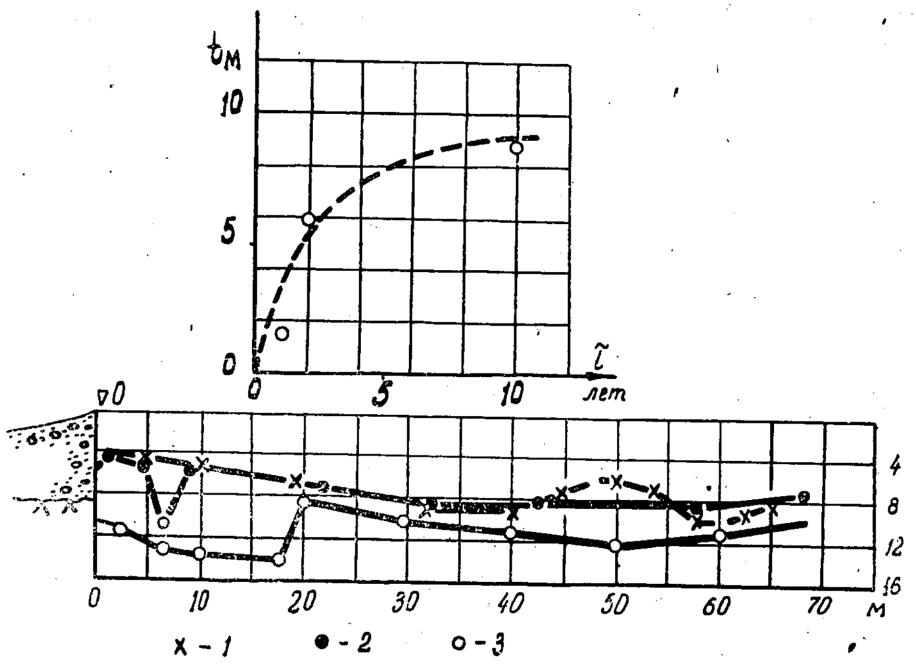


Рис. 4. Размыв скального дна в нижнем бьефе плотины. 1—1955, 2—1956, 3—1965 г.

К сожалению, реконструкция плотины, изменившая режим сопряжения бьефов, изменила и характер размыва. Зона размыва сместится ниже по течению и, по-видимому, не будет связана с предыдущими деформациями. Натурные наблюдения за этой плотиной будут продолжены.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вызго М. С. Эксплуатационные мероприятия, прогнозы и способы уменьшения местных размывов за гидротехническими сооружениями. УзССР. Ташкент. Изд-во «Наука», 1966.

2. Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып. VII, ГЭИ. М.-Л., 1963.

3. Ахмедов Т. Х. Некоторые результаты лабораторных исследований местных размымов заменителей скальных пород. «Известия АН КазССР, сер. энергетическая», вып. I. (19), Алма-Ата, 1961.

4. Maqqiolo O. J. Etude sur modeJe reduit de lérosion du Jit rocheux en adal du deversoir du barrage de "Rincon del Bonete" (Nruquay).

5. Смольянинов Н. Т. Материалы IX конгресса МАГИ, 1961, Югославия. Разрушение скалы в нижнем бьефе плотины падающей струей. «Гидротехническое строительство», 1952, № 2.

6. Временные указания по расчету размыва скального русла за водосливными плотинами с носком-трамплином. ВСН-07-65, ГПКЭ и Э СССР, М.-Л., изд. «Энергия», 1966.

7. Кузнецов А. А. О корреляции физико-механических свойств горных пород и расхода буровой стали при роторном бурении. Сб. «Механические свойства горных пород». ЦИТИ угля, М., 1959.

8. Scimemi E. Sulla relazione che intercede fra qli scavi osservati nelle opere idrauliche oriqinalle e nei modelli Enerqia elettrica, 1939, № 11.

9. Burns R. V. And White O. M. The protection of dams Weirs and sluices aqainst scour. Journal Jnst Civ. Enq., Vol 10, nov 1938.

10. Ахмедов Т. Х. Местный размыв трещиноватой скалы в нижнем бьефе водосливных плотин (некоторые замечания к ВСН-07-65). «Гидротехническое строительство», 1968, № 4.

SUMMARY

The author suggests a hypothesis on the process of local erosion in rocku ground basing on full-scale investigations, special experiments as well as on the analysis of the data already published. Important role of abrasion during this process has been stressed.

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
1970 *ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА* вып. 7

Р. Х. ДЮСЕНОВА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ПОЛНОГО ДАВЛЕНИЯ ПОТОКА НА РАСЩЕПИТЕЛИ

Одним из устройств, способствующих гашению избыточной кинетической энергии потока, на водосбросных сооружениях являются незатопленные гасители энергии (расщепители). Располагаются они в зоне больших скоростей и испытывают значительное гидродинамическое давление.

Изучение современного состояния вопроса об определении силового воздействия на расщепители показывает, что имеющихся решений недостаточно и требуются дополнительные исследования. Это подтверждается недавно вышедшими «Временными указаниями по гидравлическому расчету поверхностных водосбросов высоких гравитационных плотин» (ВСН-01-65). В них отмечено: «27. Использование для гашения энергии специальных устройств как в пределах тела плотины, так и на водобое (повышенная шероховатость, **расщепители,** соударение струй и т. д.) допустимо только после соответствующего анализа и **специальных лабораторных исследований.** Эти исследования должны осветить работу указанных устройств с точки зрения эффективности выбранных мероприятий, **нагрузки и вибрации** сооружения, а также с точки зрения безопасности в отношении кавитационной эрозии» (подчеркнуто нами.—Р. Д.)

Для уточнения методов расчета гидродинамического давления необходимо учитывать влияние конструктивных характеристик гасителя на величину силы давления, а также пульсацию давления. Были рассмотрены два случая (рис. 1):

А. Исследование силового воздействия потока на расщепители, устанавливаемые на носке плотины, на концевых участках консольных перепадов, быстротоков.

Б. Исследование силового воздействия потока на расщепители, устанавливаемые на сливной грани плотины.

Такое деление проведено потому, что в первом случае основной силой для расчета конструкции является горизонтальная составляющая давления потока (рис. 1, А), а для второго — вертикальная (рис. 1, Б).

Полная сила гидродинамического давления на гаситель может быть представлена как

$$P_0 = P + P^1, \qquad (1)$$

где P — осредненная составляющая суммарного давления,

P^1 — пульсационная составляющая давления.

Сила давления P_0 складывается из горизонтальной ($\overline{P}_{гор}$) и вертикальной ($\overline{P}_{вер}$) составляющих давления.

В рассматриваемом нами случае пульсация гидродинамического давления вызывается пульсацией скорости в потоке, набегающем на преграду. Это является следствием турбулентности потока и вихреобразования при обтекании элементов конструкции.

Всякое тело, помещенное в турбулентный поток реальной жидкости,

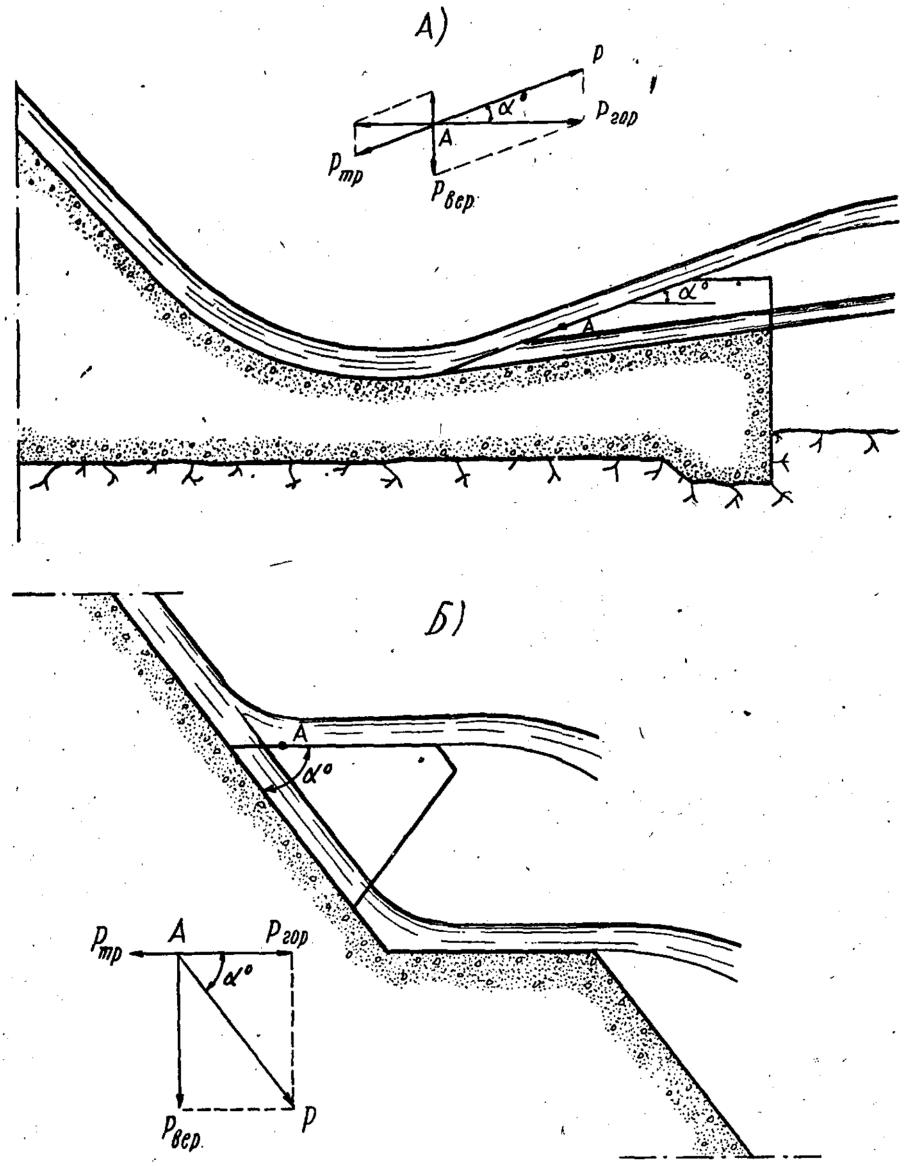


Рис. 1. Схемы сил. действующих на расщепитель.

испытывает гидродинамическое давление. Величина его есть функция скорости и не постоянна во времени, а имеет пульсирующий характер. Пульсация скорости вызывает соответственно пульсацию давления. Связь между пульсацией скорости и давления весьма сложна, так как сказывается пульсация всех трех компонентов скорости и другие колебания жидкости и преграды. Поэтому нами были проведены непосредственные измерения пульсации в зоне повышенного давления на напорной грани гасителя энергии двумя способами:

1) по записям в отдельных точках [1],

2) по синхронным записям четырьмя датчиками, расположенными по длине напорной грани. Суммирование осциллограмм в тождественные моменты времени дает осреднение пульсации на рассматриваемом участке [2].

Такое двукратное изучение пульсации необходимо потому, что при статических расчетах конструкций определяются полное давление и характер распределения давления с учетом его пульсации. Изучение пульсации давления в точке дает сведения о распределении максимальных нагрузок и может представить интерес при проектировании расположения арматуры.

Исследованиями Г. А. Юдицкого, В. М. Лятхера [3] установлено, что при переходе от точки к площади пульсация давления уменьшается с увеличением площади (с увеличением длины рассматриваемой напорной поверхности).

Учет осредненной пульсации позволяет более точно определить полное давление на гасители энергии и провести расчет устойчивости и прочности конструкции в целом.

Величина максимального размаха пульсации гидродинамического давления не может полностью характеризовать случайный процесс пульсации. Для этого необходимо определить среднеквадратичное отклонение размаха пульсации и частоту. При обработке данных измерений параметры пульсации давления увязывались со скоростью и глубиной в сжатом сечении [1].

Для случая А опыты проводились при расходах от 3,42 *л/сек* до 2,58 *л/сек* и при углах наклона напорной грани гасителя $\alpha=20°, 40°, 60°$. Пульсация давления измерялась четырьмя датчиками, расположенными по длине напорной грани расщепителя в зоне повышенного давления.

По данным обработки результатов опытов, относящихся к синхронной записи при переменных значениях угла наклона напорной грани гасителя, построены графики (пульсационные характеристики имеют индекс «*s*»). Они приведены на рис. 2.

Обозначения, использованные для построения графиков:

δ_{P_s} — относительное пьезометрическое давление,

P'_s — относительное среднеквадратическое давление,

$P'_{\max_s}$ — относительное максимальное давление,

$h_{пл}$ — высота гасителя,

T_0 — действующий напор.

Общий характер кривых на графиках тот же, что и при точечной записи пульсации. Кривые показывают, что с увеличением угла наклона, при осреднении пульсации по площади пульсационные характеристики давления увеличиваются так же, как и осредненные. Соотношения между давлениями с учетом и без учета пульсации выражаются зависимостями

$$\frac{P'_{\max_s}}{\delta_{P_s}} = f_1\left(\frac{h_{пл}}{T_0}\right) \text{ и } \frac{P'_s}{\delta_{P_s}} = f_2\left(\frac{h_{пл}}{T_0}\right).$$

Проведенные расчеты показывают, что возрастание давления зависит от угла наклона напорной грани гасителя. Сила полного давления с учетом среднеквадратичного отклонения увеличивается на 5—10%, а с учетом максимальной амплитуды — на 20—30%. По средним величинам возрастания коэффициента k_S, учитывающего пульсацию по площади в зависимости от угла наклона напорной грани гасителя, построен график $k_S=f(\alpha^0)$ (рис. 3). Графические зависимости охватывают зону обычно применяемых углов. Величины k_s выражены уравнениями:

$$\kappa_{s_1} = 0{,}042+0{,}034 \sin\alpha \qquad (2)$$

при учете среднеквадратичного отклонения (δ_s),

$$\kappa_{s_2} = 0{,}14+0{,}19\,sin\,\alpha \qquad (3)$$

при учете максимальной амплитуды. $\left(\frac{A_{\max_s}}{2}\right)$.

Для случая Б опыты проводились при расходах от 18,5 *л/сек* до 64,5 *л/сек*. Измерение пульсации проводилось при расположении расщепителя на высоте 1,6 *м* от гребня водосливной плотины.

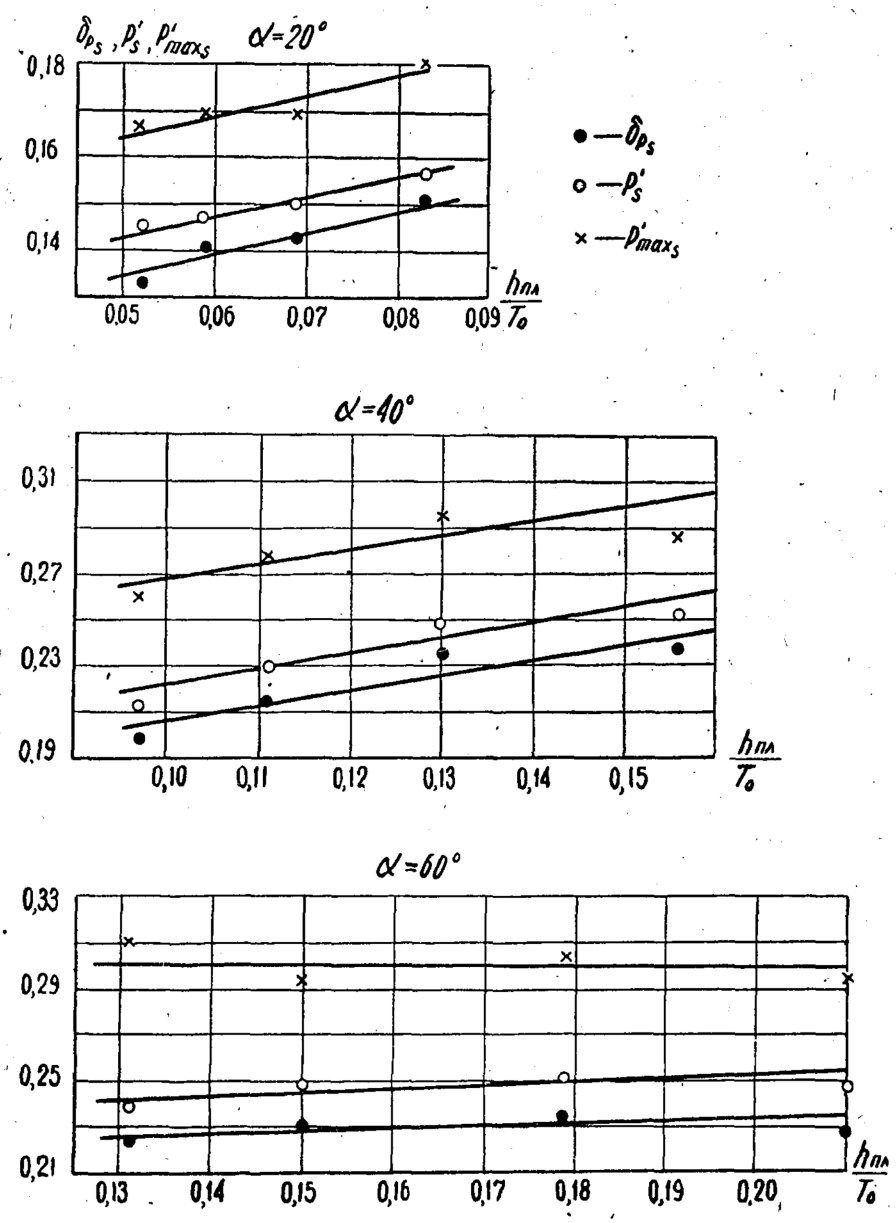


Рис. 2. Графики δ_{P_s}, P'_s, $P'_{\max_s}$ в зависимости от $\frac{h_{пол}}{T_0}$ при синхронной записи пульсации давления.

Синхронная запись дает увеличение силы давления на 30% по $\frac{A_{\max_s}}{2}$ и $\approx 10\%$ по σ_s.

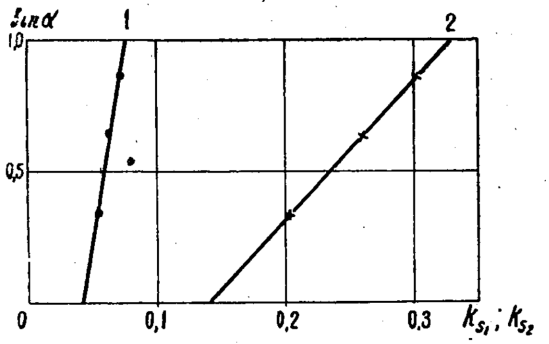


Рис. 3. Графики $k_{s_1}=f_1(\alpha^0)$, $k_{s_2}=f_2(\alpha)$.

Сравнение результатов точечной и синхронной записей в обоих случаях показывает, что суммирование пульсации по площади дает уменьшение пульсационного давления за счет осреднения ее величин.

Для расчета расщепителей, устанавливаемых на носке водосливной плотины, консольного водосброса или быстротока (случай А), горизонтальная составляющая пульсационного давления равна

$$P'_{\text{гор}}=\kappa_{s_2} P_{\text{гор}}, \tag{4}$$

где κ_{s_2} — коэффициент, учитывающий пульсацию давления по площади при учете максимальной амплитуды, зависит от угла наклона напорной грани гасителя.

$P_{\text{гор}}$ — горизонтальная составляющая осредненного давления [4].

$$P_{\text{гор}}=2\left(1-\sqrt{\frac{H-h_{\text{пл}}}{H}}\cos\alpha\right)\gamma\,\omega\,H, \tag{5}$$

здесь $H=\frac{v^2}{2g}$ — скоростной напор,

v, ω — скорость и площадь миделевого сечения потока перед гасителем,

$h_{\text{пл}}=l_{\text{пл}}\sin\alpha$ — высота гасителя,

$l_{\text{пл}}$ — длина напорной грани,

α^0 — угол наклона напорной грани к динамической оси потока.

Для расчета расщепителей, устанавливаемых по высоте сливной грани плотины (случай Б), вертикальная составляющая пульсационного давления равна

$$P'_{\text{вер}}=\kappa_s P_{\text{вер}}, \tag{6}$$

где $k_s=0{,}3$ — коэффициент, учитывающий пульсацию,

$P_{\text{вер}}$ — вертикальная составляющая осредненного давления [5].

$$P_{\text{вер}}=\gamma\,\omega\,l_{\text{пл}}+2\,\gamma\,\omega\frac{v^2}{2g}\sin\alpha, \tag{7}$$

здесь $l_{\text{пл}}$ — длина напорной грани расщепителя,

α^0 — угол между сливной гранью плотины и напорной гранью расщепителя,

v, ω — скорость и площадь миделевого сечения потока перед расщепителем.

В результате теоретических проработок и их экспериментальной проверки для рассматриваемых случаев нами определены осредненные и пульсационные составляющие гидродинамического давления.

Для расчета незатопленных гасителей энергии, устанавливаемых на носке плотины или консольного перепада, быстротока, горизонтальная составляющая давления потока с учетом пульсации равна

$$\overline{P}_{гор}=P_{гор}+P'_{гор}=K_{гор}P_{гор}, \tag{8}$$

где

$$K_{гор}=1+k_{s_2}=1{,}14+0{,}19\sin\alpha.$$

Вертикальная составляющая для этого случая равна

$$\overline{P}_{вер}=\overline{P}_{гор}\operatorname{ctg}\alpha. \tag{9}$$

Полная равнодействующая давления с учетом пульсации давления равна

$$P_0=\frac{K_{гор}P_{гор}}{\cos\alpha}. \tag{10}$$

Для расчета расщепителей, устанавливаемых по высоте сливной грани плотины, вертикальная составляющая давления с учетом пульсации равна

$$\overline{P}_{вер}=P_{вер}+\overline{P}'_{вер}=K_{вер}P_{вер}, \tag{11}$$

где

$$K_{вер}=1+k_s=1{,}3.$$

Горизонтальная составляющая для случая Б

$$\overline{P}_{гор}=\overline{P}_{вер}\cdot\operatorname{tg}\alpha. \tag{12}$$

Полная равнодействующая давления с учетом пульсации равна

$$P_0=\frac{K_{вер}P_{вер}}{\sin\alpha}. \tag{13}$$

Таким образом, изучение действующих сил позволило получить формулы для определения гидродинамического давления потока на незатопленные гасители энергии, устанавливаемые на водосбросных сооружениях различных конструкций. Ими можно пользоваться в практических инженерных расчетах, однако методика таких расчетов должна совершенствоваться и в дальнейшем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дюсенова Р. Х. Пульсация давления на участке бурного потока, отклоняемого преградой. «Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства», вып. 3. Алма-Ата, «Наука», 1965.

2. Абелев А. С. Исследование пульсации суммарной гидродинамической нагрузки для расчета вибрации плоских глубинных затворов. «Известия ВНИИГ», т. 58, ГЭИ, М.-Л., 1958.

3. Юдицкий Г. А., Лятхер В. М. Гидродинамические нагрузки на элементы крепления нижнего бьефа водосливных плотин. «Труды Гидропроекта», сб. 13. М.-Л., «Энергия», 1966.

4. Дюсенова Р. Х. Определение давления потока на гаситель при сбтекании его струей. «Вестник АН КазССР», 1964, № 10.

5. Дюсенова Р. Х. Пульсация давления в точках и по площади напорной грани расщепителя. «Вопросы гидротехники и гидравлики». Материалы II конференции молодых научных работников по мелиорации и гидротехнике. Изд-во «Урожай», Киев, 1969.

SUMMARY

The author introduces some formulas for determination of pulsation components and values of the total hydrodynamic pressure of the flow on the splitters.

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
1970 *ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА* вып. 7

А. А. ПИЧУГИНА

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКА ПРИ РАСТЕКАНИИ ЕГО В ТУПИКЕ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Определение динамического воздействия потока на стенки при растекании играет большую роль в изучении местного размыва. При размыве связных и скальных грунтов необходимо знать не только максимальное (осевое) давление, но и воздействие потока на стенки ямы.

Растекание потока при местном размыве аналогично растеканию струи, бьющей в тупик. Для упрощения задачи мы рассматриваем на первом этапе исследований прямоугольный тупик и вертикальную струю *.

Для измерения давления стенки и дно тупика снабжены пьезометрами с диаметром входного отверстия $d=1$ *мм*. Конечно, для определения действительной величины динамического воздействия необходимо измерить и пульсацию давления. Однако, учитывая, что вопрос этот слабо изучен**, а также то обстоятельство, что пульсация прямо пропорциональна осредненной величине давления, первоначально ограничим исследования измерением осредненных величин. В дальнейшем эти материалы помогут правильному выбору местоположения датчиков.

Опыты проводились при расходах $Q=16$ и 25,5 *л/сек*. Начальная ширина струи $2b_0=16$ *мм*. Числа Рейнольдса равны $Re=5{,}8\times10^4$ и $9{,}0\times10^4$, что отвечает квадратичной области сопротивления.

Размеры тупиков указаны на рис. 1. По материалам опытов построены эпюры давления, приведенные на рис. 1. Эти эпюры показывают, что в прямоугольных тупиках в углах возникает отрицательное давление, а стенки испытывают значительное давление потока. Такое распределение давления является причиной трапецеидальности реальных ям размыва.

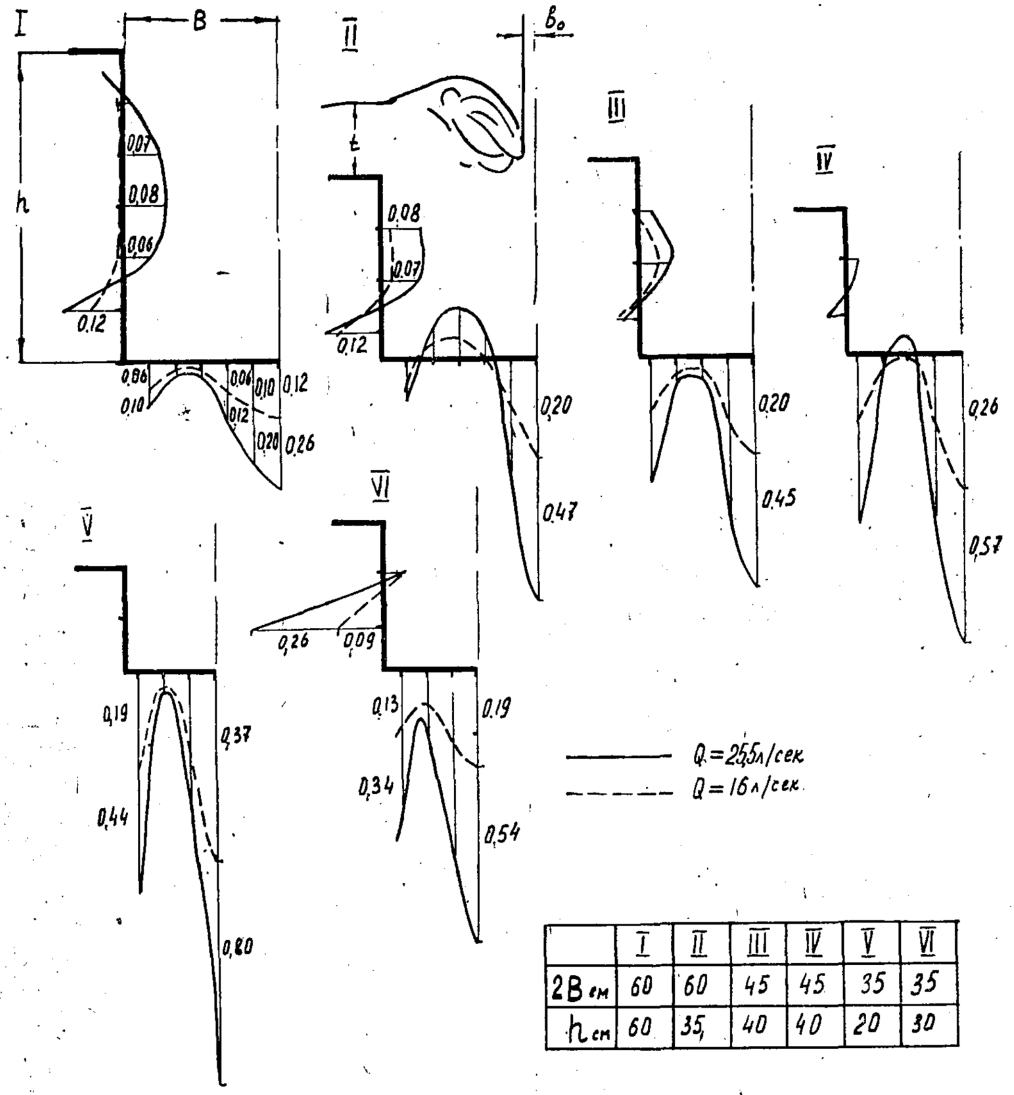
Основной силой, участвующей в процессе размыва, является максимальное (осевое) давление. На рис. 2 приведен график изменения давления на дно по оси струи на разной глубине тупика. На этом же графике приведены данные Хойзлера, полученные при измерении давления круглой струи на пластинку, а также опытные данные Н. Ф. Сальниковой по измерениям давления потока на дно русла. Сравнение этих данных показывает различия в распределении осевого давления по глубине при свободном и несвободном растекании потока.

Рассмотрим теперь вопрос о глубине проникновения струи под уровень нижнего бьефа. Конечно, если мы расположим дно тупика или русла на очень большой глубине, то динамическое давление потока не будет ощущаться. Это расстояние можно назвать участком полного растекания струи. В задачу наших исследований входит изучение участка активного взаимодействия русла и потока.

---

* Описание экспериментальной установки и конструкции тупика приведено в нашей статье, опубликованной в этом же сборнике.

** Наиболее известными работами в этом направлении являются работы Н. Ф. Сальниковой [1] и Хойзлера [2], но в них описывается давление потока на дно русла, а не дно ямы размыва.



	I	II	III	IV	V	VI
2B см	60	60	45	45	35	35
h см	60	35	40	40	20	30

Рис. 1. Эпюры давления потока на дно и стенки тупика.

Опыты показали, что величина осевого давления зависит от параметров тупика, от соотношения его ширины и глубины. Характер изменения осевого давления потока на дно тупика имеет вид семейства кривых. С увеличением ширины тупика кривая $P=f(h)$ приближается к кривой, полученной в опытах Н. Ф. Сальниковой.

Если сравнить данные Н. Ф. Сальниковой с нашими (при одном и том же расходе), то видно, что при свободном растекании гашение энергии потока происходит интенсивнее, чем при несвободном. Это особенно заметно сказывается при увеличении глубины тупика. Отсюда можно сделать вывод, что несвободная струя является более дальнобойной, чем свободная. Подобный же вывод получен В. М. Седелкиным при изучении аэродинамики проточной части ограниченного пространства топок [3]. Большая дальнобойность несвободной струи объясняется тем, что в ограниченном пространстве циркуляционные зоны невелики по объему и поток затрачивает меньше энергии при прохождении этого участка.

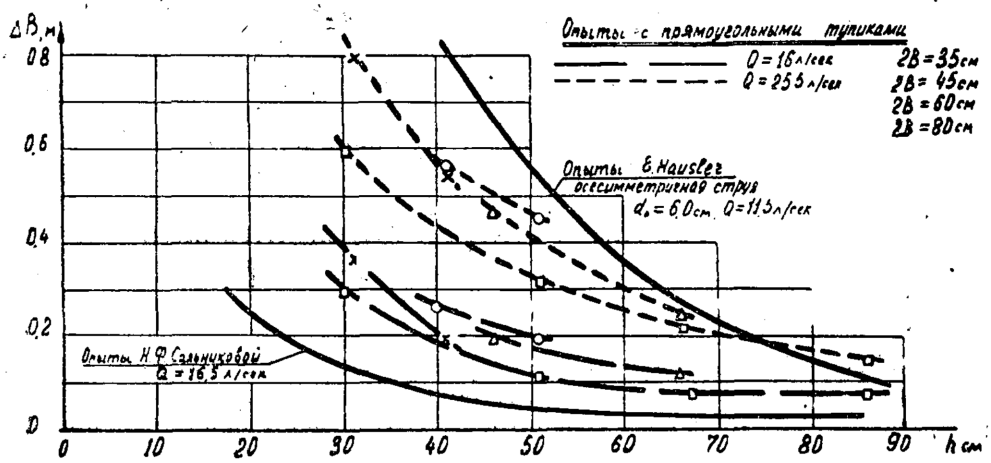


Рис. 2. Изменение осевого давления по длине тупика.

Изменение осевого давления по оси тупика.

№ п/п	Q л/см	2B см	$\overline{h}$ см	P м	№ п/п	Q л/см	2B см	$\overline{h}$ см	P м
1	16	80	30	0,30	1	25,5	80	30	0,59
2			51	0,12	2			51	0,33
3			66	0,11	3			66	0,23
4			86	0,08	4			86	0,15
5		60	46	0,20	5		60	46	0,47
6			51	0,17	6			51	0,40
7			66	0,11	7			66	0,27
8		45	30	0,34	8		45	30	0,57
9			39	0,26	9			39	0,56
10			49	0,19	10			49	0,45

ЛИТЕРАТУРА

1. Сальникова Н. Ф. Исследование водосбросов со свободно падающими струями. «Труды кафедры гидросооружений МИСИ им. В. В. Куйбышева», № 24, вып. 2. 1958.

2. Муромов В. С. Реферат № 437-2. «Механика», Б. «Гидротехника», 1961, № 3.

3. Седелкин В. М. Экспериментальное исследование аэродинамики проточной части ограниченного пространства топок. «Труды Саратовского ин-та «Гипрониигаз», вып. V, 1966.

SUMMARY

The author describes some results of experimental determination of a flat jet on the bed and walls of a right-angle impasse. It has been estabiliched that the presence and the parameters of the impasse display certain influence on the cahnge of axial pressure in hte jet.

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
1970 *ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА* вып. 7

А. М. ТАМАДАЕВ, А. Т. КУЗЬМИЧЕВ

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ЭКСТРЕННОГО СНИЖЕНИЯ МОЩНОСТИ ГИДРОТУРБИНЫ ВВОДОМ ВОЗДУХА В ЕЕ ПРОТОЧНУЮ ЧАСТЬ

Введение. Имеются в виду экстренные снижения мощности гидротурбин в случаях, когда возникают большие внезапные сбросы тормозных моментов со стороны генераторов. Это бывает, например, при коротких замыканиях или аварийных отключениях больших нагрузок в энергосистеме, отключениях одной из цепей ЛЭП и т. д. Во всех этих случаях из-за ускорения роторов генераторы могут выйти из параллельной работы и вызвать системную аварию со значительным экономическим ущербом. Чтобы предотвратить выход генераторов из синхронной работы, необходимо быстро снижать вращающие моменты турбин.

Хотя в литературе [1, 2] неоднократно отмечалась целесообразность разработки способов экстренного воздействия на момент первичных двигателей, решению этой проблемы, особенно для гидротурбин, не уделялось достаточного внимания. Одной из основных причин этого является сложность комплекса переходных процессов в гидромеханической и электромеханической частях. Большое количество нелинейно взаимосвязанных факторов затрудняет достаточно точное описание протекающих процессов и аналитическое решение. Так, например, одним из возможных способов, обеспечивающих аварийное снижение мощности гидротурбин, является экстренная подача воздуха в область их рабочих колес [3, 4]. При подаче воздуха возникают гидроударные явления в напорной части, меняется рабочий процесс в рабочем колесе одновременно по многим факторам, меняются и явления, протекающие в отсасывающей трубе. Анализ их вызывает необходимость учитывать возникающую неоднородность среды, взаимосвязь между ними, зависящую от характеристики напорного трубопровода, типа турбины и т. д. Кроме того, необходимо учесть взаимовлияние электрических и механических процессов через вал агрегата. Изучение процесса в динамике такого сложного комплекса требует создания гидроэлектродинамической модели всего блока гидроагрегата с моделью ЛЭП или проведения дорогостоящих экспериментов на действующих ГЭС в энергосистеме.

В статье приводятся формулы, на основании которых можно провести качественный анализ ожидаемых явлений при подаче воздуха в проточную часть гидротурбины. Расчетные зависимости для простейшего случая подачи воздуха в отсасывающую трубу даны в [4]. Сообщаются также первые результаты экспериментальной проверки подачи воздуха, проведенной на гидроэлектродинамической модели полного блока гидроагрегата полупромышленного типа, созданной при Казахском НИИ энергетики. Исследовались две схемы ввода воздуха в турбину: а) в отсасывающую трубу (в зону выхода потока воды из рабочего колеса), б) перед рабочим колесом (через патрубок у входа в спиральную камеру).

Основными задачами, которые необходимо решить при разработке способов экстренного регулирования мощности турбин [5, 6], являются:

1) максимальное сокращение зоны нечувствительности и инертности регулирующих органов; 2) достижение интенсивного снижения мощности в первый момент времени и получение возможности регулирования в последующий период; 3) сокращение до минимума разброса характеристики снижения мощности; 4) максимальное снижение расчетных затрат.

Экспериментальная установка. Стенд является полупромышленной установкой, близкой по своим параметрам к натурным гидроагрегатам (рис. 1). Он создан на базе радиальноосевой гидротурбины типа РО-82. Основные данные: максимальный напор — 62,5 *м*, расчетный напор H_p — 57,6 *м*, расход воды при H_p — 1,5 $м^3/сек$, длина напорного трубопровода — 320 *м* при среднем диаметре — 0,8 *м*, мощность турбины при H_p — 740 *квт*, номинальная скорость вращения 1000 *об/мин*. Турбина непосредственно соединена с генератором типа ГС-118/44—6, мощностью 925 *ква* и напряжением 6,3 *кв*. Общий маховой момент агрегата 1,5 $тм^2$. На одном валу с генератором смонтирован возбудитель типа ПН-205. Турбина снабжена регулятором скорости типа РС-250. Генератор может работать на изолированную нагрузку в виде водяного реостата и параллельно с Алма-Атинской энергосистемой, причем как непосредственно на сборные машины, связанные с системой, так и через модель длинной линии электропередачи. На данной стадии выявлялись наиболее перспективные места ввода воздуха (для дальнейшего тщательного исследования), поэтому наблюдения за рабочими процессами в колесе и в отсасывающей трубе, за переходными процессами в напорном тракте турбины проведены без учета возмущений и переходных процессов в электрической части.

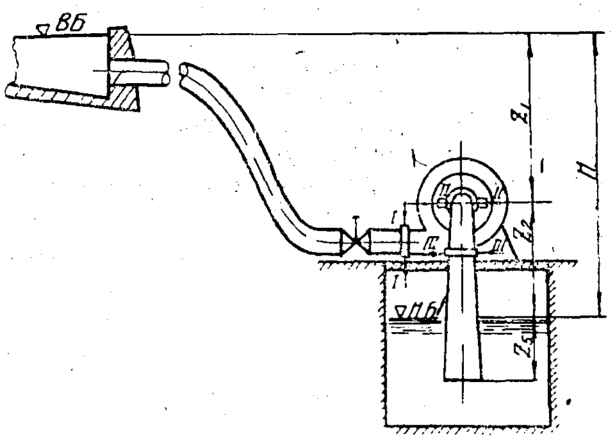


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Агрегат снабжен кроме щитовых измерительных приборов, аппаратуры автоматики и релейной защиты также лабораторными точными датчиками электрических и гидромеханических параметров, дающих возможность контролировать и фиксировать динамику их изменения. Так, измерение электрической мощности генератора осуществляется при помощи трехфазного преобразователя мощности П004 (З-д «Виброприбор»», г. Кишинев), основанного на использовании эффекта Холла. Изменения давления в напорном трубопроводе, вакуума в отсасывающей трубе, расходов воды и воздуха, крутящего момента на валу агрегата записываются специальными датчиками на кремниевых тензорезисторах. Существует схема измерения угла между векторами ЭДС генератора и напряжением системы. Для записи изменений параметров во времени используются шлейфные осциллографы.

Для подачи воздуха создано специальное воздушное хозяйство с давлениями в рессиверах 6 *атм* и 25 *атм*. Подача воздуха в гидротурбину возможна в трех местах (рис. 1). При этом воздух можно подавать под любым давлением раздельно или совмещенно. В местах ввода воздуха установлены полые кольца с перфорированными внутренними стенками

для равномерного впуска воздуха по периметру. Управление подачей воздуха осуществляется при помощи быстродействующих клапанов, длительность времени и величина открытия которых регулируется. Привод клапанов воздушный. Клапанами можно грубо регулировать закон ввода воздуха.

Опыты подачи воздуха в отсасывающую трубу. Теоретическими предпосылками снижения мощности гидротурбины при подаче воздуха в отсасывающую трубу являются следующие соображения.

Как известно, поток воды, сходящий с лопастей реактивных гидротурбин, обладает большим запасом кинетической энергии, доходящей на низконапорных ГЭС до 40—50% от всей энергии, подведенной к турбине [7]. Отсасывающие трубы дают возможность в значительной мере использовать эту энергию. В таблице 1 приводится примерное значение эффекта восстановления отсасывающей трубы ΔE в зависимости от быстроходности турбин n_s. Как видно из таблицы, с увеличением быстроходности турбины роль отсасывающей трубы растет.

Таблица 1

n_s	80	200	300	600	800
ΔE в процентах от подведенной к турбине энергии	1,0	6,0	10,0	24,0	36,0

Из уравнения сохранения энергии в потоке при работе турбины без отсасывающей трубы с выходом воды прямо в атмосферу, используемая в турбине удельная энергия в соответствии с рис. 1 равна

$$E_1 = \left(\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_{1a}}{\gamma} + z_1\right) - \left(\frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_{2a}}{\gamma} + z_2 + \Delta h_{1-2}\right),$$

где Δh_{1-2} — потери энергии в рабочем колесе,

p_{1a}, p_{2a} — соответственно атмосферное давление на входе и выходе рабочего колеса,

v_1, v_2 — абсолютные скорости воды на входе и выходе рабочего колеса.

При работе турбины с конической отсасывающей трубой, используемая на рабочем колесе до точки 5 (выход отсасывающей трубы) удельная энергия равна

$$E_2 = \left(\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_{1a}}{\gamma} + z_1\right) - \left(\frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_{5a}}{\gamma} - z_5 + \Delta h_{1-5}\right),$$

где Δh_{1-5} — потери энергии в рабочем колесе и в отсасывающей трубе.

Следовательно, дополнительный эффект от установки отсасывающей трубы составляет

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \frac{v_2^2 - v_5^2}{2g} + z_2 - \Delta h_{2-5}, \qquad (1)$$

где Δh_{2-5} — потери энергии в отсасывающей трубе.

$$\Delta h_{2-5} = \Delta h_{1-5} - \Delta h_{1-2}.$$

Если для нормальной эксплуатации гидротурбин стремятся к максимальному увеличению этого эффекта, т. е. к увеличению ΔE, то для аварийного снижения мощности турбины необходимо максимальное быстрое уменьшение ΔE. Как видно из выражения (1), для этого необ-

ходимо добиться уменьшения скорости воды на выходе из рабочего колеса v_2, увеличения скорости на выходе отсасывающей трубы v_5, максимального снижения высоты z_2 и увеличения потерь энергии в отсасывающей трубе Δh_{2-5}. Проанализируем эти возможности.

Подачей воздуха величину статической составляющей разрежения z_2 можно снизить до нуля, доводя давление под рабочим колесом до атмосферного. Поднятием давления выше атмосферного, z_2 можно сделать даже отрицательной и превратить эффект отсасывающей трубы $(+\Delta E)$ из восстанавливающего в тормозящий $(-\Delta E)$. Ограничивающими факторами здесь являются: допускаемая нагрузка на крышку турбины, возможность подброса ротора агрегата в сторону генератора и величина повышения напора из-за переходных процессов в напорном тракте при подаче воздуха.

Подача воздуха с точки зрения уменьшения ΔE благоприятно сказывается и на динамической составляющей $E_{дин}$ выражения (1):

$$E_{дин} = \frac{v_2^2 - v_5^2}{2g} - \Delta h_{2-5}.$$

Действительно, при повышении давления под рабочим колесом скорости выхода воды из рабочего колеса v_2 уменьшаются, скорости на выходе ее v_3 увеличиваются, растут потери в самой трубе, что в итоге приводит к уменьшению величины динамического разряжения.

На рис. 2 представлена осциллограмма снижения мощности гидроагрегата при подаче воздуха в отсасывающую трубу. Как видно, скорости снижения мощности в наиболее интересуемой зоне доходят до 0,15 N_0 за время 0,3 *сек*. В данном опыте начальная нагрузка на агрегате составляла 0,73 $N_{ном}$. Вакуум в отсасывающей трубе W_0 перед началом опыта составлял всего 0,2 *кг/см*^{2}. Давление подаваемого воздуха в рессивере $p_{вз.} = 2{,}5$ *атм*. Соотношение объемного расхода подаваемого воздуха, приведенного к давлению в отсасывающей трубе, к начальному расходу воды составило 0,48. С увеличением начальной нагрузки и давления подаваемого воздуха в рессивере растет интенсивность и величина снижения мощности турбины. Опыты показали, что гидроударные явления демпфируются аэрированным потоком воды.

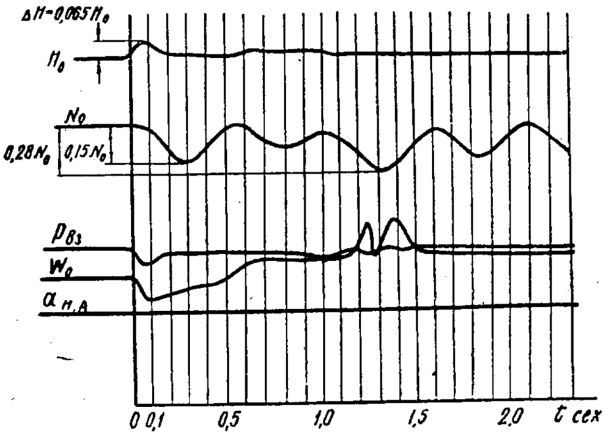


Рис. 2. Осциллограмма сброса мощности гидроагрегата вводом воздуха в отсасывающую трубу.

Максимальное повышение давления составило всего 6,5% от H_0. Это свидетельствует, что скорости аварийного снижения мощности гидротурбин при подаче воздуха в значительно меньшей степени ограничиваются гидроударными явлениями, чем при быстром закрытии направляющего аппарата для тех же целей (в опытах с подачей воздуха величина открытия направляющего аппарата $\alpha_{на}$ не менялась).

Подача воздуха перед рабочим колесом гидротурбины. Известно, что при равномерном вращении рабочего колеса мощность турбины, с

учетом гидравлических потерь в проточных частях, определяется основным ее уравнением:

$$N_т = \frac{Q\gamma}{g}(u_1 v_1 \cos\alpha_1 - u_2 v_2 \cos\alpha_2)..., \quad (2)$$

где Q — расход воды через турбину,

γ — объемный вес воды,

g — ускорение силы тяжести,

u_1, u_2 — окружные скорости на входе и выходе рабочего колеса,

α_1, α_2 — углы между скоростями v_1 и v_2 и касательными к соответствующим окружностям входа и выхода рабочего колеса.

При внезапном значительном снижении электрической нагрузки генератора меняются величины u_1 и u_2. После подачи воздуха в гидротурбину для соответственного снижения ее мощности из-за гидроударных процессов растет напор и, значит, растут скорости v_1 и v_2. Меняется объемный вес потока, проходящего через турбину. Для выяснения роли последнего обстоятельства все вышеуказанные факторы, кроме объемного веса, принимаем постоянными, т. е.

$$\frac{u_1 v_1 \cos\alpha_1 - u_2 v_2 \cos\alpha_2}{g} = C = \text{const}... \quad (3)$$

После этого основное уравнение гидротурбины [2] принимает вид

$$N_т = Q \cdot \gamma \cdot C... \quad (4)$$

Если в этом выражении произведение $Q\gamma$ рассмотреть как весовой расход воды, то при замене части воды через турбину воздухом при том же объемном расходе энергоносителя (при объемном расходе водовоздушной смеси, равной начальному объемному расходу воды) мощность турбины, с учетом принятых допущений, приблизительно запишется в виде

$$N_{твз.} = [(Q - Q_{вз.})\gamma + Q_{вз.}\gamma_{вз.}] \cdot C..., \quad (5)$$

где $Q_{вз.}$ и $\gamma_{вз.}$ — расход и объемный вес воздуха. Относительная величина сброса мощности турбины при замене части воды воздухом из выражений (4) и (5) составляет

$$\delta = \frac{N_т - N_{твз.}}{N_т} = \frac{Q_{вз.}(\gamma - \gamma_{вз.})}{Q \cdot \gamma}... \quad (6)$$

Известно, что объемный вес, температура и давление совершенных газов (и реальных газов в условиях, далеких от сжижения) связаны между собой уравнением Клапейрона

$$\gamma_{вз.} = \frac{p}{RT}, \quad (7)$$

где p и T — абсолютные давление и температура,

R — газовая постоянная, разная для различных газов, но независящая от температуры и давления.

Для воздуха $R = 29{,}27$ *м/град.*

В таблице 2 дается зависимость объемного веса воздуха от температуры (при давлении 735,5 *мм рт.* ст.).

Как видно из таблицы, в практически возможных пределах перемены температуры изменение объемного веса относительно невелико. Давление воздуха в воде, исходя из принятого допущения постоянства значения «C», получается постоянным. Поэтому согласно (7) величина объемного веса воздуха $\gamma_{вз}$ в выражении (6) принимается постоянной.

Объемный вес воды γ от изменения температуры и давления меняется незначительно и можно принять постоянным во всех случаях.

Таблица 2

Температура °С	0	10	20	30	40
Объемный вес $\gamma_{вз.}$ кг/м³	1,252	1,206	1,164	1,127	1,092

В качестве примера возьмем гидротурбину с номинальным объемным расходом воды $Q=100$ *м³/сек*. Если подать воздух перед рабочим колесом турбины при температуре 10°С, то эффект сброса мощности только по весовому расходу при замене 30% объемного расхода воды воздухом из (6) составит

$$\delta=\frac{30\cdot(999{,}73-3{,}61)}{100\cdot 999{,}73}=0{,}299,$$

где $\gamma=999{,}73$ *кг/м³*, $\gamma_{вз.}=3{,}61$ (из выражения 7).

Здесь рассмотрено влияние на мощность турбины только изменением весового расхода, фактически же подача воздуха перед рабочим колесом меняет не только весовой расход, но и КПД из-за изменения закрутки потока на входе и выходе колеса. Кроме того, ввод струи воздуха, обладающей определенной кинетической энергией, встречно потоку воды, снижает энергию последнего. А если же вводимую струю направить на тыловую сторону лопастей рабочих колес, то энергия струи создает тормозной эффект ротора агрегата. Как отмечалось, воздух во всех случаях, попадая после колеса в отсасывающую трубу, и здесь будет способствовать снижению мощности турбины.

При вводе воздуха возникают также явления, повышающие мощность турбины (положительный гидроудар в напорном тракте, некоторое упорядочение явлений в отсасывающей трубе и др.). Весь этот комплекс явлений с их взаимосвязью в данной работе не рассматривается, так же, как не рассматривается влияние изменений других факторов в выражении (2) при подаче воздуха.

На рис. 3 представлена осциллограмма изменения мощности агрегата при вводе воздуха перед рабочим колесом гидротурбины (сеч. 1—1, рис. 2). Воздух вводился у входного патрубка спиральной камеры, сравнительно далеко от рабочего колеса. В результате до тех пор, пока воздух не начинает поступать на лопасти колеса, мощность турбины возрастает. Это происходит благодаря повышению напора перед рабочим колесом. Для устранения предварительного заброса мощности турбины место ввода воздуха должно быть максимально приближено к рабочему колесу.

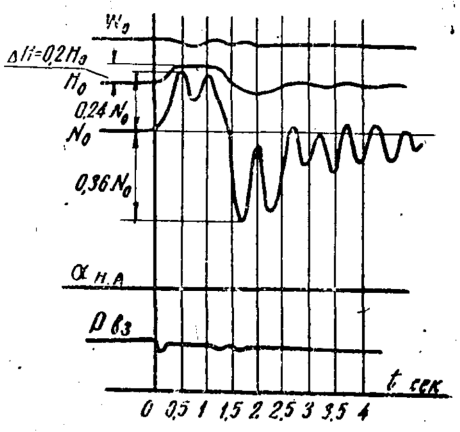


Рис. 3. Осциллограмма сброса мощности гидроагрегата вводом воздуха в область входного патрубка спиральной камеры.

При соотношении весовых расходов воздуха и воды $\frac{Q_{вз.}}{Q}=0{,}001$ амплитуда величины снижения мощности турбины (после начала поступления воздуха на рабочее колесо)

составила 0,36 N_0. Максимальное повышение мощности турбины (заброс) составило 0,24 N_0. Длительность времени заброса, в течение которого мощность турбины поддерживалась выше исходной величины, равна 1,5 *сек.* В данных опытах отсасывающая труба не могла играть существенной роли, так как вакуум под рабочим колесом перед подачей воздуха составлял всего $W_0 = 0{,}2$ *кг/см*^{2}, а давление в ней после попадания воздуха не поднималось выше атмосферного. Необходимо отметить, что величина повышения давления перед турбиной из-за гидроударных явлений в этих опытах имела существенное значение и доходила до 0,2 H_0.

Если величина и длительность времени заброса мощности говорят о необходимости приближения места ввода воздуха к рабочему колесу, то возникающая после заброса величина снижения мощности и ее характер свидетельствуют об эффективности данного мероприятия и целесообразности продолжения исследований в этом направлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев С. А., Сазонов М. И., Кантор Р. М. Сравнительная оценка различных мер увеличения устойчивости параллельной работы. «Электричество», 1933, № 15.

2. Жданов П. С. Устойчивость электрических систем. М.-Л., Госэнергоиздат. 1948.

3. Золотарев Т. Л., Тамадаев А. М. Повышение динамической устойчивости энергосистемы подачей воздуха в область рабочих колес гидротурбин. «Электрические станции», 1964, № 10.

4. Тамадаев А. М., Соколов А. Е. Аварийный впуск воздуха под рабочие колеса гидротурбины. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 5. Алма-Ата, «Наука», 1967.

5. Тамадаев А. М., Митин Ю. С., Трофимов Г. Г. Об использовании механических средств повышения динамической устойчивости энергосистем. Проблемы общей энергетики и единой энергетической системы, вып. 4. Алма-Ата, «Наука», 1968.

6. Тамадаев А. М. О влиянии аварийного регулирования гидротурбин на устойчивость электропередач. Проблемы общей энергетики и единой энергетической системы. вып. 2. Алма-Ата, «Наука», 1966.

7. Ковалев Н. Н. Гидротурбины. М.-Л., МашГИЗ, 1961.

SUMMARY

Decrease of power of the hydraulic turbine at the rate of 0.2 N_0 per 0.2 sec. may be reached by means of air injection in the area of its rotor wheel.

While delivering air ahead of the rotor wheel, the site of injection should be approached to the rotor wheel as near as possible in order avoid undesirable preliminary increase of power. Hydroshocks are considerably damped with air.

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
1970 *ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА* вып. 7.

Ю. А. РУБЦОВ

АВАРИЙНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ ГИДРОТУРБИНЫ ХОЛОСТЫМ ВЫПУСКОМ

В (1) был предложен способ кратковременного аварийного снижения мощности гидротурбины на основе использования эффекта отрицательного гидравлического удара. Удар этот создается быстрым отводом части потока воды водосбросным каналом из спиральной камеры или напорного трубопровода гидроагрегата в нижний бьеф. Такое воздействие на гидротурбину предназначено прежде всего для улучшения динамической устойчивости параллельной работы гидроагрегата с системой, но может быть использовано также и для других целей (например, для ускорения процесса ресинхронизации генераторов).

Инерция жидкости, заключенной в напорном водосбросном канале, оказывала отрицательное влияние на характер изменения мощности гидротурбины, уменьшая величину снижения ее и затягивая процесс во времени.

Здесь рассмотрен случай отвода воды от турбины непосредственно в атмосферу с помощью холостого выпуска. Оговоримся сразу, что условия работы холостого выпуска в данном случае отличны от обычно понимаемых. Как известно, холостой выпуск применяется на высоконапорных ГЭС для уменьшения заброса оборотов вала турбины при сбросах нагрузки, и расчет его производится из условия соблюдения гарантий регулирования (2). В нашем случае условием регулирования холостого выпуска является получение необходимого закона изменения мощности турбины во времени в аварийных ситуациях, не связанных с отключением генератора от сети. Этот закон (применительно к динамической устойчивости) зависит от тяжести аварии, режима работы станции, параметров оборудования и схемы связи ГЭС с системой, обеспеченности противоаварийными средствами и ряда иных факторов. Холостой выпуск не связан механически с направляющим аппаратом и управляется от общестанционных устройств противоаварийной автоматики. В этом назначении он может применяться на ГЭС любого типа.

Такой способ аварийного регулирования мощности турбины для улучшения устойчивости является, по существу, развитием идеи, выдвинутой в свое время Г. Г. Арутюняном (3). Согласно его исследованиям, снижение мощности турбины может быть достигнуто быстрым открытием направляющего аппарата за счет возникающего при увеличении расхода отрицательного гидроудара. Однако это предложение имеет ряд недостатков, относящихся, главным образом, к режимам максимальных нагрузок на агрегате и вызванных невозможностью существенно увеличить открытие направляющего аппарата (5). Дополнительно заметим, что расходные характеристики турбины имеют большую нелинейность в зоне максимальных открытий направляющего аппарата. Это не позволяет получить сколько-нибудь значительное изменение расхода через турбину даже в том случае, если имеется небольшой запас по открытию направляющего аппарата. Отметим также, что мощность тур-

бины в этом случае уменьшается только за счет снижения напора, в то время как расход через турбину увеличивается.

Регулирование мощности турбины холостым выпуском не имеет принципиальных ограничений в величине снижения мощности, поскольку всегда есть возможность увеличить площадь выпускного отверстия холостого выпуска. При этом уменьшение напора достигается увеличением расхода воды через напорный трубопровод, в то время как расход через турбину будет уменьшаться за счет сниженного напора. Таким образом, здесь оба компонента (и напор и расход) изменяются в направлении уменьшения мощности турбины.

Ниже приведены уравнения, позволяющие при заданном законе изменения положения регулирующих органов холостого выпуска и турбины во времени определить изменение мощности турбины в неустановившемся режиме с учетом упругих свойств воды и материала трубопровода. Вывод этих уравнений для упрощения выкладок рассмотрим на примере гидроустановки, состоящей из «простого» напорного трубопровода со свободной поверхностью в верхнем сечении (конец трубопровода), активной турбины и холостого выпуска. Переход от реального трубопровода к эквивалентному «простому» осуществляется с помощью соотношений, приведенных в (4).

Общие интегралы дифференциальных уравнений гидроудара в «простом» трубопроводе с учетом общепринятых допущений для сечения в начале трубопровода имеют вид

$$H = H_0 + F(t) + f(t)$$
$$V = V_0 - \frac{g}{a}[F(t) - f(t)]. \qquad (1)$$

Здесь $F(t)$ и $f(t)$ — значения прямой и обратной волн давления, распространяющихся со скоростью a: первая — вверх по трубопроводу, вторая — в обратном направлении для сечения в начале трубопровода в момент времени t; H, V — напор и скорость в неустановившемся режиме. Индексом «0» помечены параметры в установившемся режиме.

При выводе основных дифференциальных уравнений гидроудара игнорируется влияние сил трения жидкости и не учитывается скоростной напор при переходе от сил давления к напору, так как учет этих факторов не позволяет получить общее решение задачи в конечном виде. Обычно предполагают, что потери напора в трубопроводе и скоростной напор не меняются в неустановившемся режиме и тогда эти факторы учтены в H_0. Для гидротурбинных установок потери напора и скоростной напор незначительны. Тем более мала разница между значениями этих величин в неустановившемся и установившемся режимах при небольшом изменении скорости в трубопроводе, что имеет место в нашем случае.

Запишем уравнения расходов воды через холостой выпуск и активную турбину:

$$Q_{хв} = \mu \omega_1 \sqrt{2gH}, \qquad (2)$$
$$Q_т = f(\alpha)\sqrt{2gH}. \qquad (3)$$

Здесь $Q_{хв}$ — расход через холостой выпуск,

$Q_т$ — расход через турбину,

μ — коэффициент расхода холостого выпуска. Величина его определяется по формуле $\mu = \frac{1}{\sqrt{\varsigma_г + \frac{1}{\mu_{ро}^2}}}$, где $\mu_{ро}$ — коэффициент расхода регулирующего органа, $\varsigma_г$ — суммарный коэффициент других видов гидравлических сопротивлений. Величина $\mu_{ро}$ зависит от типа регу-

лирующего органа и изменяется в зависимости от степени его открытия,

ω_1 — площадь поперечного сечения холостого выпуска,

$f(\alpha)$ — функция, зависящая от перемещения α регулирующего органа турбины.

Расход воды через напорный трубопровод, турбину и холостой выпуск связаны между собой уравнением неразрывности потока.

$$V\cdot\omega = Q_{хв}+Q_т. \qquad (4а)$$

Откуда

$$V=(\varphi+\psi)\sqrt{2gH}, \qquad (4)$$

где $\varphi=\frac{f(\alpha)}{\omega}$, $\psi=\mu\frac{\omega_1}{\omega}$ — функции, учитывающие регулирование расхода турбиной и холостым выпуском,

ω — площадь поперечного сечения трубопровода.

Уравнения (1) и (4), а также условие $H(L)=const=H_0$, касающееся конца трубопровода, позволяют рассмотреть процессы, происходящие в напорной системе при движении регулирующих органов холостого выпуска и турбины.

В первой фазе ($0\leqslant t<\tau$) обратная волна в начале трубопровода отсутствует ($f(t)=0$). Исключая в (1) $F(t)$ и подставляя V из уравнения (4), получим:

$$H(t)=H_{max}+\frac{a^2}{g}(\varphi+\psi)^2-\frac{a}{g}(\varphi+\psi)\sqrt{a^2(\varphi+\psi)^2+2gH_{max}}. \qquad (5)$$

Здесь $\tau=\frac{2L}{a}$ — длительность фазы гидроудара в трубопроводе,

L — длина трубопровода.

$$H_{max}=H_0+\frac{a\,v_0}{g}.$$

Перед корнем в (5) следует принимать знак минус как единственно отвечающий физическим условиям.

Во второй фазе ($\tau\leqslant t<2\tau$) значение $f(t)$ в (1) равно значению $F(t-\tau)$. Это позволяет снова исключить из уравнений (1) $F(t)$ и получить выражение для напора во второй фазе в виде

$$H(t)=H_{max}-2\Phi+\frac{a^2}{g}(\varphi+\psi)^2-\frac{a}{g}(\varphi+\psi)\sqrt{a^2(\varphi+\psi)^2+2g(H_{max}-2\Phi)},$$

где

$$\Phi=H(t-\tau)-H_0.$$

Производя подобные выкладки для последующих фаз, можно заметить общую закономерность и записать выражение для напора в общем виде

$$H(t)=H_{max}-2\Phi(t)+\frac{a^2}{g}(\varphi+\psi)^2-$$

$$-\frac{a}{g}(\varphi+\psi)\sqrt{a^2(\varphi+\psi)^2+2g\,[H_{max}-2\Phi(t)]}$$

$$\Phi(t)=H(t-\tau)-H_0+\Phi(t-\tau). \qquad (6)$$

При

$$t<\tau\,\Phi(t-\tau)=0, H(t-\tau)=H_0.$$

Мощность турбины в неустановившемся режиме определяется по формуле (7) для стационарного режима

$$N_т=9{,}81\,\eta Q_т H. \qquad (7)$$

Здесь η — коэффициент полезного действия турбины.

Для вычисления расхода через радиально-осевую турбину Г. И. Кривченко в (4) предлагает следующую формулу:

$$Q_т = Q_т(\alpha)\cdot Q_т(H) = Q_т(\alpha)\cdot\left[1 + b\frac{H-H_0}{H_0}\right], \tag{8}$$

где $Q_т(\alpha)$ — функция, зависящая от открытия направляющего аппарата турбины при напоре H_0.

b — постоянный для данного типа турбины коэффициент. При отрицательном ударе величина его может быть найдена по приближенной формуле

$$b \approx \left(1{,}1 - \frac{n_s}{600}\right),$$

где

n_s — коэффициент быстроходности турбины.

Используя вместо (3) уравнение (8), аналогичным путем получим уравнения для напора в случае регулирования мощности радиально-осевой турбины.

$$H(t) = H_0 + \frac{V_0 - \varphi - \frac{2g}{a}\Phi(t)}{\varphi_1} + g\frac{\psi^2}{\varphi_1^2} - \frac{\psi}{\varphi_1}\sqrt{\frac{g^2\psi^2}{\varphi_1^2} + 2g\left[H_0 + \frac{V_0 - \varphi - \frac{2g}{a}\Phi(t)}{\varphi_1}\right]}$$

$$\Phi(t) = H(t-\tau) - H_0 + \Phi(t-\tau). \tag{9}$$

Здесь

$$\psi = \mu\frac{\omega_1}{\omega},$$

$$\varphi = \frac{Q_т(\alpha)}{\omega},$$

$$\varphi_1 = \frac{g}{a} + \frac{b}{H_0}\varphi.$$

Формулы (9) не учитывают влияния отсасывающей трубы на изменение напора в неустановившемся режиме. Это влияние, как показано в (4), для радиально-осевых турбин незначительно и им можно пренебречь.

В низконапорных установках с поворотно-лопастными турбинами учет влияния отсасывающей трубы, на которую приходится значительная доля изменения напора в динамике, считается обязательным. Обычно в этом случае пренебрегают упругими свойствами воды и материала водоводов. Записывая уравнения «жесткого» удара для напорного водовода (10) и отсасывающей трубы (11), уравнения расхода через турбину (12) и холостой выпуск (13), а также уравнение неразрывности (14), получим совместную систему уравнений. Она отражает переходный процесс в низконапорной установке при регулировании мощности турбины холостым выпуском.

$$\begin{cases} H_н - H_{но} = -\dfrac{1}{g}\displaystyle\int_0^{L_н}\frac{ds}{\omega_н}\frac{dQ_н}{dt} & (10) \\ H_в - H_{во} = -\dfrac{1}{g}\displaystyle\int_0^{L_в}\frac{ds}{\omega_в}\frac{dQ_т}{dt} & (11) \end{cases}$$

$$\begin{cases} Q_т = \bar{Q}_т \sqrt{H_н + H_в} & (12) \\ Q_{хв} = \mu\, \omega_1 \sqrt{2g H_н} & (13) \\ Q_н = Q_т + Q_{хв} & (14) \end{cases}$$

Начальные условия: $t=0$, $H_н = H_{но}$, $H_в = H_{во}$, $\mu = \mu_0$. Здесь индекс «н» относится к напорному водоводу, индекс «в» к отсасывающей трубе. $\int_0^{L_н} \frac{ds}{\omega_н}$ и $\int_0^{L_в} \frac{ds}{\omega_в}$ — постоянные величины, характеризующие геометрию проточной части напорного водовода и отсасывающей трубы.

В уравнении (12) $\bar{Q}_т$ — сложная функция от положения регулирующих органов поворотно-лопастной турбины и угловой скорости вращения, определяемая по статическим характеристикам турбины. Допуская, что регулирование мощности турбины производится только холостым выпуском и предполагая постоянство угловой скорости вращения, Q можно считать постоянной величиной.

Мощность турбины находится по выражению (7), где $H = H_н + H_в$.

Исключая в уравнениях (10—14) $H_н$, $H_в$ и $Q_{хв}$, получим систему двух нелинейных дифференциальных уравнений (15), которую нетрудно решить с помощью ЦВМ (например, методом Рунге-Кутта).

$$\begin{cases} \dfrac{dQ_н}{dt} = -\dfrac{g}{\int_0^{L_н} \frac{ds}{\omega_н}} \left[\dfrac{(Q_н - Q_т)^2}{2g\,\omega_1^2\,\mu^2(t)} - H_{но} \right] \\ \dfrac{dQ_т}{dt} = -\dfrac{g}{\int_0^{L_в} \frac{ds}{\omega_в}} \left[\dfrac{Q_т^2}{\bar{Q}_т^2} - \dfrac{(Q_н - Q_т)^2}{2g\,\omega_1^2\,\mu^2(t)} - H_{во} \right] \end{cases} \qquad (15)$$

Начальные условия:

$$t = 0,\ \mu = \mu_0,\ Q_{то} = \bar{Q}_{то} \sqrt{H_{но} + H_{во}},\ Q_{но} = Q_{то} + \mu_0\, \omega_1 \sqrt{2g H_{но}}.$$

Ниже приводится пример, иллюстрирующий технику выполнения расчетов, для случая регулирования мощности радиально-осевой турбины холостым выпуском при неподвижном направляющем аппарате.

Исходные данные

По напорному трубопроводу (принято, что реальный трубопровод сведен к «простому»).

Длина $L = 120$ *м*.

Скорость распространения волны гидроудара $a = 1000$ *м/сек*.

Диаметр $d = 7$ *м*, площадь поперечного сечения $\omega = \frac{\pi d^2}{4} = 38{,}5$ *м*^{2}.

Расчетная скорость в установившемся режиме $V_0 = 6{,}18$ *м/сек*.

По турбине.

Тип турбины — РО-660.

Коэффициент быстроходности $n_s = 218$.

Мощность турбины в установившемся режиме $N_{то} = 204$ *Мвт*.

Напор $H_0 = 96$ *м*.

Расход $Q_{то} = 238$ *м*^{3}*/сек*.

К П Д в установившемся режиме $\eta = 0{,}91$.

По холостому выпуску.

Регулирующим органом холостого выпуска является затвор с не-

симметричными дисками с соотношением $\frac{b}{d}=0{,}15$ (6). Диаметр затвора $d_1=1{,}2$ *м*. Площадь поперечного сечения $\omega_1=\frac{\pi d_1^2}{4}=1{,}1304$ *м*^{2}. Зависимость угла поворота диска (Θ) от времени — линейная.

$$\begin{cases}\Theta=90^\circ\left(1-\frac{1}{T_0}\right) & \text{при } t\leqslant T_0\\ \Theta=0 & \text{при } t>T_0\end{cases} \tag{16}$$

Полное время открытия затвора $T_0=0{,}18$ *сек*.

На основании этих данных вычисляем величины, необходимые для расчета.

Длительность фазы гидроудара

$$\tau=\frac{2L}{a}=\frac{2{,}120}{1000}=0{,}24\ сек.$$

Коэффициент в формуле (8)

$$b=1{,}1-\frac{n_s}{600}=1{,}1-\frac{218}{600}=0{,}737.$$

Функция ψ

$$\psi=\mu(\Theta)\frac{\omega_1}{\omega}=\mu(\Theta)\cdot\frac{1{,}1304}{38{,}5}=0{,}02936\,\mu(\Theta). \tag{17}$$

Значения коэффициента расхода μ в зависимости от угла поворота диска принимаются согласно рекомендациям (6)*.

Функция φ

$$\varphi=\frac{Q_T(\alpha)}{\omega}=\frac{Q_{T0}}{\omega}=V_0=\text{const}=6{,}18\ м/сек.$$

Функция φ_1

$$\varphi_1=\frac{g}{a}+\frac{b}{H_0}\varphi=\frac{9{,}81}{1000}+\frac{0{,}737\cdot 6{,}18}{96}=0{,}0572\ 1/сек.$$

Дальнейший ход расчета ясен из таблицы 1. В графе 1 таблицы фиксируется время с момента начала движения затвора холостого выпуска. Для получения подробной картины переходного процесса, особенно вначале, интервал времени расчета должен быть достаточно малым. Затем его можно увеличить. В графе 5 фиксируются сопряженные моменты времени, отстоящие на промежуток τ. В графе 2 по формуле (16) вычисляются углы поворота диска Θ, в графе 3 — соответствующие этим углам коэффициенты расхода μ и в графе 4 — значения функции Ψ по формуле (17). В графах 6 и 7 фиксируются значения Φ и H в момент времени $(t-\tau)$. В графах 8 и 9 вычисляются значения $\Phi(t)$ и $H(t)$ по формулам (9). В графе 10 вычисляется расход через турбину по формуле (8), в графе 11 — мощность по формуле (7).

Характер изменения мощности турбины и других переменных во времени иллюстрируется рисунком 1. Из рисунка следует, что даже при относительно небольшом диаметре холостого выпуска (1,2 *м*) достигается значительное снижение мощности турбины.

Результаты расчета примера показывают, что предлагаемый способ аварийного регулирования мощности турбины будет эффективным средством улучшения динамической устойчивости параллельной работы гидроагрегата с системой.

---

* В примере принято $\varsigma_T=0$

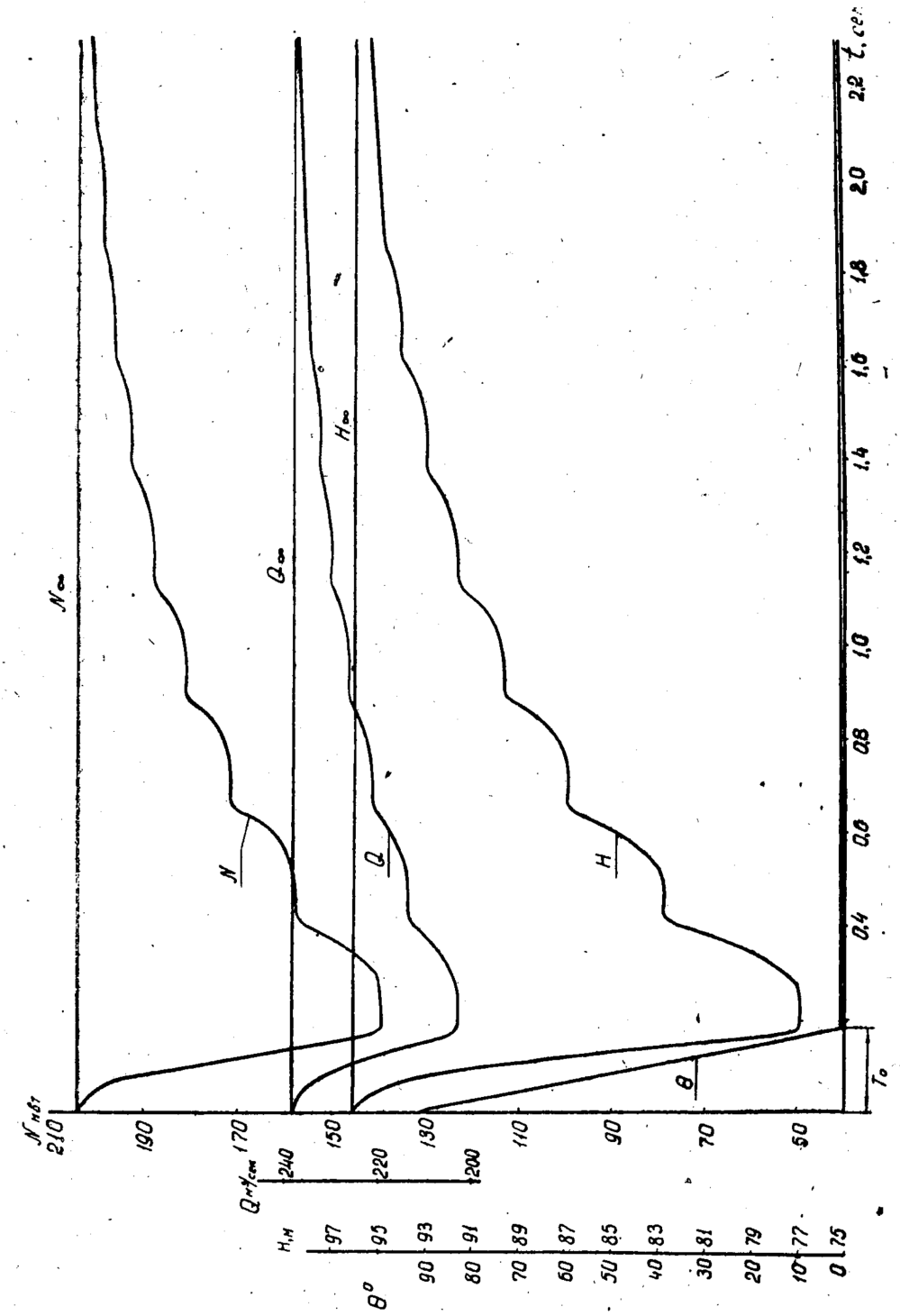


Рис. 1. Зависимости θ, H, Q и N от времени.

Таблица 1

t, сек.	θ, град	μ	ψ	$(t-\tau)$, сек	$\Phi(t-\tau)$, м	$H(t-\tau)$, м	$\Phi(t)$, м	H, м	Q, м³/сек	N, Мвт
0,00	90	0	0	—	0	96	0	96	238	204
0,02	80	0,010	0,00029	—	0	96	0	95,777	237,5	203,15
0,04	70	0,035	0,00103	—	0	96	0	95,223	236,58	201,11
0,06	60	0,085	0,00250	—	0	96	0	94,125	234,58	197,11
0,08	50	0,190	0,00558	—	0	96	0	91,860	228,97	187,77
0,10	40	0,310	0,00910	—	0	96	0	89,339	225,83	180,11
0,12	30	0,490	0,01439	—	0	96	0	85,688	220,95	169,01
0,14	20	0,700	0,02055	—	0	96	0	81,622	211,73	154,28
0,16	10	0,876	0,02572	—	0	96	0	78,259	205,58	143,63
0,18	0	0,960	0,02819	—	0	96	0	76,855	203,04	139,32
0,20	0	0,960	0,02819	—	0	96	0	76,865	203,04	139,32
0,22	0	0,960	0,02819	—	0	96	0	76,865	203,04	139,32
0,24	0	0,960	0,02819	0	0	96	0	76,865	203,04	139,32
0,28	0	0,960	0,02819	0,04	0	95,223	— 0,7767	77,103	203,47	140,05
0,32	0	0,960	0,02819	0,08	0	91,860	— 4,1396	78,129	205,35	143,22
0,36	0	0,960	0,02819	0,12	0	85,688	—10,3119	80,015	208,79	149,14
0,40	0	0,960	0,02819	0,16	0	78,259	—17,7413	82,288	212,95	156,43
0,44	0	0,960	0,02819	0,20	0	76,865	—19,1346	82,714	213,73	157,81
0,48	0	0,960	0,02819	0,24	0	76,865	—19,1346	82,714	213,73	157,81
0,52	0	0,960	0,02819	0,28	— 0,7767	77,103	—19,6742	82,880	214,02	158,35
0,56	0	0,960	0,02819	0,32	— 4,1396	78,129	—22,0109	83,600	215,34	160,70
0,60	0	0,960	0,02819	0,36	—10,3119	80,015	—26,2969	84,909	217,74	163,04
0,64	0	0,960	0,02819	0,40	—17,7413	82,288	—31,4537	86,491	220,63	170,35
0,68	0	0,960	0,02819	0,44	—19,1346	82,714	—32,4205	86,788	221,17	171,36
0,72	0	0,960	0,02819	0,48	—19,1346	82,714	—32,4205	86,788	221,17	171,36
0,76	0	0,960	0,02819	0,52	—19,6742	82,880	—32,7947	86,903	221,38	171,75
0,80	0	0,960	0,02819	0,56	—22,0109	83,596	—34,4154	87,401	222,29	173,44
0,88	0	0,960	0,02819	0,64	—31,4537	86,491	—40,9623	89,413	225,96	180,36
0,96	0	0,960	0,02819	0,72	—32,4205	86,788	—41,6324	89,619	226,34	181,08
1,04	0	0,960	0,02819	0,80	—34,4154	87,401	—43,0143	90,044	227,12	182,57
1,12	0	0,960	0,02819	0,88	—40,9623	89,413	—47,5493	91,439	229,67	187,48
1,20	0	0,960	0,02819	0,96	—41,6324	89,619	—48,0134	91,583	229,93	188,04
1,28	0	0,960	0,02819	1,04	—43,0143	90,044	—48,9703	91,877	230,47	189,08
1,36	0	0,960	0,02819	1,12	—47,5493	91,439	—52,1103	92,846	232,24	192,54
1,44	0	0,960	0,02819	1,20	—48,0134	91,583	—52,4306	92,943	232,41	192,84
1,52	0	0,960	0,02819	1,28	—48,9703	91,877	—53,0931	93,147	232,79	193,57
1,60	0	0,960	0,02819	1,36	—52,1103	92,845	—55,2658	93,817	234,01	195,99
1,84	0	0,960	0,02819	1,60	—55,2658	93,817	—57,4486	94,520	235,30	198,54
2,08	0	0,960	0,02819	1,84	—57,4486	94,520	—58,9287	94,947	236,08	200,10
2,32	0	0,960	0,02819	2,08	—58,9287	94,947	—59,9822	95,272	236,68	201,57
2,56	0	0,960	0,02819	2,32	—59,9822	95,272	—60,7103	95,496	237,08	202,11
2,80	0	0,960	0,02819	2,56	—60,7103	95,496	—61,2147	95,652	237,36	202,68
3,04	0	0,960	0,02819	2,80	—61,2147	95,652	—61,5631	95,759	237,56	203,10
3,28	0	0,960	0,02819	3,04	—61,5631	95,759	— 61,8038	95,834	237,67	203,35
3,52	0	0,960	0,02819	3,28	—61,8038	95,834	—61,9701	95,885	237,79	203,54
3,76	0	0,960	0,02819	3,52	—61,9701	95,885	—62,0854	95,921	237,86	203,67
4,00	0	0,960	0,02819	3,76	—62,0854	95,921	—62,1647	95,945	237,90	203,76
4,24	0	0,960	0,02819	4,00	—62,1647	95,945	—62,2199	95,962	237,93	203 83

ЛИТЕРАТУРА

1. Рубцов Ю. А., Тамадаев А. М. Аварийный сброс мощности гидротурбин отводом части потока воды для повышения динамической устойчивости электропередачи. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 6. Алма-Ата, «Наука», 1968.

2. Жмудь А. Е. Гидравлический удар в гидротурбинных установках. М., Госэнергоиздат, 1953.

3. Арутюнян Г. Г. Исследование влияния воздействия регулирующего органа гидротурбины на динамическую устойчивость гидроэнергосистемы. Сб. работ по вопросам электромеханики, вып. 1. М., Госэнергоиздат, 1958.

4. Кривченко Г. И. Гидравлический удар и рациональные режимы регулирования турбин гидроэлектростанций. М., Госэнергоиздат, 1951.

5. Тамадаев А. М. О влиянии аварийного регулирования гидротурбин на устойчивость электропередач. Проблемы общей энергетики и единой энергетической системы. вып. 2. Алма-Ата, «Наука», 1966.

6. Яньшин Б. И. Гидродинамические характеристики затворов и элементов трубопроводов. М., «Машиностроение», 1965.

SUMMARY

Some formulas are suggested for calculation of the hydraulic turbine emergency power decrease when it is controlled by means of an idle discharge.

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
1970 *ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА* вып. 7.

А. М. ТАМАДАЕВ, А. Т. КУЗЬМИЧЕВ, Г. Г. ГАМБУРГЕР

РЕКОНСТРУКЦИЯ ГИДРОТУРБИНЫ ТИПА РО82 — ГМ50

При Казахском научно-исследовательском институте энергетики сооружена опытная ГЭС на реке Малая Алматинка, в горной части города Алма-Аты. Опытная ГЭС создана для проведения исследований, связанных с режимами эксплуатации ГЭС в энергообъединениях, с повышением устойчивости параллельной работы, с испытанием новых типов аппаратов автоматического регулирования, с решением вопросов моделирования гидроагрегатов и т. д. Для проведения этих работ в машинном зале установлена гидравлическая турбина мощностью 740 *квт* при расчетном напоре 57,5 *м* и расходе воды 1,5 *м*^{3}/*сек*. Турбина типа РО82-ГМ 50 снабжена регулятором скорости типа РС-250 и соединена с синхронным генератором типа ГС 118/44-6 мощностью 925 *квт* при напряжении 6,0 *кв* и скоростью вращения 1000 оборотов в минуту.

Установленная на опытной ГЭС гидротурбина РО82-ГМ50 относится к партии машин, изготовленных в 1962 году Уральским заводом гидромашин. В конструкцию этих машин завод внес конструктивные изменения отдельных ее узлов, которые не прошли должного апробирования в условиях монтажа и эксплуатации на гидростанциях. В результате этого в процессе монтажа и опробования гидроагрегата на опытной ГЭС института были выявлены конструктивные дефекты, не позволявшие ввести машину в нормальную эксплуатацию. Они относятся, главным образом, к узлу радиально-упорного подшипника, жесткости рабочего вала, к качеству уплотнительных элементов турбины, устройствам для фильтрации воды технического водоснабжения агрегата, а также к качеству изготовления автоматического регулятора скорости.

Заводской конструкцией рассматриваемой турбины предусмотрена установка радиально-упорного подшипника качения (рис. 1), состоящего из разъемного корпуса (1), внутри которого монтируются три обычных, широко применяемых в машиностроении, радиально-упорных подшипника (2) типа 7524. Они закрепляются на шейке вала с помощью нарезной гайки (3) и распорных колец (4). Внешние кольца роликоподшипников фиксируются на отдельных распорных кольцах (5) с подтяжкой через торцевые разъемные крышки (6). Смазка подшипникового узла естественная, выполняемая заливкой машинного масла. Корпус подшипника устанавливается на фундаментной плите, скрепленной посредством анкерных болтов с бетонной опорой.

Подшипниковый узел этой конструкции поставлен заводом взамен ранее применявшегося радиально-упорного подшипника скольжения, который имел неудовлетворительные эксплуатационные характеристики.

Преобладающей нагрузкой на подшипниковый узел является осевое усилие, передаваемое от рабочего колеса турбины. Радиальное усилие, действующее от веса вращающихся масс турбины, относительно невелико и составляет всего около 20% по отношению к осевому усилию. По этим соображениям в заводской конструкции подшипникового

узла устанавливается два спаренных конических роликоподшипника с расчетом на совместное восприятие ими осевого усилия турбины. Третий упорный роликоподшипник устанавливается для ограничения перемещения ротора агрегата в сторону генератора при возникновении режимов с обратными осевыми усилиями. Следует заметить, что в практике конструирования подшипниковых узлов установка двух обычных спаренных конических подшипников, рассчитанных на совместное восприятие одностороннего усилия, применения не имеет. Это объясняется требованием высокой точности подшипников качения и монтажа узла, на что обычные роликовые подшипники не рассчитаны.

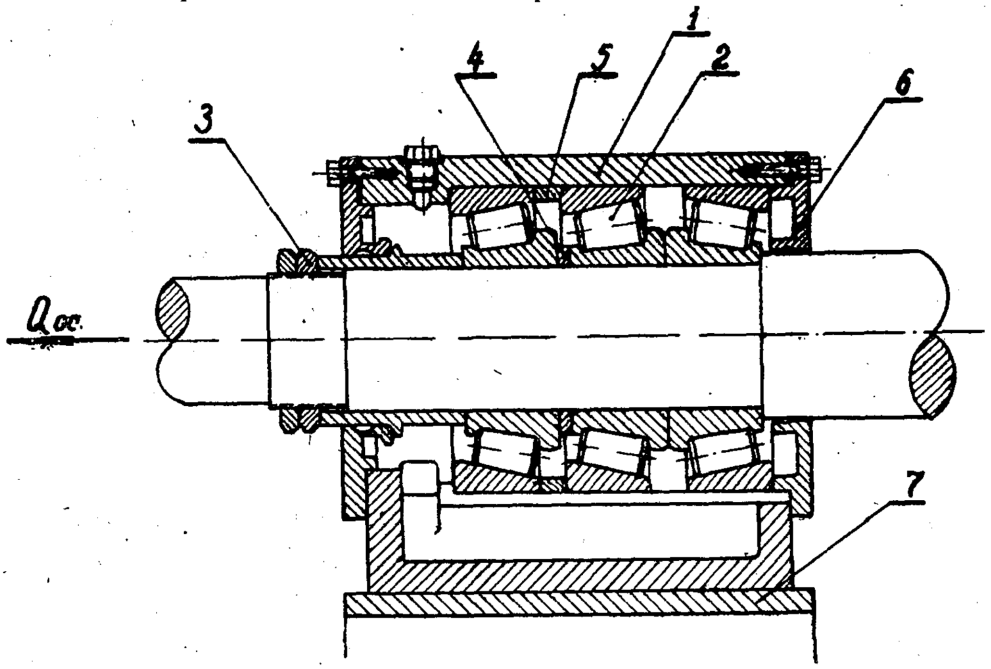


Рис. 1. Заводская конструкция радиально-упорного подшипникового узла.

В заводской конструкции подшипникового узла нет каких бы то ни было конструктивных средств регулировки равномерной подтяжки роликоподшипников. Поэтому осевое усилие турбины воспринимается не двумя, а только одним подшипником. Из-за разъемной конструкции корпуса и разъемных торцевых крышек не представляется также возможным устранить при монтаже перекосы посадки внешних колец конических роликоподшипников. В результате указанных конструктивных дефектов подшипникового узла при пробном пуске агрегата роликовые подшипники перегревались. На поверхности подшипниковых колец сохранились следы перегрева до цвета побежалости (310—320°С). Многократные попытки добиться путем тщательного монтажа подшипникового узла нормальной его работы не дали необходимых результатов.

На модельных установках гидроагрегатов с целью сохранения соотношений потерь в подшипниках и сальниках к общей величине мощности турбинного потока, примерно такой же, как в натуре, применяют подшипники, обладающие минимальными потерями. Поэтому в институте было принято решение данный узел реконструировать в новом варианте на подшипниках качения, имеющих меньшие потери по сравнению с подшипниками скольжения.

За основу узла радиально-упорного подшипника (рис. 2) был принят

один сферический двухрядный роликоподшипник (1) типа 3630, смонтированный в обычном разъемном корпусе (2) усиленной конструкции. Подшипник крепится на валу турбины с упором в резьбовую гайку (3).

Выбор самоустанавливающегося сферического подшипника, который допускает некоторую несоосность корпуса, значительно упростил условия монтажа всего подшипникового узла. Он выставляется на опоре, не связанной с корпусом турбины. В реконструкции применена система водяного охлаждения масляной ванны и принудительной циркуляции масла. Она производится путем вращающегося смазочного кольца (4) и масло-сбрасывающего скребка (5). Роликоподшипник допускает осевой люфт до 1,2 *мм*. При установке рабочего колеса турбины выдержаны соответствующие зазоры, исключающие его задир в посадочных расточках спиральной камеры.

Для увеличения долговечности использования подшипника была дополнительно разработана и осуществлена конструкция гидравлического разгрузочного устройства осевого усилия (рис. 2).

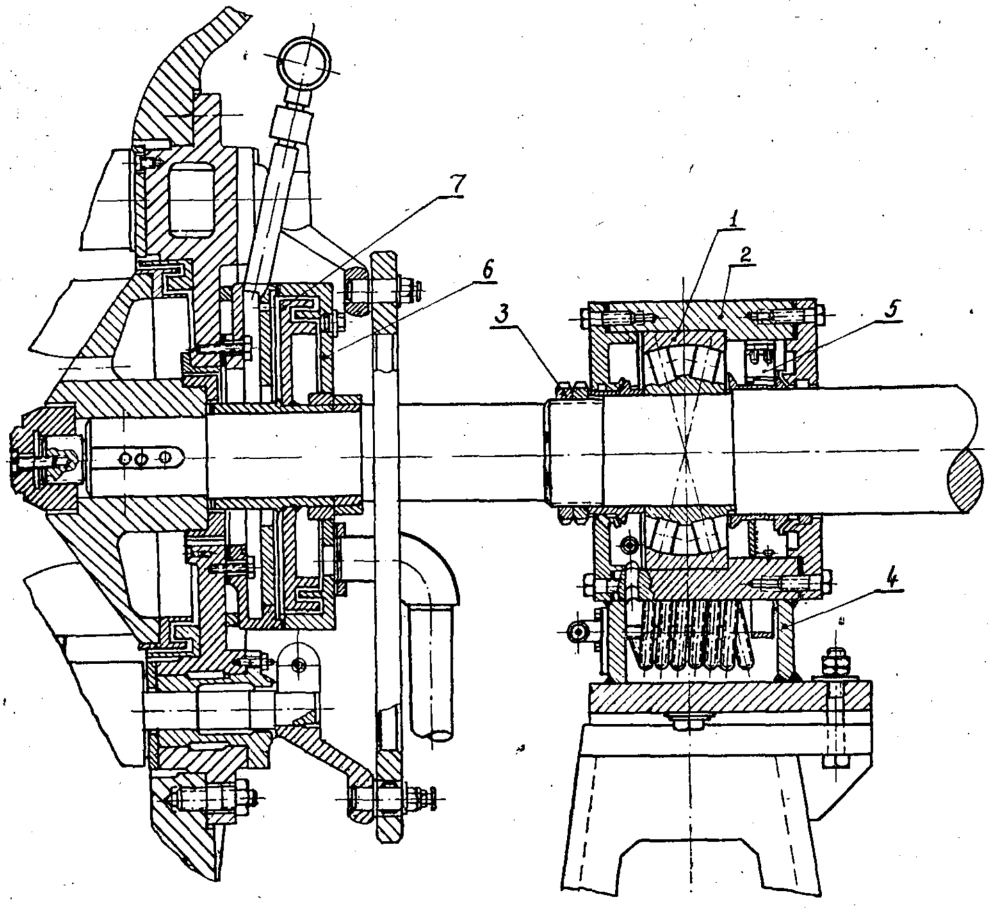


Рис. 2. Радиально-упорный подшипник, выполненный сочетанием двухрядного сферического роликоподшипника с разгрузочным устройством на турбине.

Это устройство действует по принципу использования противодавления жидкости на поверхность вращающегося диска вала турбины. Разгрузочное устройство состоит из корпуса (6), скрепленного со спиральной камерой, диска (7), жестко посаженного на валу турбины, ла-

биринтного уплотнения между корпусом и диском, систем подвода жидкости под давлением в камеру корпуса и дренажной. Контроль работы разгрузочного устройства выполняется по показанию величины манометрического давления в камере. Управление величиной разгрузки осевого усилия турбины производится регулированием расхода подводимой жидкости к разгрузочному устройству, в зависимости от чего поддерживается требуемая величина давления в камере. Опыт эксплуатации и расчеты показали высокую эффективность применения разгрузочного устройства. Расход воды на его работу, определяемый величиной протечек через уплотнительные устройства, незначительный. Механические (дисковые) потери при его работе, как показали расчеты, не превышают 0,2% мощности турбины. Эксплуатация гидроагрегата в течение 4000 часов показала вполне удовлетворительную работу реконструированного радиально-упорного подшипника и гидравлического разгрузочного устройства осевого усилия турбины.

Рабочий вал ротора турбины, имея консоль 750 *мм* от точки опоры в радиально-упорном подшипнике до места посадки рабочего колеса, был прослаблен заводом.

Ротор турбины при прохождении критических скоростей вращения получал недопустимую вибрацию. Вибрация консоли вала привела к местному задиру вала и рабочего колеса в посадочных местах спиральной камеры. По согласованию с заводом-изготовителем вал заменен на другой — увеличенной жесткости.

После двух-трехмесячной эксплуатации износ лабиринтных уплотнений рабочего колеса привел к увеличению зазоров, значительно превосходящих технические нормы. Установка уплотнительных колец, наплавленных высокотвердым сплавом, повысила устойчивость уплотнений к износу при тех же условиях примерно в четыре раза. Это говорит о том, что завод при изготовлении турбины недостаточно уделил внимания надежности работы гидроагрегата в эксплуатации. Совершенно ясно, что завод должен выполнять уплотняющие узлы из износостойких материалов. Повышенный износ, как, впрочем, и другие недостатки агрегата, в начале эксплуатационного периода электростанции (когда еще не налажены ремонтные службы, не накоплен опыт эксплуатации и т. д.), доставляют особенно большие хлопоты и приводят к технико-экономическому ущербу.

Заводская конструкция сетчатых фильтров для технического снабжения турбины водой оказалась полностью неработоспособной. Она круглогодично забивалась песком, а в зимнее время еще и шугой. Взамен такого фильтра был разработан и установлен гидроциклонный фильтр. Длительная эксплуатация подтвердила его надежную работу.

Регулятор скорости РС-250, поставленный заводом, потребовал больших дополнительных работ по устранению многочисленных дефектов. Потребовалось произвести доводку главного золотника, золотников клапанной коробки и катаракта, кинематики рычагов управления. Произведенная заводом покраска оказалась немаслостойкой. Окрашенные поверхности деталей растворялись и отслаивались, загрязняя масляную систему.

Выводы

На крупномасштабных моделях применение подшипников качения ограничивается допускаемыми нагрузками и скоростью вращения турбины. Поскольку модельные установки подвергаются частым демонтажам (для изменения исследуемых схем), то на этих установках целесо-

образно применять сферические самоустанавливающиеся подшипники качения, упрощающие условия центровки.

Выполненная схема сочетания подшипников качения с гидростатическими подшипниками (разгрузочное устройство) показала, что она дает удовлетворительное решение проблемы моделирования механических потерь гидроагрегатов. Возможна схема полной замены упорных подшипников скольжения гидростатическими подшипниками. Заводская конструкция подшипникового узла, составленного из трех конических роликоподшипников, оказалась непригодной к эксплуатации.

Описанные в статье недостатки агрегата свидетельствуют, что завод «Уралгидромаш» выпустил неопробованное и дефектное оборудование. Здесь указан вариант их реконструкции, осуществленный в институте и оправдавший себя в эксплуатации.

SUMMARY

Combination of hudrostatic bearing (unloading device of axial stress) with spherical self-setting ballbearing may be used instead of a faulty radial-thrust three-row bearing which may be found in many hudraulic turbines manufactured by the "Uralgidromash" Works. Thus assembling conditions are much simplified and correlations of mechanical losses in the semi-industrial model plant with the full-scale ones are retained.

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
1970 *ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА* вып. 7.

Т. А. ФЕДОРОВА

ВИНТООБРАЗНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПОТОКА С ПЕРЕМЕННЫМ РАСХОДОМ В ОТКРЫТОМ КАНАЛЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Большой практический интерес представляет безнапорное движение потока с переменным расходом в длинных каналах, когда дополнительная масса жидкости поступает в канал через щель или отверстия, расположенные на боковой стенке у его дна. Такое движение, например, осуществляется в промывных галереях пескогравиеловок и в донных промывных лотках, предназначенных для отвода улавливаемых наносов. В результате нецентрального подвода жидкости движение потока в канале носит очень сложный винтообразный характер. При этом за счет увеличения расхода вдоль потока меняются и все кинематические и динамические характеристики, т. е. движение потока в этом случае неравномерное.

Винтообразное движение потока, как часто встречающееся на практике, привлекало и привлекает внимание многих исследователей. Основоположником теории винтовых потоков является И. С. Громека [5]. Рассматривая случай движения несжимаемой жидкости, при котором $\vec{V}\times rot\vec{V}=0$, И. С. Громека приходит к модели однородного винтового движения, для которого во всей массе жидкости энергия постоянна и $\frac{\mathrm{rot}\,\vec{V}}{\vec{V}}=\lambda=const$. Дальнейшее развитие теории однородного винтового движения получила в работах А. Я. Миловича [7, 8]. Однако найденное им решение дало крайне неравномерное распределение поступательных скоростей по сечению потока, противоречащее результатам опытов. Согласно решению А. Я. Миловича, скорость продольного движения на контуре поперечного сечения канала равна нулю и в середине сечения достигает максимальной величины. По А. А. Саткевичу [12], такое движение осуществляется лишь тогда, когда винтовой поток движется в очень большом по сравнению с размерами самого потока объеме жидкости. Поэтому решение А. Я. Миловича можно рассматривать как предельный случай соответствующих общих решений, когда поступательная скорость на контуре потока стремится к нулю.

Указывая на эти недостатки модели однородного винтового потока, М. В. Потапов [11] предложил модель продольно-винтового движения, которая характеризуется постоянством поступательных скоростей во всем потоке $u=const$ и $\frac{\partial E}{\partial x}=0$. Указанная модель имеет также ряд недостатков, главным из которых является отсутствие связи между поперечным и продольным течениями.

Значительный вклад в развитие теории винтового движения внесли теоретические исследования О. Ф. Васильева [4]. Основная часть его работы посвящена изучению в общем случае неоднородных двупараметрических винтовых и циркуляционных потоков. При этом большое место в работе уделяется приближенному интегрированию дифференциальных уравнений таких потоков.

Исследуя свойства невязких равномерных циркуляционных потоков, М. Г. Старостин [13] приходит к модели однородного циркуляционного потока, для которого $\frac{\partial E}{\partial x}=0$;

$$\frac{\mathrm{rot}_y \vec{V}}{v}=\frac{\mathrm{rot}_z \vec{V}}{w}=\frac{\lambda}{2}=const \text{ и } \frac{\mathrm{rot}_x \vec{V}}{u}=\frac{\lambda_1}{2}=const,\ \lambda\neq\lambda_1$$

Во всех указанных работах по теории винтового движения рассматривается только равномерное движение, и поэтому результаты этих исследований не могут быть строго применимы для описания винтообразных потоков с переменным расходом.

В литературе известны несколько работ [1, 2, 3, 9, 10], содержащих результаты исследований напорных винтообразных потоков с переменным расходом. Поскольку по характеру движения напорные винтообразные потоки с переменным расходом отличаются от безнапорных, то результаты указанных работ, очевидно, не могут быть использованы для описания интересующих нас безнапорных потоков переменной массы.

В настоящей статье на основании анализа работ по теории винтового движения потока, а также экспериментальных исследований автора предлагается схема расчета поперечных профилей составляющих скорости по осям координат в безнапорных винтообразных потоках с переменным расходом.

Рассмотрим винтообразное движение потока с переменным расходом в длинном нешироком * открытом канале прямоугольного сечения.

Для определенности задачи примем следующие предположения.

1. Жидкость в канал подводится через отверстия (или щели), расположенные на боковой стенке у дна канала.

2. Движение происходит в горизонтальном канале или канале с малыми уклонами.

3. Будем рассматривать такое движение, когда в конце подвода дополнительной массы жидкости устанавливается критическая глубина.

4. Центр вращения вихря расположен в центре тяжести живого сечения потока.

5. В первом приближении допустимо пренебречь поперечным уклоном свободной поверхности.

Входящая струя, распространяясь вдоль дна канала, не успевает полностью перемешаться с основной массой потока и занимает его придонную часть. При дальнейшем движении вдоль вертикальной стенки в процессе перемешивания с потоком струя теряет свою индивидуальность. Это обстоятельство дает возможность ввести упрощения для описания движения потока. В данном случае можно разделить поток на две зоны: струйную (придонную) (1) и цуркуляционную (2) (см. рис. 1).

Рассмотрим закономерности изменения составляющих скоростей по осям координат в циркуляционной зоне. При подводе дополнительной массы жидкости через отдельные отверстия циркуляционная зона, очевидно, будет занимать все поперечное сечение потока на отрезках канала между отверстиями. В створах против отверстий эта зона займет только часть поперечного сечения аналогично случаю, когда дополнительная масса жидкости подводится через щель.

Для описания движения в циркуляционной зоне потока возьмем уравнение движения в форме Громека-Ламба:

---

* Исследования показали [10], что наилучшие условия для транспорта наносов достигаются в том случае, если в канале существует один устойчивый вихрь. В этом случае величина ширины канала ($2a$) должна лежать в следующих пределах $0{,}5\,h \leqslant 2a \leqslant 3h$ (h — глубина потока).

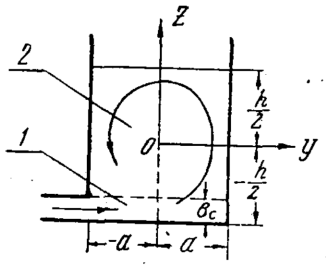


Рис. 1. Схема движения потока в поперечном сечении канала.

$$\left.\begin{aligned} -\frac{\partial E}{\partial x} &= 2(\eta w - \varsigma v) \\ -\frac{\partial E}{\partial y} &= 2(\varsigma u - \xi w) \\ -\frac{\partial E}{\partial z} &= 2(\xi v - \eta u) \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

и уравнение неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \qquad (2)$$

где $E = gz + \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2}$ — полная энергия частицы, отнесенная к единице массы;

u, v, w — составляющие полной скорости V по осям координат x, y, z (ось x направлена вдоль потока, z — вертикально вверх).

ξ, η, ς — компоненты угловой скорости по осям координат, определяемые соотношениями:

$$\left.\begin{aligned} \xi &= \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}\right) \\ \eta &= \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}\right) \\ \varsigma &= \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right) \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

Оценим порядок производных в уравнениях движения (1) и в уравнении неразрывности (2) в том случае, если длина канала L* значительно больше его ширины, т. е. $L \gg 2a$, а характерное изменение составляющих скоростей имеет один порядок малости (т. е. $\Delta u \sim \Delta v \sim \Delta w$).

Рассмотрим уравнение неразрывности.

Поскольку канал не широкий и глубина потока в канале $h \sim 2a$, то производные по осям y и z имеют один порядок малости. Оценим порядок производных по оси x и по оси y. Производная $\frac{\partial u}{\partial x} \sim \frac{\Delta u}{L}$, а $\frac{\partial v}{\partial y} \sim \frac{\Delta v}{2a}$, так как $L \gg 2a$, а $\Delta u \sim \Delta v$, то $\frac{\partial u}{\partial x} \ll \frac{\partial v}{\partial y}$, т. е. производная по x в уравнении неразрывности будет иметь более высокий порядок малости по сравнению с производными по осям y и z. Следовательно, в уравнении неразрывности производной по x в первом приближении можно пренебречь, и уравнение (2) запишется следующим образом:

$$\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \qquad (4)$$

В этом случае можно ввести функцию тока ψ, и для поперечных скоростей получим выражения

$$v = \frac{\partial \psi}{\partial z}; \quad w = -\frac{\partial \psi}{\partial y}. \qquad (5)$$

Оценим порядок производных в первом уравнении системы (1). Подставляя сюда значения E, η и ξ, получим

---

* За длину L принимаем длину канала, на которой происходит подвод дополнительной массы жидкости.

$$-g\frac{\partial z}{\partial x}-\frac{1}{\gamma}\frac{\partial P}{\partial x}-u\frac{\partial u}{\partial x}=w\frac{\partial u}{\partial z}+v\frac{\partial u}{\partial y}.$$

Производные

$$\frac{\partial u}{\partial x}\sim\frac{\Delta u}{L};\quad \frac{\partial u}{\partial y}\sim\frac{\Delta u}{2a};\quad \frac{\partial u}{\partial z}\sim\frac{\Delta u}{2a}.$$

В случае, если

$$u\sim v\sim w\sim U,\ \text{то}\ \frac{\partial u}{\partial x}\ll\frac{\partial u}{\partial y}\ \text{и}\ \frac{\partial u}{\partial z}.$$

Производные

$$g\frac{\partial z}{\partial x}\sim\frac{gh}{L};\quad \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}\sim\frac{hg}{L}.$$

Оценим величины $\frac{gh}{L}$ и $U\frac{\Delta u}{2a}$. Величина $\frac{gh}{L}$ будет значительно меньше величины $U\frac{\Delta u}{2a}$. Это вытекает из следующего рассуждения.

Пусть

$$\frac{gh}{L}\ll U\frac{\Delta u}{2a}. \tag{6}$$

Это неравенство будет выполняться при условии, если $\frac{2a}{L}\frac{gh}{U^2}\ll\frac{\Delta u}{U}$ или, так как $\frac{U^2}{gh}=Fr$ (Fr — число Фруда),

$$\frac{2a}{L}\cdot\frac{1}{Fr}\ll\frac{\Delta u}{U}. \tag{7}$$

Для характерного (критического) сечения $\frac{\Delta u}{U}\sim 1$; $Fr=1$, поэтому неравенство (7), а следовательно, и неравенство (6) справедливы.

Таким образом, в первом уравнении системы (1) производные по x имеют более высокий порядок малости, чем производные по y и z, и ими можно пренебречь. В этом случае первое уравнение системы (1) преобразуется в уравнение

$$w\frac{\partial u}{\partial z}+v\frac{\partial u}{\partial y}=0, \tag{8}$$

откуда, подставляя значения v и w из (5), получим

$$-\frac{\partial\psi}{\partial y}\cdot\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial\psi}{\partial z}\cdot\frac{\partial u}{\partial y}=0\ \text{или}\ \frac{D(u,\psi)}{D(y,z)}=0,$$

или продольная скорость зависит только от функции тока, т. е. $u=u(\psi)$.

Оценивая аналогичным образом величины производных в системе (3), получим следующие выражения для определения составляющих вращательных скоростей:

$$\left.\begin{aligned}\xi&=-\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}-\frac{\partial v}{\partial z}\right)\\ \eta&=\frac{1}{2}\frac{\partial u}{\partial z}\\ \varsigma&=-\frac{1}{2}\frac{\partial u}{\partial y}\end{aligned}\right\} \tag{9}$$

Подставляя из (9) значения производных $\frac{\partial u}{\partial z}$ и $\frac{\partial u}{\partial y}$ в уравнение (8), получим равенство

$$w\eta - v\zeta = 0, \tag{10}$$

откуда

$$\frac{\eta}{v} = \frac{\zeta}{w} = \frac{\lambda}{2}, \tag{11}$$

где $\lambda = \lambda(x, y, z)$ — в общем случае является функцией координат.

Чтобы выяснить зависимость λ от u, выразим составляющие скорости v и w из (11) и (9) через производные от u

$$v = \frac{1}{\lambda}\frac{\partial u}{\partial z};\quad w = -\frac{1}{\lambda}\frac{\partial u}{\partial y}. \tag{12}$$

Умножая первые равенства соотношений (5) и (12) на dz, а вторые — на dy и вычитая одно из другого, получим

$$\frac{\partial\psi}{\partial z}dz + \frac{\partial\psi}{\partial y}dy = \frac{1}{\lambda}\frac{\partial u}{\partial z}dz + \frac{1}{\lambda}\frac{\partial u}{\partial y}dy,$$

откуда

$$d\psi = \frac{1}{\lambda}du \text{ или } \lambda = \frac{du}{d\psi}, \tag{13}$$

т. е. λ — есть функция от ψ.

Дифференцируя второе уравнение системы (1) по z, а третье по y и приравнивая

$$\frac{\partial^2 E}{\partial y\,\partial z} = \frac{\partial^2 E}{\partial z\,\partial y},$$

можно показать, что составляющая вращательной скорости по оси x является функцией от ψ, т. е. $\xi = \xi(\psi)$. Следовательно, и отношение $\frac{\xi}{u}$ также является функцией от ψ, т. е.

$$\frac{\xi}{u} = \frac{\lambda_1(\psi)}{2}. \tag{14}$$

Вычислим из системы (1) полный дифференциал

$$dE = \frac{\partial E}{\partial y}dy + \frac{\partial E}{\partial z}dz = u\,du - 2\xi\,d\psi,$$

откуда

$$\frac{dE}{d\psi} = u\frac{du}{d\psi} - 2\xi. \tag{15}$$

Из уравнения (15) следует, что полная энергия E является функцией ψ.

Таким образом, для определения кинематических и динамических характеристик винтообразного потока необходимо знать функцию ψ.

Подставляя значения ξ, v и w, выраженные через u и ψ, в первое равенство системы (9), получим дифференциальное уравнение для определения функции тока ψ

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2} + u(\psi)\frac{du(\psi)}{d\psi} - \frac{dE(\psi)}{d\psi} = 0. \tag{16}$$

Для решения уравнения (16) необходимо в конечном итоге задать функции $\lambda(\psi)$ и $\lambda_1(\psi)$.

Поскольку аналитически получить функции $\lambda(\psi)$ и $\lambda_1(\psi)$ в настоящее время не представляется возможным, будем считать, что

$$\lambda = const \text{ и } \lambda_1 = const.\ \lambda_1 \neq \lambda.$$

В этом случае из уравнения (13) следует, что

$$u=\lambda\psi+u_0, \tag{17}$$

где u_0 — значение поступательной скорости на границе потока, т. е. при $\psi=0$, а уравнение (16) преобразуется в уравнение

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}+\lambda\lambda_1\psi=-\lambda_1 u_0. \tag{18}$$

Полученное уравнение (18), строго применимое для равномерных однородных циркуляционных потоков [13], можно использовать для приближенного описания винтообразных потоков с переменным расходом в канале при условии, если длина канала значительно больше его ширины и порядок изменения составляющих скорости по осям координат одинаков.

В случае, если циркуляционная зона занимает всю площадь поперечного сечения, то на границах потока должны выполняться следующие условия:

$$y=\pm a;\ -\frac{h}{2}\leqslant z\leqslant\frac{h}{2}\quad \psi=0$$

$$-a\leqslant y\leqslant a;\ z=\pm\frac{h}{2}\quad \psi=0.$$

Если же циркуляционная зона будет занимать часть живого сечения, то на границах этой зоны должны выполняться такие условия:

$$y=\pm a;\ -\left(\frac{h}{2}-b_c\right)\leqslant z\leqslant\frac{h}{2}\quad \psi=0$$

$$-a\leqslant y\leqslant a;\ z=\frac{h}{2}\quad \psi=0$$

$$-a\leqslant y\leqslant a;\ z=-\left(\frac{h}{2}-b_c\right)\quad \psi=0.$$

Таким образом, задача сводится к решению уравнения (18) с условием $\psi=0$ на границах циркуляционной зоны.

Решение уравнения (18) записывается в следующем виде (ход решения подробно изложен в работе О. Ф. Васильева [4], и на нем останавливаться не будем):

$$\psi=\frac{16\,u_0\lambda_1}{\pi^4}\sum_{m,\,n=1,\,3,\,5\ldots}\frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}}{mn\left[\left(\frac{m}{2a}\right)^2+\left(\frac{n}{h}\right)^2-\left(\frac{\lambda\lambda_1}{\pi}\right)^2\right]}\cos\frac{m\pi y}{2a}\cos\frac{n\pi z}{h} \tag{19}$$

Для определения составляющих скоростей по осям координат получим следующие зависимости:

$$u=\psi\lambda+u_0=u_0+\frac{16\,u_0\lambda\lambda_1}{\pi^4}\sum_{m,\,n=1,\,3,\,5\ldots}\frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}}{mn\left[\left(\frac{m}{2a}\right)^2+\left(\frac{n}{h}\right)^2-\left(\frac{\lambda\lambda_1}{\pi}\right)^2\right]}\times$$

$$\times\cos\frac{m\pi y}{2a}\cos\frac{n\pi z}{h} \tag{20}$$

$$v=\frac{\partial\psi}{\partial z}=-\frac{16\lambda_1 u_0}{\pi^3 h}\sum_{m,\,n=1,3,5\ldots}\frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}}{m\left[\left(\frac{m}{2a}\right)^2+\left(\frac{n}{h}\right)^2-\left(\frac{\lambda\lambda_1}{\pi}\right)^2\right]}\times$$

$$\times\cos\frac{m\pi y}{2a}\sin\frac{n\pi z}{h} \qquad (21)$$

$$w=-\frac{\partial\psi}{\partial y}=\frac{16\lambda_1 u_0}{\pi^3 2a}\sum_{m,\,n=1,3,5\ldots}n\frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}}{\left[\left(\frac{m}{2a}\right)^2+\left(\frac{n}{h}\right)^2-\left(\frac{\lambda\lambda_1}{\pi}\right)^2\right]}\times$$

$$\times\sin\frac{m\pi y}{2a}\cos\frac{n\pi z}{h}. \qquad (22)$$

Обозначим $\lambda\lambda_1=\kappa^2$; $2a=B$. По данным Ш. Зари [6], $\lambda_1=2\lambda$; следовательно, $\lambda_1=\kappa\sqrt{2}$. Формулы (20)—(22) после несложных преобразований с учетом введенных обозначений можно привести к безразмерному виду:

$$\frac{u}{u_0}=1+\frac{16B^2\kappa^2}{\pi^4}\sum_{m,\,n=1,3,5\ldots}\frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}}{mn\left(m^2+\frac{n^2B^2}{h^2}-\frac{\kappa^2B^2}{\pi^2}\right)}\cos\frac{m\pi y}{B}\cos\frac{n\pi z}{h} \qquad (20')$$

$$\frac{v}{u_0}=-\frac{16\sqrt{2}\kappa B^2}{\pi^3 h}\sum_{m,\,n=1,3,5\ldots}\frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}}{m\left(m^2+\frac{n^2B^2}{h^2}-\frac{\kappa^2B^2}{\pi^2}\right)}\cos\frac{m\pi y}{B}\sin\frac{n\pi z}{h} \qquad (21')$$

$$\frac{w}{u_0}=\frac{16\sqrt{2}\kappa B}{\pi^2}\sum_{m,\,n=1,3,5\ldots}\frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}}{n\left(m^2+\frac{n^2B^2}{h^2}-\frac{\kappa^2B^2}{\pi^2}\right)}\sin\frac{m\pi y}{B}\cos\frac{n\pi z}{h} \qquad (22')$$

Расход Q в поперечном сечении можно рассчитать по формуле

$$Q=\int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}}\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}}u\,dy\,dz=$$

$$=u_0 Bh\left[1+\frac{64B^2\kappa^2}{\pi^6}\sum_{m,\,n=1,3,5\ldots}\frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}}{m^2n^2\left(m^2+n^2\frac{B^2}{h^2}-\frac{B^2\kappa^2}{\pi^2}\right)}\right] \qquad (23)$$

Следовательно, средняя поступательная скорость

$$u_{ср}=\frac{Q}{Bh}=u_0\left[1+\frac{64B^2\kappa^2}{\pi^6}\sum_{m,\,n=1,3,5\ldots}\frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}}{m^2n^2\left(m^2+n^2\frac{B^2}{h^2}-\frac{B^2\kappa^2}{\pi^2}\right)}\right]. \qquad (24)$$

Зная закон изменения расходов и глубин по длине канала, а следовательно, и закон изменения $u_{ср}$, можно определить по формуле (24) значения поступательных скоростей вблизи стенок канала, а затем рассчитать по формулам (20)—(22) или (20′)—(22′) профили скоростей в любом его поперечном сечении. Таким образом, задача нахождения профилей скорости в поперечном сечении винтообразного потока с переменным расходом тесно связана с нахождением его осредненных кинематических характеристик*.

В каждом конкретном случае для расчета профилей скорости необходимо также знать величину κ, которую можно определить следующим образом. На оси потока, т. е. при $y=0$, $z=0$, $u=u_{max}$. Следовательно, согласно (20′)

$$\frac{u_{max}}{u_0}=1+\frac{16\,B^2\kappa^2}{\pi^4}\sum_{m,\,n=1,\,3,\,5\ldots}\frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}}{mn\left(m^2+n^2\dfrac{B^2}{h^2}-\dfrac{\kappa^2 B^2}{\pi^2}\right)}. \qquad (25)$$

По формуле (25) при заданном отношении $\frac{u_{max}}{u_0}$ и B можно рассчитать величину κ. Было произведено решение уравнения (25) для различных соотношений $\frac{u_{max}}{u_0}$ и $\frac{B}{h}$. Результаты расчетов приведены на рисунке 2.

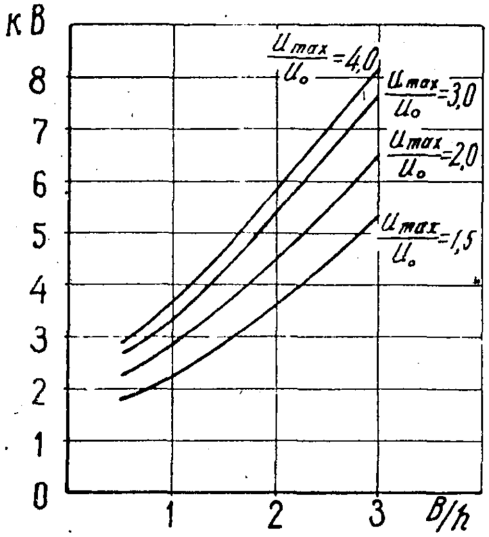


Рис. 2. Расчетные кривые зависимости $kB=f\left(\frac{B}{h}, \frac{u_{max}}{u_0}\right)$.

Для сопоставления теории с опытом использованы результаты экспериментальных исследований, приведенных автором на моделях промывной галереи пескогравиеловки [14].

Жидкость в канал подводилась нормально к его оси из напорного бака через отверстия квадратного сечения, расположенные равномерно по длине канала. Дно канала горизонтальное. Величины отношений длины канала к его ширине были следующие: $\frac{2a}{L}=\frac{12}{200}; \frac{20}{200}; \frac{30}{300}\sim 0{,}1<1$, т. е. $L>2a$. Характерные изменения скоростей $\Delta u\sim 1\text{—}1{,}2\ \frac{м}{сек}$; $\Delta v\sim\Delta w\sim 1{,}0\text{—}2{,}5\ \frac{м}{сек}$; т. е. порядок изменения составляющих скорости по осям координат примерно одинаков. Исследования показали, что на большей части длины канала $\left(\frac{x}{L}\sim 0{,}8\right)$ значения κ постоянны, а к концу увеличиваются на 15—40% от своего первоначального значения в зависимости от ширины канала. Следовательно, условия экспериментальных ис-

* Определение осредненных характеристик потока с переменным расходом изложено в работах [15] и [16].

следований совпадали с условиями, при которых получены расчетные зависимости (20′)—(22′).

Поскольку в экспериментальных исследованиях значительно точнее можно измерить величину u_{max}, то сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчетами производилось по оси z в координатах $\frac{u}{u_{max}}=f\left(\frac{z}{h}\right)$ и $\frac{v}{u_{max}}=f\left(\frac{z}{h}\right)$ (см. рис. 3). Как видно из графиков, расчетные кривые вполне удовлетворительно описывают результаты экспериментальных исследований.

На основании изложенного считаем, что для описания профилей скорости винтообразного потока с переменным расходом в длинных нешироких каналах можно пользоваться полученными формулами (20′)—(22′), которые строго применимы для однородных циркуляционных потоков.

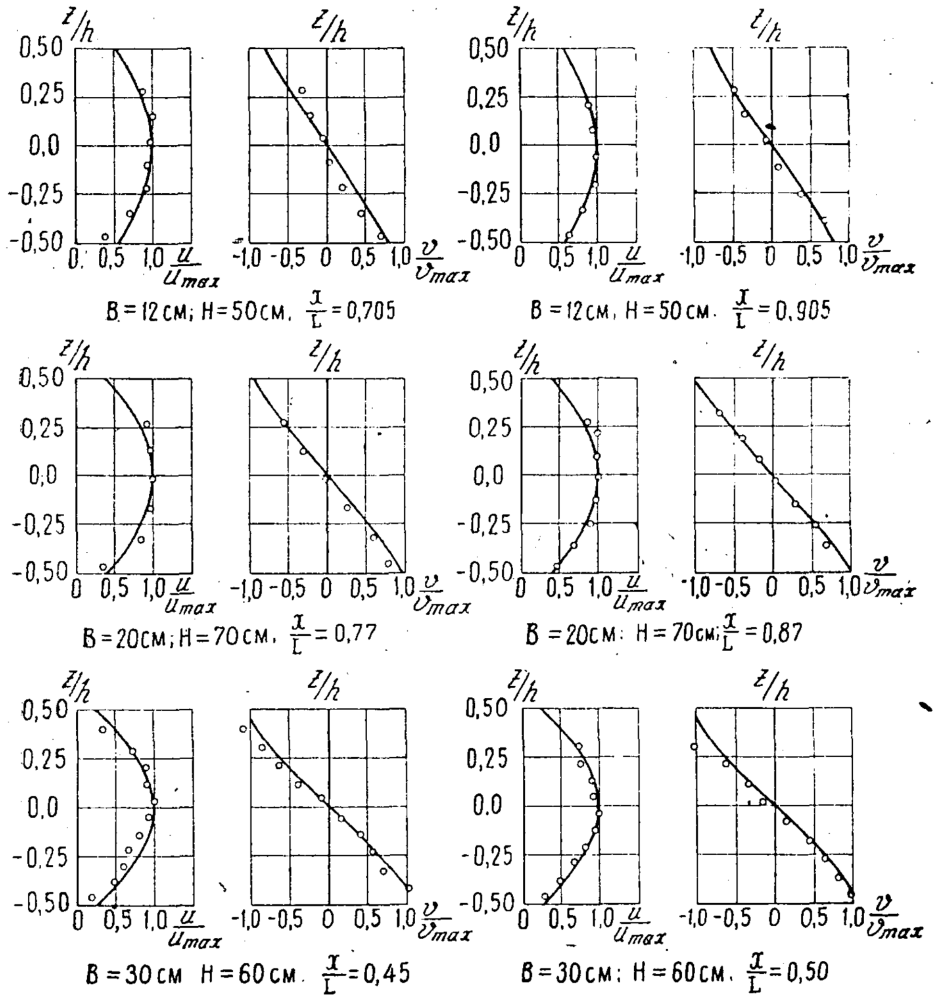


Рис. 3. Расчетные и опытные профили составляющих скорости в поперечных сечениях потока при различных величинах его ширины (B) и напорах (H).

——— — расчетные кривые;

O — опытные точки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арыкова А. И. Характеристика движения винтового потока в трубе с продольным щелевым отверстием. «Известия АН КазССР. Серия энергетическая», вып. 1 (15). 1959.

2. Арыкова А. И. Характеристика движения винтового потока с переменным расходом. «Известия АН КазССР. Серия энергетическая», вып. 2 (18) 1960.

3. Арыкова А. И. Уравнения винтообразного движения потока с переменным расходом в круглой трубе. «Вестник АН КазССР», 1964, № 1.

4. Васильев О. Ф. Основы механики винтовых и циркуляционных потоков. Госэнергоиздат, 1958.

5. Громека И. С. Собр. соч. М., Изд-во АН СССР, 1952.

6. Заря Ш. Винтовое движение жидкости со взвешенными наносами в прямой трубе квадратного сечения. «Известия АН СССР, отдел техн. наук, энергетика и автоматика», № 2, 1959.

7. Милович А. Я. Основы динамики жидкости (гидродинамика). М.-Л., Госэнергоиздат, 1933.

8. Милович А. Я. Основы гидромеханики. М.-Л., Госэнергоиздат, 1946.

9. Мусаев З. А. Опыт изучения работы поперечных донных промывных лотков с учетом винтообразного движения потока в них. «Научные записки МГМИ», т. 30, 1965.

10. Мусаев З. А. Исследование потока в поперечных донных промывных лотках. Автореферат. М., 1966.

11. Потапов М. В. Винтовое движение жидкости в прямом открытом канале прямоугольного сечения. Соч., т. 2. М., 1951.

12. Саткевич А. А. Общий анализ свободно-вихревого потока несжимаемой вязкой жидкости. «Записки Государственного гидрологического ин-та», т. 5. Л., 1931.

13. Старостин М. Г. Основные свойства циркуляционных потоков в прямолинейных каналах. «Гидротехника и мелиорация», М., 1953, № 7.

14. Федорова Т. А. Результаты экспериментальных исследований винтообразного потока с переменным расходом в лотке. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 5. Алма-Ата, «Наука», 1967.

15. Федорова Т. А. Кинематические и динамические характеристики потока с переменным расходом вдоль пути. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 6. Алма-Ата, «Наука», 1968.

16. Федорова Т. А. Решение основного дифференциального уравнения установившегося движения потока с переменным расходом для некоторых частных случаев. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 6. Алма-Ата, «Наука», 1968

SUMMARY

Basing on the analysis of work on the theory of flow, helicoidal motion and on her own experimental studies, the author offers a diagram for calculation of transverse profiles comprising velocities by axes of coordinates in freesurface helicoidal flow with nonuniform discharge.

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
1970 *ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА* вып. 7.

А. А. ПИЧУГИНА

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСТЕКАНИЯ ВОДЯНОЙ СТРУИ В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Изучением растекания водяных струй для целей инженерной гидравлики занимались многие исследователи. Известны работы Е. А. Замарина, Н. И. Теперина, М. С. Вызго, Е. В. Плетневой, М. А. Михалева, Ц. Е. Мирцхулавы и других, проводивших свои исследования для установления связи между параметрами струи и размывом в грунте. Наиболее полная библиография по этому вопросу приведена в трудах М. С. Вызго и Ц. Е. Мирцхулавы [1] и [2].

Во всех перечисленных выше работах за основу была принята теория растекания свободных струй.

На наш взгляд, более правильным является использование для решения этой задачи теории растекания несвободных турбулентных струй, в частности, теории удара струи в тупик. Решение такой задачи для газовых струй приведено в книге Г. Н. Абрамовича [3]. Нужно отметить, что в доступной нам литературе мало работ по этому вопросу. В основном это работы В. Н. Розенберга, Д. Н. Ляховского, В. М. Седелкина. Несмотря на слабую освещенность в литературе, применение этой теории к решению задачи о местном размыве представляется нам перспективным и вполне обоснованным.

Рассмотрим схему растекания потока в яме размыва. Для простоты полагаем, что струя вертикальная и имет двусторонний отвод (рис. 1). Примем также, что размыв стабилизировался. Это означает, что в любой точке ямы размыва актуальное давление потока не может вывести из равновесия отдельности грунта.

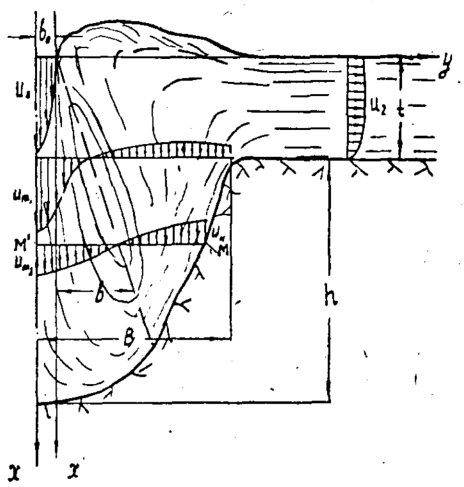


Рис. 1. Схема растекания струи в воронке размыва.

В рассматриваемой нами плоской схеме поток с начальной шириной $2b_0$ проходит часть пути в воздухе (h_a) и затем через слой воды толщиной t попадает в яму размыва. Растекание струи будет происходить на участке t и в ограниченном пространстве. Примем, что характер растекания на участке t такой же, как и в яме. Это можно сделать, т. к. на обоих участках принятая нами струя движется во встречном потоке. Это обстоятельство позволяет проводить расчет растекания струи для обеих зон по универсальной зависимости Г. Шлихтинга.

$\frac{U-U_н}{U_m-U_н}=(1-\xi^{1,5})^2$ — для основного участка струи, (1′)

$\frac{U_0-U}{U_0-U_н}=f(\eta)=(1-\eta^{1,5})^2$ — для начального участка струи, (1)

где $\xi=\frac{y}{b}$; $\eta=\frac{y-y_2}{b}$

u_0 — начальная скорость струи;

u_m — максимальная скорость на оси струи;

u — текущая скорость;

$u_н$ — скорость обратного (встречного) потока.

Для обоснования применения теории несвободных струй необходимо сделать следующее допущение.

Давление в зоне растекания распределяется по гидростатическому закону. Такое допущение применяется всеми исследователями, занимавшимися изучением растекания водяных струй. Известно, что теория струй исходит из постоянства и равенства давлений в струе и окружающем пространстве. В нашем случае и в струе и в окружающей среде давление распределяется по гидростатическому закону, так что можно предположить, что поведение отдельных струек жидкости в этом случае будет мало отличаться от поведения струек в пространстве с постоянным давлением *.

Экспериментальная проверка правомерности такого допущения была проведена Ф. Г. Гунько, Г. В. Востржелом и Е. В. Плетневой [4].

Для рассматриваемой нами задачи о растекании струи в яме размыва наибольший интерес представляет основной участок струи. В любом сооружении струя, пройдя часть пути в пределах каких-то конструкций, турбулизируется и ядро постоянных скоростей исчезает задолго до входа струи под уровень нижнего бьефа.

Определим безразмерную скорость $\frac{U_m}{U_0}$, а также положение границ зоны растекания.

Для сечения MM' (см. рис. 1) уравнение расхода имеет вид:

$$\int_0^b U\,dy+U_н(B-b)=0, \tag{2}$$

где u — текущая скорость в прямом течении,

$u_н$ — средняя скорость потока в обратном течении.

Приведем это уравнение к безразмерному виду, разделив его на $U_m B$

$$\bar{b}^*\int_0^1 \frac{U}{U_m}\cdot\frac{dy}{b}+m(1-b^*)=0, \tag{3}$$

где:

$$b^*=\frac{b}{B},\ m=\frac{U_н}{U_m}.$$

Из уравнения (1′) имеем:

$$\frac{U}{U_m}=(1-m)(1-\xi^{1,5})^2+m;$$

$$\int_0^1 \frac{U}{U_m}\cdot\frac{dy}{b}=(1-m)\int_0^1(1-\xi^{1,5})^2\,d\xi+m=0{,}45+0{,}55\,m.$$

* Это допущение справедливо, конечно, только в сечениях, достаточно удаленных от дна ямы размыва.

Подставляя полученное решение интеграла в уравнение (3), получим

$$0{,}45\,b^*+0{,}55\,b^*\,m+m-b^*\,m=0;\ b^*=\frac{-m}{0{,}45\,(1-m)}.$$

Уравнение количества движения для основного участка имеет вид:

$$\int_0^b U^2\,dy+U_н^2(B-b)=U_0^2\,b\,\frac{B}{B-b}. \qquad (5)$$

Разделим его на $U^2{}_0B$

$$b^*\int_0^1\frac{U^2}{U_0^2}\cdot\frac{dy}{b}+\frac{U_н^2}{U_0^2}(1-b^*)=\frac{b_0^*}{1-b_0^*}.$$

Первые два члена разделим и умножим на U_m^2 и обозначим $\frac{U_m}{U_0}=\overline{U}m$

$$\overline{U}_m^2\,b^*\int_0^1\left(\frac{U}{U_m}\right)^2\frac{dy}{b}\,\overline{U}_m^2\cdot m^2(1-b^*)=\frac{b_0^*}{1-b_0^*}.$$

Согласно уравнению (1)

$$\left(\frac{U}{U_m}\right)^2=(1-m^2)f^2+2m(1-m)f+m^2;$$

где $f=(1-\xi^{1,5})^2$, тогда

$$\overline{U}_m^2\,b^*\,[(1-m)^2\int_0^1 f^2\,d\xi+2m(1-m)\int_0^1 f\,d\xi+m^2]+\overline{U}_m^2\,m^2(1-b^*)=\frac{b_0^*}{1-b_0^*}.$$

Согласно вычислениям ([3] стр. 174).

$$\int_0^1 f^2\,d\xi=0{,}316;\quad\int_0^1 f\,d\xi=0{,}45.$$

Подставляя эти значения, получим

$$\overline{U}_m^2\,\frac{-m}{0{,}45\,(1-m)}\,[0{,}316(1-m)^2+0{,}9\,m(1-m)+m^2]+$$

$$+\ \overline{U}_m^2\,m^2\left[1+\frac{m}{0{,}45\,(1-m)}\right]=\frac{b_0^*}{1-b_0^*}.$$

Для определения безразмерной скорости и границ растекания струи Г Н. Абрамович дает следующие зависимости:

$$\overline{U}_m=\sqrt{\frac{-0{,}45\,b_0^*\,(1-m)}{m\,(1-b_0^*)\,(0{,}316-0{,}182\,m-0{,}134\,m^2)}} \qquad (6)$$

где

$$m=\frac{0{,}45\,b_0^*+0{,}45\ b_0^*c\,x}{0{,}45\,b_0^*+0{,}45\ b_0^*c\,x-1} \qquad (7)$$

Подставив уравнение (7) в уравнение (6) и обозначив $\frac{x}{b_0}$ через $\bar{x}$, после преобразований получим:

$$\overline{U}_m=\sqrt{\frac{(0{,}45\,b_0^*+0{,}45\ b_0^*c\,\bar{x}-1)^2}{(1+c\,\bar{x})\,(1-b_0^*)\,(0{,}316-0{,}452\,b_0^*-0{,}452\,b_0^*c\,\bar{x})}}. \qquad (8)$$

Выразим относительную скорость на оси струи в функции от $x^* = \frac{x}{B}$

Из уравнения (4) следует, что

$$m = \frac{0{,}45\, b_0^* + 0{,}45\, c\, x^*}{0{,}45\, b_0^* + 0{,}45\, c\, x^* - 1} \tag{9}$$

Подставляя уравнение (8) в уравнение (5), после преобразований окончательно получаем:

$$\overline{U}_m = \sqrt{\frac{b_0^* (0{,}45\ b_0^* + 0{,}45\, c\, x^* - 1)^2}{(b_0^* + 0{,}45\, c\, x^*)(1 - b_0^*)(0{,}316 - 0{,}45^2\, b_0^* - 0{,}45^2 c\, x^*)}}. \tag{10}$$

Выше уже отмечалось, что в литературе имеется мало работ по изучению растекания струй, бьющих в тупик. Но даже эти немногие известные у нас работы рассматривают длинные узкие тупики, или, как пишет Г. Н. Абрамович ([3], стр. 482), «... рассматривается «глубокий» тупик, размеры которого по оси *X* значительно больше, чем по оси *У*».

При местном размыве грунта, будь он связный или несвязный, размеры образующейся ямы-тупика соизмеримы в обоих направлениях. В большинстве случаев размер по оси *У* может быть и больше.

Эти особенности рассматриваемой нами задачи требуют специального экспериментального изучения вопроса о применимости зависимости Г. Шлихтинга. Опыты желательно провести в достаточно широком диапазоне соотношений параметров *X* и *У*, который охватывал бы всю зону возможных соотношений параметров ям размыва. Необходимо также учесть, что профиль ямы размыва только в исключительных случаях может иметь прямоугольную форму. За счет оползания откосов она становится трапецеидальной. Следовательно, кроме возможности применения зависимости Г. Шлихтинга для коротких прямоугольных тупиков необходимо рассмотреть применимость ее и для трапецеидальных.

Экспериментальная установка состоит из цилиндрического напорного бака и лотка и позволяет проводить опыты при напорах от 1,0 до 5,0 *м* и расходах от 15 до 40 *л/сек*. В нижней части напорного бака установлен коноидальный насадок, через который вытекает плоская струя шириной 300 *мм* и толщиной от 5 до 20 *мм*. Струя попадает в лоток шириной 300 *мм* и длиной 5,0 *м*. Отвод воды может быть обеспечен в любую сторону лотка. На данном этапе опыты проводились при симметричном двустороннем отводе. Одна стенка лотка застеклена, чтобы обспечить возможность непосредственного наблюдения за растеканием. В противоположной стенке сделан люк, который открывается при установке тупика.

Исследованные нами тупики представляют собой металлические ящики, которые жестко крепятся в лотке. Конструкция одного из тупиков приведена на рис. 2. Они изготовлялись из листового железа толщиной 2 *мм* и окаймлялись уголком 32×32. Вес их достигал 30—50 *кг*, так что вибрация их под действием струи была незначительной. Дно и стенки тупика снабжались пьезометрами, а в одной из боковых стенок были сделаны отверстия, через которые вводилась трубка для измерения скоростей. Отверстия эти закрывались специальными пробками. Каждый тупик имел открылки длиной 150—200 *мм*, которые имитировали дно отводящего русла.

Конечно, рассматриваемая нами модель достаточно схематично изображает процесс растекания потока в яме размыва, но для изучения возможности применения зависимости Г. Шлихтинга она вполне удовлетворительна.

Измерение скоростей производилось с помощью шестиканальной цилиндрической трубки, закрепленной в специальном координатнике. Скорости прямого течения измерялись верхними отверстиями трубки. При переходе в зону обратных токов трубка поднималась на величину своего диаметра и измерения производились нижними тремя отверстиями. Диаметр отверстия 0,8 *мм*. Хотя при растекании струи вода сильно аэрируется, не было отмечено попадания воздуха в каналы трубки. Измерения скоростей проводились в сечениях, отстоящих друг от друга на расстоянии 100 *мм*.

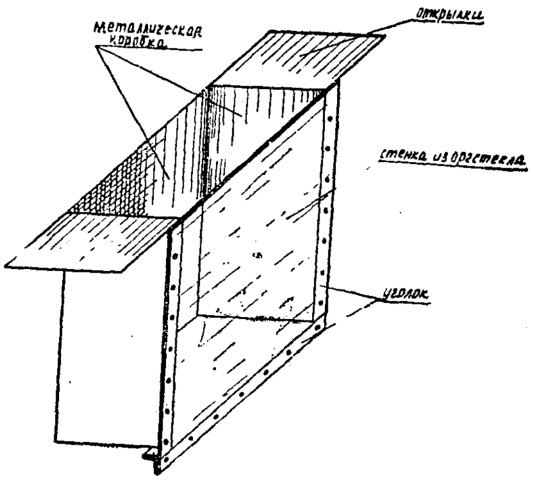


Рис. 2. Эскиз тупика.

На первом этапе исследований изучалось растекание струи в тупике прямоугольной формы. Эпюры скоростей, полученные в результате этих опытов, приведены на рис. 3.

Результаты опытов обрабатывались так, чтобы можно было определить безразмерные параметры и сравнить их с расчетами по зависимости (8). Кроме расчетов по зависимости Г. Шлихтинга были проведены расчеты по зависимости для свободной затопленной струи [5].

$$U_m = \frac{1{,}2\,U_0}{\sqrt{a\frac{2x}{\delta}+0{,}41}}; \qquad (10)$$

где $a=0{,}1$.

Параметры струи и тупиков, а также результаты расчетов приведены в таблице.

Таблица 1

№ п/п	$2B$ *см*	h *см*	b_0^*	v *м/сек*	R_e 10^4	$\overline{U}_m$ при расстоянии от сопла $\overline{x}$				
						20,0	32,5	4,50	57,5	70,0
1	60	35	0,027	3,6	5,8	0,89	0,72	0,64	0,20	
2				5,6	9,0	0,91	0,71	0,63	0,22	
3		55		3,6	5,8	0,00	0,72	0,64	0,50	0,28
4				5.6	9,0	0,91	0,71	0,61	0,53	0,42
5	45	28	0,036	3,6	5,8	0,90	0,73	0,39		
6				5,6	9,0	0,90	0,75	0,41		
7		38		3,6	5,8	0,89	0,72	0,61	0,28	
8				5,6	9,0	0,90	0,75	0,63	0,32	
9	35	19	0,045	3,6	5,8	0,90	0,59			
10				5,6	9,0	0,90	0,63			
11		28		3,6	5,8	0,93	0,71	0,36		
12				5,6	9,0	0,89	0,74	0,42		
13			0,036			0,91	0,74	0,63	0,56	0,50
14						0,80	0,67	0,56	0,50	0,45

Примечание. Строчка 13 отвечает расчетам по формуле (7) при $C=0{,}18$, строчка 14 отвечает расчетам по формуле (10) при $a=0{,}1$.

Сравнение результатов расчета по формулам (7) и (10) с опытными данными, приведенное на рис. 4, показывает, что характер растекания

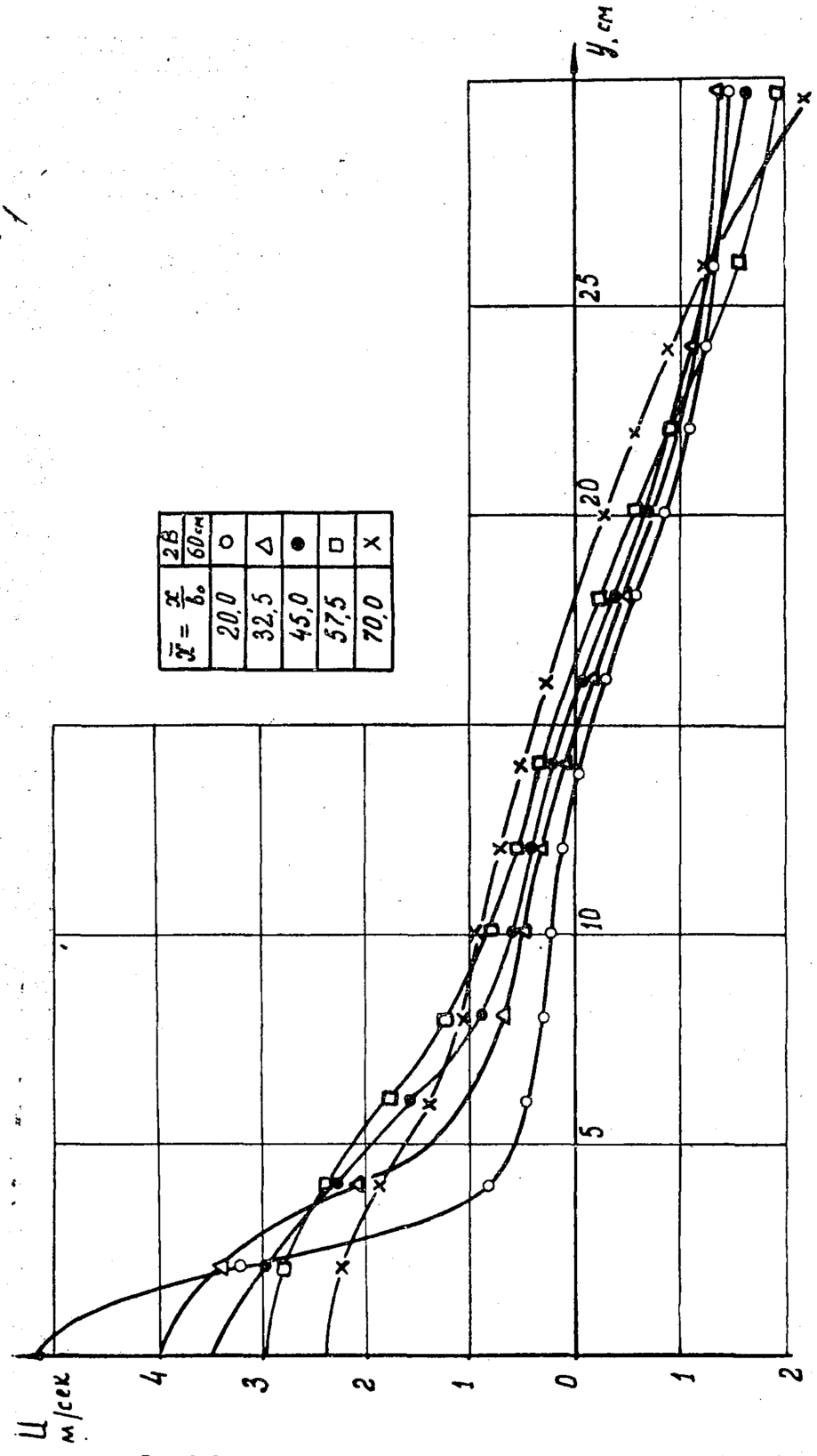


Рис. 3. Эпюры скоростей в поперечных сечениях струи.

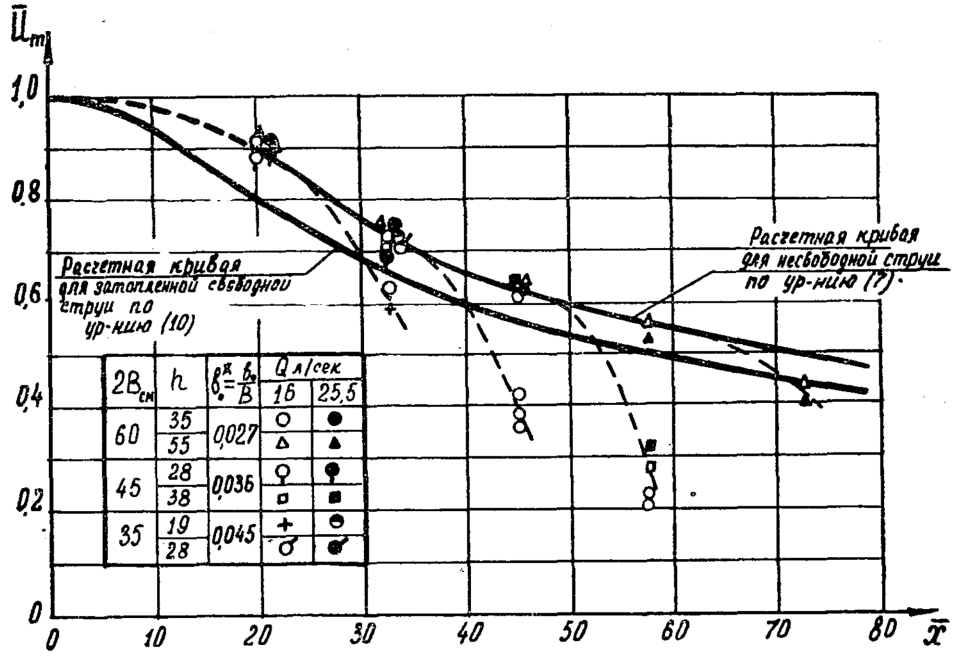


Рис. 4. Изменение безразмерной осевой скорости по длине тупика.

струи в тупике (яме размыва) не может быть описан теорией свободных струй. Эти данные подтверждают наши замечания, приведенные выше, относительно проработок Е. В. Плетневой и Ц. Е. Мирцхулавы.

Обработка результатов наблюдения растекания струи в тупике произведена раздельно для прямого и обратного течений. Безразмерные профили скоростей для обоих течений приведены на рис. 5. Сравнение результатов расчета по зависимости Г. Шлихтинга с данными эксперимента показывает достаточную сходимость.

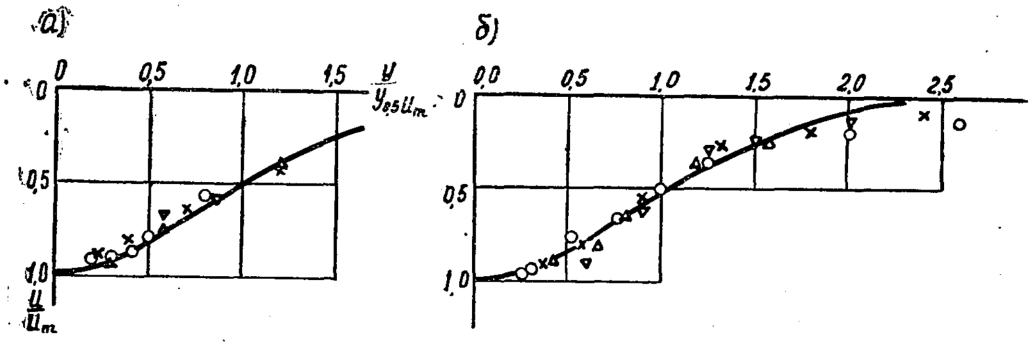


Рис. 5. Безразмерные профили скоростей в поперечных сечениях струи:
а — обратное течение; б — прямое течение.

Нами предполагалось, что начальное поле скоростей равномерно. Для уточнения расчетов необходимо ввести поправку на его действительную неравномерность. Поле скорости на срезе сопла измерялось ⊢-образной трубкой с наружным диаметром 2 *мм*. Данные измерений приведены на рис. 6. Расчет ведем по рекомендациям Г. Н. Абрамовича [3]. В рассмотрение вводится фиктивное сопло, профиль скорости на срезе

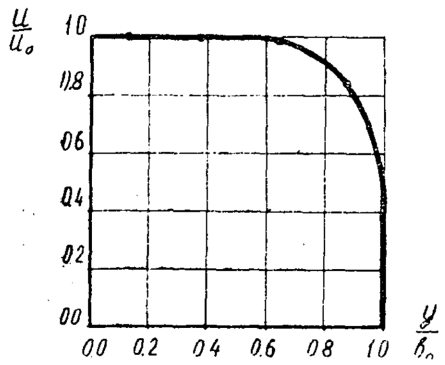


Рис. 6. Начальное поле скоростей.

которого условно принимается прямоугольным с величиной скорости u_0. Высота фиктивного сопла $b^*_{оф}$ определяется из условий равенства количества движения для истинного и фиктивного потоков в сечении действительного среза сопла, а расстояние $x^*_{сф}$, на которое удален срез фиктивного сопла от действительного,— из условия равенства расходов.

Упрощенные выражения для вычисления $b^*_{оф}$ и $x^*_{оф}$ предложены в виде:

$$b^*_{оф} = \varkappa_2 \cdot b^*_0;$$

$$x^*_{оф} = \frac{b^*_k}{0{,}27};$$

$$b^*_k = b^*_{оф} \cdot \frac{\varkappa_1 - \varkappa_2}{0{,}134\,\varkappa_2},$$

где $\varkappa_1$ и $\varkappa_2$ — коэффициенты неравномерности начального поля скоростей. После вычислений на основе начального профиля скоростей получаем:

$$\varkappa_1 = 0{,}94;\ \varkappa_2 = 0{,}89;\ b^*_{оф} = 0{,}032;$$
$$b^*_к = 0{,}013;$$
$$x^*_{ок} = 0{,}048;\quad \bar{x} = \frac{x}{b_0} = 1{,}5.$$

С учетом этой поправки начало координат на рис. 4 должно быть передвинуто влево на 1, 5 единицы. Этой поправкой пренебрегаем ввиду ее незначительности.

Таким образом, в случае растекания струи в условиях тупика прямоугольной формы образуется два потока с противоположным направлением, каждый из которых является струйным (рис. 5). При достаточной глубине тупика ($x > 2B$) изменение осевой скорости может быть подсчитано по зависимости для газовых струй, бьющих в тупик, при экспериментальной постоянной $C = 0{,}18$. Близкорасположенное дно вызывает резкое падение осевой скорости на расстоянии около (0,1—0,2) B от дна. Закономерность этого падения в дальнейшем должна быть определена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мирцхулава Ц. Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости. М., «Колос», 1967.

2. Вызго М. С. Эксплуатационные мероприятия, прогнозы и способы уменьшения местных размывов за гидротехническими сооружениями. Ташкент, «Наука», 1966.

3. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М., Физматгиз, 1960.

4. Плетнева Е. В. Некоторые результаты исследований местного размыва вертикально падающей струей. «Известия АН КазССР. Серия энергетическая», 1960, вып. 17.

5. Плетнев Е. В. Исследование растекания несвободных и аэрированных струй. «Известия АН КазССР. Серия энергетическая», 1961, вып. 19 (1).

SUMMARY

Attempst have been made to apply the law of gas jet spreading in deep impasses to the spreading of a water jet in a right-angle impasse the width and depth sizes of which are commensurable.

It has been established that at the coefficient of the jet expansion C equal to 0,15 the change of the axial jet velocity may be described with an equation for the axial velocity of the gas jet squirting into the impasse.

КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ
1970 *ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА* вып. 7.

Т. Х. АХМЕДОВ, И. П. ШАГ

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРГАНСКОГО ВОДОЗАБОРА С ДОННЫМ ЦИРКУЛЯЦИОННЫМ ПОРОГОМ

1. Оценка критерия качества водозабора

При проектировании водозаборного узла на предгорном участке реки основным вопросом является борьба с донными и взвешенными наносами. В настоящее время общепринято, что борьба с донными наносами проводится в основном непосредственно в самом водозаборном узле, а для осветления воды от взвешенных наносов устраиваются отстойники.

Выбор схемы гидроузла — один из самых ответственных моментов при проектировании. Положение осложняется известным многообразием схем водозаборов, которые могут быть использованы в данных условиях. Так, для одного и того же створа можно предложить следующие модификации только ферганского типа водозабора: первоначальная схема водозабора [1, 2], схема Ходжаева [3], схема И. К. Никитина [4], схема Г. В. Соболина [5] и др.

К сожалению, до настоящего времени не существует критерия качества водозабора, который позволил бы сравнить между собой различные схемы. Попытки создания такого критерия имеются. Так И. А. Якштас [2] предложил для оценки эффективности борьбы с наносами ввести безразмерный параметр — наносный показатель η, представляющий отношение процента завлекания наносов в канал к проценту водозабора. Выбор такого соотношения представляется нам правильным. К сожалению, это предложение, надо полагать, не нашло распространения, по крайней мере, в более поздней литературе мы не встречаем его применения.

И. К. Никитин [4] предложил принять за критерий качества отношение $\frac{w_{макс}}{v_{ср}}$, где $w_{макс}$ — максимальная гидравлическая крупность частиц наносов, поступающих в водозабор;

$v_{ср}$ — средняя скорость потока в начальном створе подводящего русла в верхнем бьефе гидроузла.

Такая форма критерия качества не позволяет, как нам представляется, сравнивать водозаборы разных схем, потому что выбор створа для определения $v_{ср}$ и длина подводящего канала могут оказать существенное влияние на величину критерия качества.

Кроме того, максимальная гидравлическая крупность только частично характеризует гранулометрический состав наносов. Количество наносов, попавших в канал, при такой форме критерия качества не может быть определено. Следует учесть также, что рассматриваемые участки рек характеризуются внезапными, быстро нарастающими паводками. Русла сложены из валунных, галечных и песчано-гравийных наносов. Процессы аккумуляции на этих участках преобладают над процессами эрозии. Сооружение гидроузла может оказать заметное влияние на русловые процессы в верхнем бьефе. Все это осложняет предварительную

(до натурных исследований построенного гидроузла) оценку максимальной гидравлической крупности.

Нам представляется, что критерий И. А. Якштаса дает более полную картину. Его можно выразить в следующем виде:

$$\frac{\rho_k}{\rho_р} = f\left(\frac{Q_k}{Q_р}\right),$$

где ρ — количество наносов, попадающее в канал, *кг/м³*;

ρ_k — количество наносов в реке, *кг/м³*;

Q_k — расход, забираемый в канал, *м³/сек*;

$Q_р$ — расход реки, *м³/сек*.

На рисунке 1 приведены графики критерия качества ферганских водозаборов Кампыр-Раватского (1-а), Кугаратского (1-б), Иссыкского (1-в), Сары-Курганского (1-г) и Ангренского (1-д). Графики построены по данным модельных исследований. Для сравнения были выбраны гидроузлы, близкие по характеристикам створов. Как видно из рис. 1, водозабор на р. Иссык имеет лучшие характеристики.

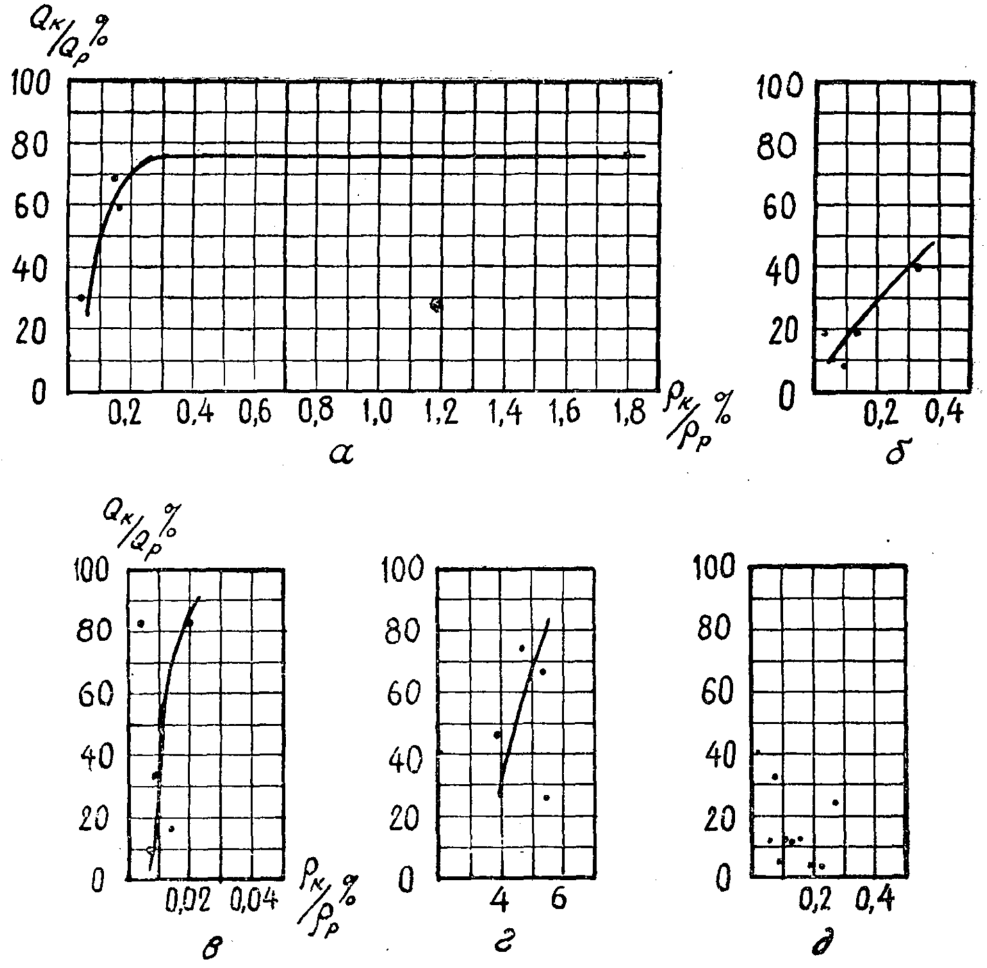


Рис. 1. Графики критерия качества работы модифицированных водозаборов ферганского типа: а — Кампыр-Раватский; б — Кугартский; в — Иссыкский; г — Сары-Курганский; д — Ангренский.

2. Исследование водозабора на реке Иссык

В 1963 г. по р. Иссык прошел катастрофический селевой поток, разрушивший все головные сооружения оросительных каналов. При восстановлении их было принято решение построить общее головное сооружение. За основу при проектировании была принята схема ферганского водозабора с донным циркуляционным порогом конструкции Г. В. Соболина.

Модельные исследования запроектированной схемы гидроузла показали, что работает она неудовлетворительно. Причиной этого явилось то, что Г. В. Соболин не дал расчетных зависимостей для определения параметров конструкций водозабора, а ограничился общими рекомендациями:

высота повышенной части порога

$$t=1{,}9-3\ м,$$

высота пониженной части порога

$$t=1{,}3-2{,}1\ м.$$

Для определения ширины подводящего русла, длины порога, ширины промывного отверстия и др. элементов также нет расчетных зависимостей. Это приводит к тому, что запроектированный по таким рекомендациям гидроузел (рис. 2) работает плохо. В таблице 1 приведены данные модельных исследований проектной схемы водозабора.

Таблица 1

№ п/п	Расход реки $Q_р$, $м^3/сек$	Расход канала $Q_к$, $м^3/сек$	$\frac{Q_к}{Q_р}$, %	$\rho_р$, $г/м^3$	$\rho_к$ $г/м^3$	$\frac{\rho_к}{\rho_р}$, %
1	9,35	8,5	90,90	1350	1347	99,8
2	10,20	8,5	83,40	1350	1326	97,9
3	50,20	8,5	16,94	1350	0,54	0,04
4	58,10	8,5	14,65	1350	0,81	0,06
5	77,60	8,5	10,95	1350	0,27	0,02

Опыты показали:

1. Распределение расхода по длине ступенчатого порога неравномерное. Через пониженную часть проходит 75% расхода, забираемого в канал. Уменьшение количества воды, проходящей через начальную, повышенную часть, снижает интенсивность вращения вальца, возникающего вдоль порога. Это приводит к тому, что донные наносы движутся вдоль порога и вовлекаются в канал через пониженную часть.

2. Из таблицы 1 видно, что при малых величинах промывного расхода, а это основной период работы, почти все наносы проходят в канал, т. е. что наносоперехватывающие сооружения не выполняют своих функций.

Причинами столь неудовлетворительной работы гидроузла являются:

1. Чрезмерная длина ступенчатого порога, что в сочетании с неоправданно широким подводящим руслом не дает возможности возникнуть устойчивому вальцу местной поперечной циркуляции вдоль порога. Порог, как правило, заваливается до гребня, и наносы начинают поступать в аванкамеру шлюза-регулятора.

2. Взаимное расположение и размеры промывного отверстия и по-

нижненной части ступенчатого порога таково, что перед щитом промывника возникает валец, взмучивающий влекомые наносы. В результате наносы вместо промывника попадают в аванкамеру регулятора.

Данные первого этапа исследований выявили основные недостатки проектной схемы водозаборного узла и позволили наметить пути улучшения его конструкции. Далее были проведены опыты по определению оптимальных соотношений параметров сооружения для обеспечения его нормальной работы.

Для этого было рассмотрено несколько вариантов. Изменялась длина и высота ступенчатого порога и размеры промывного отверстия. Первоначально были проведены опыты по выравниванию расхода между высокой и пониженной частью порога.

При окончательно выбранной компановке гидроузла состав сооружений оставлен без изменения, но приняты иные размеры конструктивных элементов. Рекомендованная схема гидроузла приведена на рис. 3. Ширина щитовой части плотины принята равной 5 *м*. Ширина бычков между щитовой и промывной частями плотины и между промывником и автоматическим сбросом аванкамеры принята равной 1,25 *м*. Плановые очертания оголовков бычков также изменены. Промывное отверстие сужено до 1,5 *м*. Эти меры позволяют повысить скорость в промывнике от 3 до 3,78 *м/сек* и устранить валец, возникающий перед щитом.

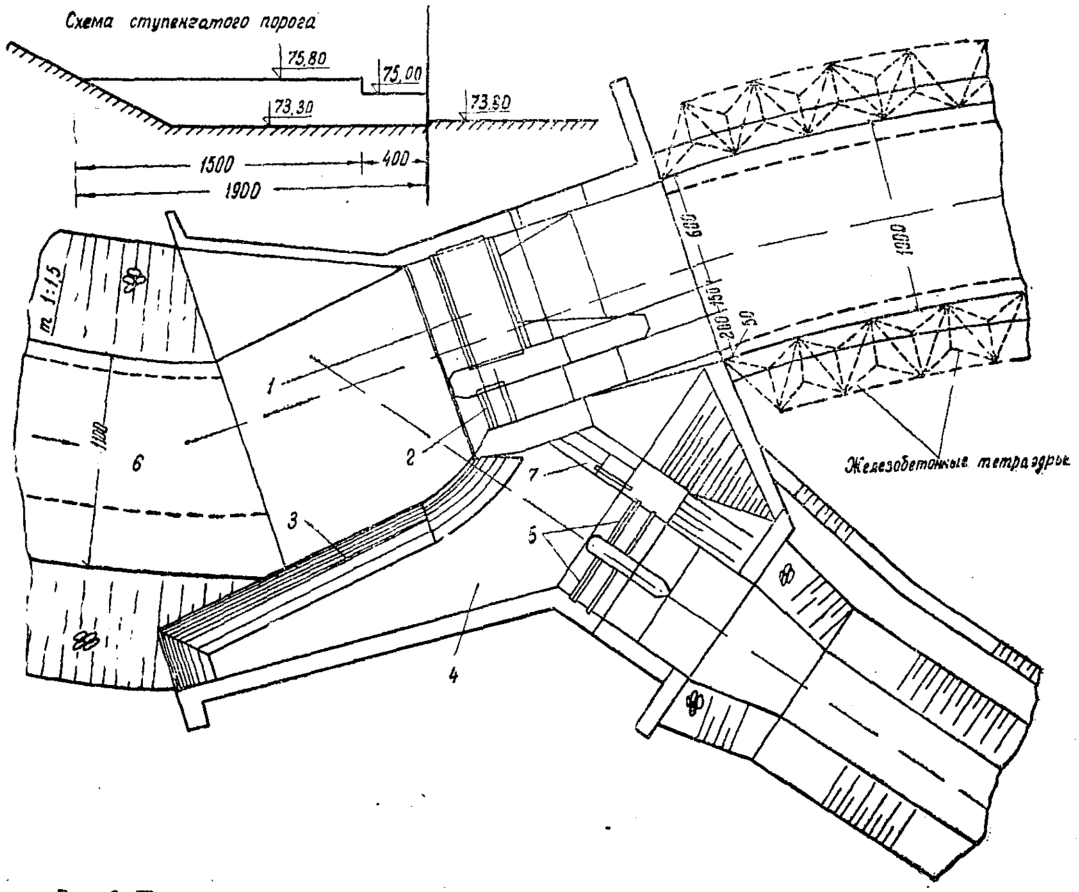


Рис. 2. Проектная схема водозабора на р. Иссык. 1 — щитовая часть плотины; 2 — промывное отверстие; 3 — донный циркуляционный порог; 4 — аванкамера водозабора; 5 — шлюз-регулятор; 6 — подводящее русло; 7 — автоматический сброс аванкамеры.

Было предложено также поднять отметку понура перед плотиной до отметки порога водосливной части плотины. Это улучшает условия пропуска наносов под щитом и позволяет им более плавно входить в промывное отверстие. Плановые очертания ступенчатого порога изменены. Порог проведен по прямой линии. Положение начала и конца порога принято таким же, как и в первоначальном варианте.

Предварительные опыты показали, что длина порога при пропуске малых расходов велика, а это снижает интенсивность продольного вальца. Поэтому порог предложено сделать трехступенчатым так, чтобы при $Q=9{,}35$ и $10{,}2$ *м*³/*сек* начальная часть порога не пропускала воду и вступала в работу только при больших расходах. Чертеж предлагаемой схемы ступенчатого порога приведен на рис. 3.

Выше мы отмечали, что ширина подводящего русла принята чрезмерно большой. Действительно, расчеты по формуле С. Т. Алтунина

$$B=A\frac{Q^{0,5}}{i^{0,2}},$$

где A — параметр, характеризующий поперечный профиль русла, принят равным 0,5;

Q — руслоформирующий расход;

i — продольный уклон поверхности реки, по опытам 0,0216. Для пропуска расхода $Q=50{,}2$ *м*³/*сек* автор дает следующую необходимую ширину русла:

$$B=0{,}5\frac{50{,}2^{0,5}}{0{,}0216^{0,2}}=8\ м.$$

При проведении исследований окончательно выбранной компановки гидроузла ширина подводящего русла была принята равной $B=8$ *м*. При изменении ширины русла правый берег оставлен без изменения и перемещена только левая струенаправляющая дамба.

Сужение подводящего русла благоприятно сказалось на распределении скоростей. Даже при расходах $Q_2=9{,}35$ и $10{,}2$ *м*³/*сек* ощущается влияние поперечной циркуляции. Наносы перемещаются к левому берегу. Изменение очертания раздельного бычка привело к тому, что наносы отбрасываются от промывника к щитовому пролету и на модели был отмечен частичный завал щитовой части. По-видимому, это следует учесть при эксплуатации сооружения. Для ликвидации опасности заклинивания щита необходимо предусмотреть периодическую промывку верхнего бьефа через щитовую часть.

В процессе формирования подводящего русла влекомые наносы постепенно заполняют верхний бьеф. Изменение конструкции порога привело к тому, что валец, возникающий перед ним, отбрасывает наносы в противоположную сторону, и почти на всем протяжении обнажается понур. Изменение первоначального очертания раздельных бычков значительно уменьшило взмучивание наносов перед щитом промывника. Интенсивный продольный валец, возникающий в нижних слоях потока вдоль ступенчатого порога, перемещает наносы к промывнику, где часть их в начальный период занесения верхнего бьефа отбрасывается в сторону щитовой части плотины. После окончательного формирования отложений в верхнем бьефе щитовой пролет и щит частично заваливаются наносами. Почти все наносы в этот период проходят через промывник. Результаты исследований гидравлического и наносного режимов улучшенной схемы водозабора приведены в таблице 2.

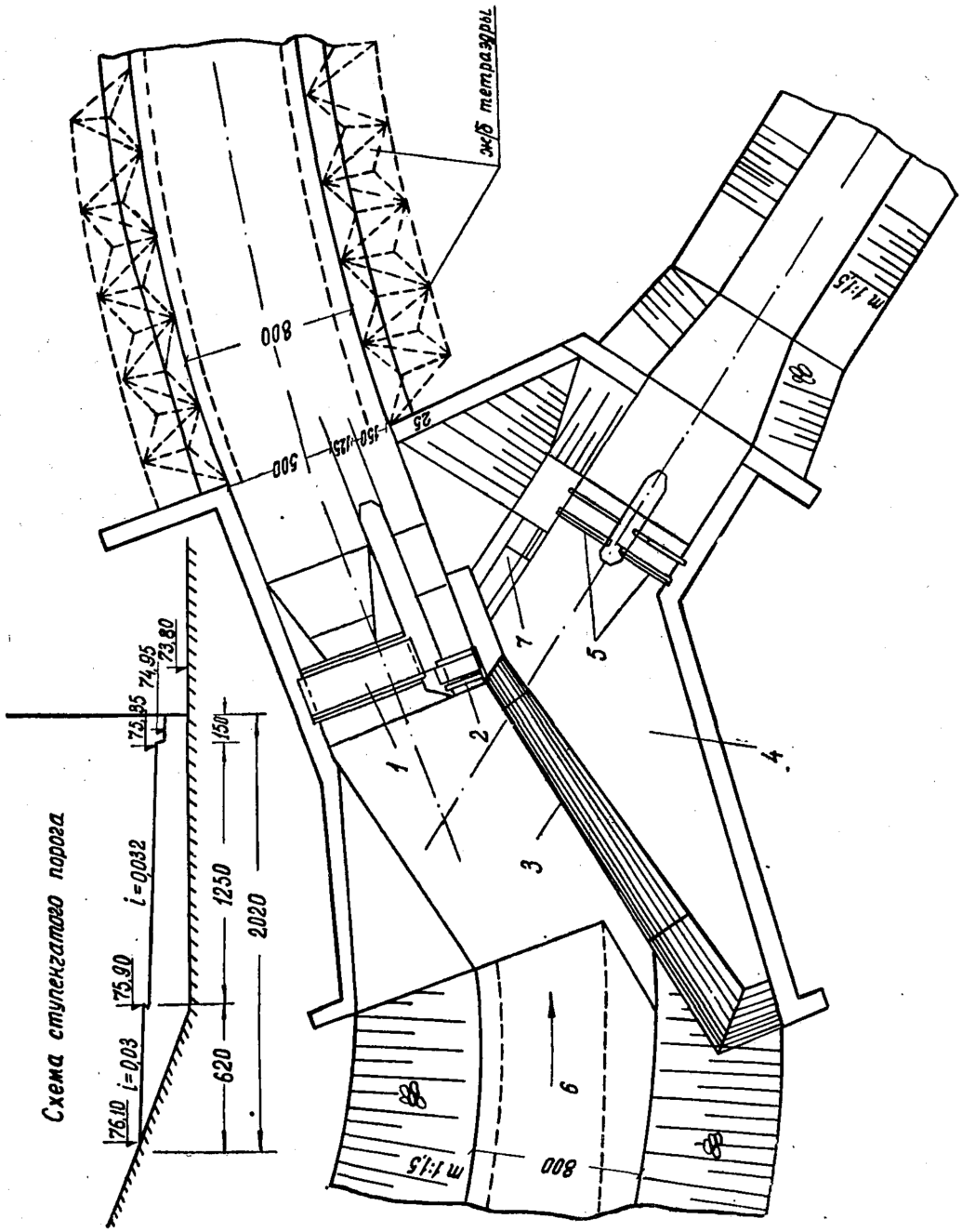


Рис. 3. Предлагаемая схема водозабора на р. Иссык. (Обозначения те же, что и на рис. 2).

Таблица 2

№ п/п	Qр, м³/сек	Qк, м³/сек	$\frac{Q_к}{Q_р}$, %	$\rho_р$, кг/м³	$\rho_к$ кг/м³	$\frac{\rho_к}{\rho_р}$, %
1	9,35	8,5	90,9	1,35	0,495	36,3
2	9,77	8,5	83,0	1,35	0,243	18,0
3	10,20	8,5	83,4	1,35	0,00027	0,02
4	11,22	10,2	90,9	1,35	0,112	9,0
5	11,75	10,2	87,0	1,35	0,022	1,58
6	12,24	10,2	87,4	1,35	0,00004	0,004
7	25,0	8,5	34,0	1,5—3	0,0002	0,01
8	50,20	8,5	16,94	1,5—3	0,0002	0,015
9	78,60	8,5	10,95	1,5—3	0,0001	0,008

Изменения, внесенные в проектную схему, позволили получить критерий качества, который намного выше, чем для других модификаций ферганского водозабора.

Как видно из изложенного, Г. В. Соболиным предложена, по существу, удачная схема водозаборного узла. Однако отсутствие обоснованной расчетной схемы для определения параметров сооружения затрудняет ее использование. Способ, которым были определены параметры водозабора на р. Иссык, вряд ли можно считать применимым во всех случаях.

3. Гидравлический расчет донного циркуляционного порога

Водозаборный узел является комплексным сооружением, в котором размеры всех элементов находятся в тесной связи. Изменение, даже незначительное, любого из них может заметно ухудшить критерий качества водозабора.

Основным элементом схемы Г. В. Соболина является донный циркуляционный порог. Для его расчета нами была сделана попытка использовать зависимость, рекомендуемую для косого водослива.

$$Q = k\, m\, b \sqrt{2g}\, H^{3/2}, \qquad (1)$$

где m — коэффициент расхода для прямого водослива;

k — поправочный коэффициент;

b — длина порога водослива в плане.

Расчеты, проведенные по зависимости (1), для рассматриваемой схемы гидроузла дали большие расхождения с результатами наших опытов.

Эти данные приведены в таблице 3.

Таблица 3

Расход реки Qр, м³/сек	Расход канала Qк, м³/сек	Коэффициент расхода для косого водослива, m	Расход канал. рассчит. по формуле (1), м³/сек	Коэффициент расхода по формуле (3), m
9,27	8,5	0,392	10,5	0,318
11,73	10,2	0,400	11,3	0,362

Расход, проходящих через донный циркуляционный порог, зависит от многих факторов

$$Q=f(H, L, \frac{Q_{пр}}{Q_k}, \alpha, m) , \qquad (2)$$

где H — напор на гребне водослива;

L — длина порога;

Q_k — расход, идущий по подводящему каналу;

$Q_{пр}$ — расход промывного отверстия;

α — угол между осью порога и направлением динамической оси потока.

m — коэффициент расхода порога.

Напор на гребне водослива можно представить в виде $H=\eta_2-\eta_1$, где η_2 — кривая свободной поверхности воды по оси канала на участке бокового водослива с учетом скоростного напора;

η_1 — уравнение линии гребня бокового водослива.

η_2 и η_1 определяются относительно осей координат, начало которых помещено на пороге промывного отверстия.

Тогда, используя общеизвестную зависимость для определения пропускной способности водослива, можно написать

$$Q=m\sqrt{\frac{2g}{L}}\left[\int_0^L(\eta_2-\eta_1)\,dl\right]^{3/2}. \qquad (3)$$

Наши опыты проводились в рамках производственного исследования. Эти результаты не могут служить материалом для широкого обобщения. Расчеты по зависимости (3) показали, что опытный коэффициент расхода значительно меньше рекомендуемого в справочниках для косых водосливов. Эти данные приведены также в таблице 3.

Форма кривой свободной поверхности на участке порога зависит от тех же факторов, что и расход. Определение ее на данном этапе не представляется возможным и требует специальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вызго М. С., Якштас И. А. Криволинейный порог и донная щель для борьбы с наносами. «Гидротехническое строительство», 1948, № 2.

2. Якштас И. А. О водозаборе в предгорной зоне (ферганский тип водозабора). «Труды САНИИРИ», вып. 91. Ташкент, 1958.

3. Ходжаев С. С. Водозабор ферганского типа конструкции Ходжаева С. С. Авт. свид. № 185275 от 16 ноября 1964.

4. Никитин И. К., Родионов И. А. Новая схема водозаборного узла для предгорных условий и результаты ее лабораторного исследования. «Труды координационных совещаний по гидротехнике», вып. 15. Л., Энергия, 1964.

5. Соболин Г. В., Рудаков И. К. Горные решетчатые водозаборы. Фрунзе, Институт научно-технической информации, 1964.

6. Ушаков К. М., Шолохов В. Н. Ферганский тип водозабора применительно к условиям снегово-дождевого питания источника. «Труды САНИИРИ», вып. 91, 1958.

7. Киселев П. Г. Справочник по гидравлическим расчетам. М.-Л., Госэнергоиздат, 1961.

8. Чугаев Р. Р. Гидравлика. М., Госэнергоиздат, 1963.

SUMMARY

The authors suggest a criterion of a quality for comparing various diagrams of water-intake units and dependence for calculation of a bottom circulating sill basing on model investigations and the analysis of the published data.

РЕФЕРАТЫ

УДК 333.93

Вопросы экономической эффективности капитальных вложений в водном хозяйстве. Захаров В. П. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 7, 1970.

Проблема экономической эффективности использования капитальных вложений вообще, а в водном хозяйстве в частности, имеет актуальное значение. Однако многие аспекты этой проблемы до настоящего времени не имеют законченного решения.

В статье дается критический анализ существующих предложений по вопросу повышения использования экономической эффективности производственных фондов и капиталовложений в водохозяйственной системе, а также предлагаются теоретически обоснованные приемы решения ряда затрагиваемых вопросов.

Для сопоставления нескольких проектируемых вариантов одного и того же производственного назначения в качестве экономического критерия рекомендуется минимум расчетных затрат, который получается путем соответствующего преобразования критерия «коэффициента эффективности».

При рассмотрении динамики развития народного хозяйства норматив эффективности капитальных вложений и норматив учета «фактора времени» не должны быть различными, так как указанные нормативы [ε и $(\varepsilon+1)_t$] относятся к дополнительным капиталовложениям. Единственно правильной, с нашей точки зрения, оценкой экономической эффективности при учете динамики развития систем является переход от некоторого постоянного для каждого из сравниваемых вариантов «расчетного срока» к переменному.

В связи с тем, что существующие методы распределения затрат между компонентами (отраслями водного хозяйства) комплекса являются сугубо условными, то наиболее целесообразным принципом распределения затрат следует считать пропорциональное снижение «расчетных затрат» по отраслям.

И наконец, амортизационные отчисления не имеют реновационного характера, и поэтому капиталовложения за счет амортизационного фонда должны иметь экономическую эффективность не ниже нормативной.

Библиографических ссылок 14.

УДК 626.81.85

Метод расчета оросительной нормы с учетом обеспеченности выпадения осадков. Вагапов М. Н. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 7, 1970.

Закономерности колебания оросительной нормы можно выразить в функции изменчивости (обеспеченности) суммы продуктивно используемых растением запасов естественной влаги за вегетационный период. Последняя составляет определенную долю летних и зимних осадков и устанавливается на основе композиции кривых обеспеченности осадков этих сезонов. Оросительная норма определяется как разность величины биологической потребности (найденной по существующим приближенным методам) и ординаты кривой распределения продуктивной части осадков любой требуемой обеспеченности.

Приводятся пример расчета и сводная таблица величин оросительных норм в различных районах Казахстана для основных сельскохозяйственных культур при трех

значениях обеспеченности (50, 75 и 95%); сведения о коэффициентах вариации летних и зимних осадков для двух вариантов продолжительности вегетационного периода по данным 24-х метеостанций Казахстана.

Рисунков 4, библиографических ссылок 9.

УДК 621.221.

Принципы оптимизации режима работы энерговодохозяйственного комплекса методом динамического программирования. Чокин Ш. Ч., Галынский А. И., Анойкин Н. И. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 7, 1970.

В статье рассматривается задача оптимизации режима ЭВХК при условии, что структура энерговодохозяйственного комплекса является заданной, параметры энергопроизводственной системы и неэнергетических водопотребителей выбраны, т. е. решается эксплуатационная задача. При таких условиях ущемление интересов отдельных компонентов комплекса не может быть компенсировано соответствующим увеличением затрат и, если отсутствуют резервы, повлечет возникновение ущербов в ЭВХК, которые нужно распределить оптимально среди компонентов ЭВХК.

Экономическим критерием оптимальности надо считать минимум народнохозяйственных ущербов по комплексу в целом. Для реализации поставленной задачи в статье предлагается использовать аппарат динамического программирования и находить в начале частные минимумы, т. е. решать задачу поэтапно.

На первом этапе определяется суммарная зависимость минимальных народнохозяйственных ущербов энергопроизводственной системы при некотором заданном ряде уровней потребления воды. Второй этап заключается в оптимальном распределении воды между отдельными неэнергетическими водопотребителями, входящими в комплекс.

На основании поэтапной оптимизации ущербов строится оптимальная стратегия использования водных ресурсов каждым отдельным участником энерговодохозяйственного комплекса. Сущность этой стратегии заключается в том, что для любого значения потребления воды в целом по системе из оптимальной стратегии видно, какая его часть приходится на данный компонент комплекса, при условии оптимального распределения дефицита среди компонентов ЭВХК в целом.

Третий, заключительный этап оптимизации позволяет находить минимум — миниморум народнохозяйственных ущербов в целом по всему энерговодохозяйственному комплексу путем сложения характеристик ущербов отдельных компонентов ЭВХК.

По указанному критерию можно установить наивыгоднейшее распределение нагрузок в энергосистеме и величину потребляемого расхода воды каждым участником НЭВ. В связи с тем, что элементы ЭВХК находятся в непрерывном развитии, по мере изменения исходной информации должен так же корректироваться оптимальный режим энерговодохозяйственного комплекса.

Таблиц 2, рисунков 5, библиографических ссылок 11.

УДК 621.22

Влияние тактности работы водохранилища на параметры регулирования. Чокин Ш. Ч., Ким В. Я., Редькин В. К. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 7, 1970.

Обобщенный прием расчета водохранилищ многолетнего регулирования стока, сочетающий в себе функции регулирования многолетних и сезонных колебаний стока, основывается на концепции, согласно которой годовой гидрограф характеризуется лишь одним периодом превышения расходов воды над уровнем потребления α, т. е. режим работы водохранилища считается однотактным.

Используя принципиальный подход, предложенный В. Г. Андреяновым, в рассматриваемой статье произведена оценка степени влияния сложных форм годового гидрографа. На основе соответствующих результатов произведенных подсчетов показана практическая допустимость принятия для большинства случаев расчетов длительного регулирования стока модели гидрографа с одним паводковым периодом в году.

Таблиц 2, рисунков 1, библиографических ссылок 11.

УДК 621.221.

Режим предполоводной сработки водохранилища. Давлетгалиев С. К. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 7, 1970.

В условиях эксплуатации дата и глубина предполоводной сработки водохранилища должны определяться ежегодно с учетом прогноза общего объема и даты начала предстоящего половодья.

Поскольку прогноз наиболее полно выдается в виде условной функции распределения вероятностей предсказываемого явления, то и использование его должно производиться вероятностными методами.

Для оптимальной реализации прогноза составляется матрица последствий от возможных ошибочных решений (дополнительных издержек). Она строится путем сопоставления последствий данного решения с последствиями того решения, которое мы приняли бы, если располагали абсолютно точным прогнозом.

Вероятности различных сочетаний дат окончания и глубин предполоводной сработки получаются из соответствующих им условных прогнозных функций распределения вероятностей.

Строка матрицы, минимизирующая математическое ожидание последствий ошибочных решений, определяет ту оптимальную комбинацию дат завершения и глубин предполоводной сработки, ориентируясь на которые следует назначать режим работы водохранилища в этот период.

Дается методика определения элементов матрицы как при наличии резервов в энергосистеме, установленных на ТЭС, так и при отсутствии их. Рассмотрены случаи работы одного и двух водохранилищ с ГЭС в энергосистеме совместно с тепловыми электростанциями.

Библиографических ссылок 20.

Использование аварийного резерва при эксплуатации энерготранспортного водохозяйственного комплекса. Ким В. Я., Паутов А. С. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 7, 1970.

Оптимизируется годовой режим работы водохранилища на судоходной реке. За режимный параметр взят судоходный расход в навигацию. При больших его значениях в меженный период возникают дефициты гидроэнергии. Они компенсируются включением в работу аварийного резерва энергосистемы. Вызванное этим снижение обеспеченности энергоснабжения оценивается через математическое ожидание увеличения издержек по энергосистеме за счет внезапного отключения потребителей. Издержки по топливу определяются при дифференцированном значении топливной составляющей себестоимости электроэнергии. Затраты водного транспорта апроксимируются параболической зависимостью.

В статье для Верхне-Иртышского каскада ГЭС приведено условие, минимизирующее издержки энерготранспортного комплекса.

Таблиц 1, рисунков 3, библиографических ссылок 7.

УДК 511.4824

Номограммы многолетнего регулирования стока на двух потребителей с разной обеспеченностью (P_1=95% и P_2=75%). Киктенко В. А., Логинов В. Г. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 7, 1970.

Предлагается практический прием расчетов многолетнего регулирования стока комплексным водохранилищем, обслуживающим двух водопотребителей с различной степенью гарантии плановой отдачи.

Принятая схема регулирования стока на две ступени отдачи позволяет учитывать любую степень снижения водоподачи менее ответственному потребителю за пределами его расчетной обеспеченности.

На основе обобщенной теории рассматриваются алгоритм и прием номографирования расчетов многолетнего регулирования стока водохранилищами двухцелевого хозяйственного назначения.

Расчетные номограммы составлены применительно к наиболее распространенным в практике водохозяйственного проектирования нормативам обеспеченности P_1=95% и P_2=75% при семи значениях коэффициента вариации стока C_v (0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9 и 1,0).

Опорные точки номограмм получены с помощью составленной авторами программы счета, реализующей расчетный алгоритм двухступенной схемы регулирования стока на ЭВМ «Минск-2».

Номограммы могут быть использованы как при проектировании комплексных водохранилищ, так и при их эксплуатации, поскольку они, наряду с многолетней составляющей емкости, позволяют определять также и многолетнюю диспетчерскую емкость.

На основе обобщения результатов массовых (серийных) расчетов на ЭВМ, послуживших основой для построения номограмм, получены также эмпирические зависимости, которые позволяют приближенно определять многолетние емкости (основную и диспетчерскую) по существующим графикам для одного потребителя (например, по графикам Я. Ф. Плешкова). В целом эти эмпирические формулы дают результаты, удовлетворительно согласующиеся с данными расчетов по обобщенному методу.

Таблиц 4, рисунков 6, библиографических ссылок 13.

УДК 621.22

УДК 551.481

Методика составления водного баланса водохранилищ (на примере водохранилища Бухтарминской ГЭС). Браславский А. П., Капитонова Н. П., Коротких Г. В., Краснов Б. А., Шергина К. Б. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 7, 1970.

Рассмотрена методика определения слагаемых водного баланса на примере Бухтарминского водохранилища и их увязки за месячные и годовые интервалы времени.

Приток воды к периметру водохранилища определялся по гидрометрическим измерениям стока 7 рек и по модулям стока с той части водосбора, где сток не измерялся.

Атмосферные осадки, выпадающие на поверхность водохранилища, находились как средневзвешенные по показаниям 14—16 метеорологических станций с введением поправок на выдувание, смачивание осадкомерного ветра и испарения из него. Для определения этого испарения построена новая зависимость его от скорости ветра и температуры воздуха.

Потери воды за счет оседания снего-ледяного покрова на берегах водохранилища при понижении его уровня зимой вычислялись как произведение первой производной от площади водоема по его уровню на величину изменения этого уровня, на среднюю толщину ледяного покрова и его плотность.

Объемы аккумуляции и сработки водохранилища находились по кривой емкости и среднему уровню на границах расчетного времени. Рекомендации по его определению получены на основании сопоставления результатов оценки этого уровня разными способами.

Испарение с водной поверхности водохранилища рассчитано по новой формуле, учитывающей кроме обычных факторов также влияние разности температуры поверхности воды и воздуха над ней.

Величина испарения с поверхности снеголедяного покрова водохранилища оценивалась по формуле П. П. Кузьмина, при этом температура поверхности снега находилась расчетом, используя уравнение теплового баланса поверхности снеголедяного покрова.

Водный баланс Бухтарминского водохранилища за годы 1962, 1963 и 1964 замыкается за год с небольшой невязкой до 2%, за месяц — до 10%. Среднеквадратичная ошибка месячных балансов составляет 5%. Достаточная точность определения слагаемых баланса позволяет рекомендовать изложенную методику для практического использования.

Таблиц 15, рисунков 9, библиографических ссылок 19.

УДК 621.22.01+621.221.0

Об учете инерционной и циклической связи при долгосрочном прогнозировании вероятностных величин стока. Маматканов Д. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 7, 1970.

Первоочередной задачей водохозяйственных и водоэнергетических расчетов является предвычисление характеристик будущего режима стока, свойственного предстоящему периоду эксплуатации гидроустановок. Для решения этой задачи необходимо изучать закономерности, которые проявляются в многолетних колебаниях используемого источника воды, и предвидеть будущий режим его изменения. Без решения этой задачи невозможно правильное планирование, проектирование и эксплуатация гидротехнических сооружений.

Более правильным было бы, если прогноз производился путем описания процесса стока как сложного процесса Маркова, требующего учета корреляционной связи не только непосредственно смежных лет, но и с более ранними годами, т. к. процесс стока является сложным стохастически зависимым процессом. Однако в этом случае пока неизвестен тот предел i, до которого необходимо учитывать корреляционные связи между стоком смежных лет. А это затрудняет применение указанного математического аппарата к расчетам прогнозирования.

Результаты исследований показывают, что в практических расчетах предвидения вероятностных величин стока, оказывается, можно учитывать не все корреляционные связи между стоком смежных лет, предшествующие прогнозируемому году, а лишь некоторые из них, играющие наибольшую роль в формировании последнего и имеющие с ним более тесные корреляционные связи.

В связи с этим в настоящей работе изложены способы долгосрочного прогнозирования вероятностных величин годового стока с одновременным учетом корреляционной связи непосредственно смежных лет и «циклических» связей, выявленных по прошлому ряду наблюдений в предположении, что выявленная закономерность колебаний повторится и в будущем. При этом в основу расчета положены известные методы С. А. Крицкого, М. Ф. Менкеля и Н. А. Картвелишвили применительно к принятому условию.

Такой учет «циклических» связей наравне с использованием связи непосредственно смежных лет позволит получить прогнозы, отражающие территориальные особенности многолетних колебаний годовых величин стока в конкретном створе.

Приведенные практические примеры расчетов прогнозирования среднегодовых уровней оз. Байкал показывают, что предлагаемые приемы прогнозирования характеризуются простотой, легкостью расчетов и полнотой прогнозных характеристик, а получаемые результаты в виде чистого прогноза хорошо согласуются с данными наблюдений.

Одним из основных преимуществ предлагаемых приемов является то, что они могут быть использованы в расчетах регулирования речного стока с учетом территориальной особенности многолетних колебаний его и стохастических связей, свойственных конкретному створу рек, как методом статистических испытаний (методом Монте-Карло), так и методом аналитическим.

Таблиц 2, рисунков 1, библиографических ссылок 26.

УДК 551.508.7

К вопросу оценки влияния атмосферного давления на испарение с водной поверхности. Браславский А. П., Краснов Б. А. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 7, 1970.

В статье рассматривается вопрос о влиянии атмосферного давления на интенсивность испарения с поверхности водоемов. Этот вопрос имеет важное значение при оценке слоя испарения с поверхности горных водоемов и водохранилищ СССР.

До сих пор среди исследователей нет единого мнения по этому вопросу. С целью его выяснения, на Большом Алматинском озере на высоте 2500 *м* над уровнем моря, при среднем значении атмосферного давления порядка 750 *мб* (75%) от нормального, были проведены исследования интенсивности испарения на плавучих испарителях. Полученные результаты сопоставлялись с материалами наблюдений за интенсивностью испарения в зоне с нормальным атмосферным давлением, при одной и той же скорости ветра и разности упругости водяного пара. Интенсивность испарения оказалась одинаковой, что доказывает отсутствие влияния атмосферного давления на испарение в пределах изменения атмосферного давления порядка (25%) от нормального.

Таблиц 1, рисунков 1, библиографических ссылок 10.

УДК 551.437

Математическая модель развития эрозионного рельефа водосборов. Бусалаев И. В. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 7, 1970.

Сформулирована математическая модель эрозионного развития рельефа водосборов, позволяющая изучить эволюцию гипсометрической кривой бассейна в процессе его геологического развития. В основу положена гипотеза В. Г. Глушкова о том, что интенсивность эрозии пропорциональна полной энергии стока. Предполагается также, что денудационный процесс является дельта-коррелированным случайным процессом, используется уравнение А. Н. Колмогорова.

Рисунков 1, библиографических ссылок 7.

УДК 551,48+519.2

Стохастическое дифференциальное уравнение стока и распределение вероятностей расходов горных рек. Бусалаев И. В. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 7, 1970.

Рассматривается возможность получения функции распределения вероятностей расходов реки на основе теории стохастических дифференциальных уравнений и вероятностных процессов Маркова.

В результате этого удается связать форму кривой обеспеченности стока с морфометрическими и гидрологическими характеристиками водосбора.

Библиографических ссылок 7.

УДК 551.57

Расчет поправки на испарение при измерении атмосферных осадков осадкомером Третьякова. Браславский А. П., Шергина К. Б. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 7, 1970.

В результате проведенных экспериментов получена зависимость $\frac{E}{e_0 - e_{200}} = f(W_{200})$, используемая в дальнейшем для оценки поправки на испарение из осадкомерного ведра осадкомера Третьякова.

Температура испаряющейся поверхности (осадков), необходимая для оценки максимальной упругости водяного пара, рассчитывается исходя из уравнения теплового баланса осадкомерного ведра.

Составлены графики для оценки перегрева осадкомерного ведра (Δt) в зависимости от широты местности (φ^c), скорости ветра и времени года.

Проверка рекомендуемой методики по материалам наблюдений за испарением осадков из ведра осадкомера Третьякова показала, что применение уравнения теплового баланса дает более высокую точность расчета, чем ранее предложенные эмпирические зависимости.

Таблиц 4, рисунков 6, библиографических ссылок 2.

УДК 532.517.4

О гидравлических сопротивлениях и замыкании уравнений Рейнольдса для установившихся русловых потоков. Картвелишвили Н. А. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 7, 1970.

Рассматриваются противоречия, к которым приводят формулы классической гидравлики для гидравлических сопротивлений. Предлагается гипотеза, устраняющая эти противоречия, и на ее основе выводится формула для пропускной способности призматического русла с произвольной формой сечения. Эта формула обобщается на случай, когда шероховатости различных частей смоченной поверхности различны.

В потоках непризматической формы автор различает две системы напряжений: напряжения, вызываемые гидравлическим трением, и напряжения, связанные с кривизной линии тока усредненных локальных скоростей. Выдвигается гипотеза, связывающая те и другие напряжения с полем усредненных скоростей, на основании которой выводятся уравнения для всех шести компонентов тензора пульсации (тензора напряжений). Эти уравнения замыкают систему гидродинамических уравнений Рейнольдса, их решение дает поле усредненных скоростей и давлений в призматических и непризматических потоках.

УДК 532.59

Об устойчивости безволнового течения на быстротоках. Картвелишвили Н. А. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 7, 1970.

На основании опытов Е. П. Федорова даются рекомендации о расчетных значениях корректива количества движения для критерия устойчивости равномерного течения. Дается анализ критерия устойчивости для призматических русел прямоугольного, треугольного, параболического и кругового сечения, приводятся соответствующие таблицы и графики, облегчающие использование критерия в этих случаях. Устанавливается строгий критерий устойчивости безволнового течения для непризматических потоков любой формы, допускающих одномерную идеализацию, по отношению к малым возмущениям.

Таблиц 1, рисунков 4, библиографических ссылок 5.

УДК 627.11

О роли абразивного истирания скалы при местном размыве, по данным натурных исследований. Ахмедов Т. Х. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 7, 1970.

Опыт эксплуатации водосливных плотин показывает, что если даже в их основании лежит достаточно прочная скала, в нижнем бьефе могут возникать значительные размывы. В течение ряда лет автором проводились натурные наблюдения за деформа-

циями нижнего бьефа одной высоконапорной плотины. Размывы скального дна у этой плотины достигли такого размера, что стали угрожать ее устойчивости. Ремонтные работы, проводившиеся методом подводного бетонирования, не дали результата. Все отремонтированные участки разрушались в первый же паводок.

Продукты разрушения дна и левого берега уносились потоком вниз по течению и образовали песчано-галечниковую отмель в нижнем бьефе здания ГЭС и судоходного шлюза. Это создавало нежелательный подпор и затрудняло судоходство.

В 1965 г. было решено изменить конструкцию носка плотины. Короткий носок заменен носком-трамплином, создающим сопряжение бьефов свободно отброшенной струей вместо поверхностного режима. Для проведения строительных работ нижний бьеф водосливной плотины был отделен перемычкой и осушен. Такой редчайший случай в практике эксплуатации сооружения дал возможность осмотреть разрушения скального основания.

Данные этих наблюдений, опыты автора, а также анализ опубликованных материалов позволили автору предложить новую гипотезу процесса разрушения скалы при местном размыве. Важная роль в этом процессе отводится абразивному истиранию и разрушению.

Рисунков 5, библиографических ссылок 10.

УДК 627.82 : 532.5

Определение силы полного давления потока на расщепители. Дюсенова Р. Х. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 7, 1970.

Изучение современного состояния вопроса об определении силового воздействия потока на расщепитель показало необходимость дополнительного исследования. На основании теоретических проработок и экспериментов автором получены расчетные зависимости для определения полного гидродинамического давления и его составляющих.

Для уточнения методов расчета гидродинамического давления необходимо учитывать влияние конструктивных характеристик гасителя на величину силы давления, а также пульсацию давления. Были рассмотрены два случая конструктивного расположения расщепителей при переменных значениях других параметров.

А. Исследование силового воздействия потока на расщепители, устанавливаемые на носке плотины, на концевых участках консольных перепадов, быстротоков.

Б. Исследование силового воздействия потока на расщепители, устанавливаемые на сливной грани плотины.

Для каждого из этих случаев получены расчетные зависимости для определения силы полного давления потока на расщепители.

Рисунков 3, библиографических ссылок 5.

УДК 532.537.4

Экспериментальное исследование динамического воздействия потока на дно при растекании его в тупике прямоугольной формы. Пичугина А. А. Проблемы гидроэнергетики и водного хояйства, вып. 7, 1970.

При размыве скальных и связных грунтов необходимо знать, главным образом, максимальное (осевое) давление потока на дно ямы размыва.

В статье приводятся данные экспериментального определения давления, оказываемого струей на дно и стенки тупика прямоугольной формы. Произведено сравнение величины давления струи в данном случае с результатами опытов Н. Ф. Сальниковой по определению величины давления потока на дно русла при его свободном растекании и материалами Е. Хойзлера, полученными при измерении давления круглой струи на перпендикулярно расположенную пластину.

Опыты показали, что величина осевого давления зависит от тупика, его параметров, от соотношения его глубины к ширине. С увеличением ширины тупика кривая $\Delta P=f(h)$ приближается к кривой осевого давления, полученной Н. Ф. Сальниковой в опытах, относящихся к случаю безграничного растекания затопленной струи. При сокращении ширины тупика уменьшение осевого давления происходит менее интенсивно.

Таблиц 1, рисунков 2, библиографических ссылок 3.

УДК 621.318.563—621.316.57.

О возможностях экстренного снижения мощности гидротурбин вводом воздуха. Тамадаев А. М., Кузьмичев А. Т. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 7, 1970.

Эксперименты, проведенные на полупромышленной установке (Опытная ГЭС Казахского НИИЭ), подтверждают возможность быстрого снижения мощности гидротурбин вводом воздуха в область рабочих колес, когда возникает в этом необходимость, для сохранения устойчивости параллельной работы. Вводя воздух в отсасывающую трубу, экспериментаторы получили снижение мощности турбин на величину 0,2 N_0 за время 0,2 сек. При этом повышение давления перед турбиной значительно меньше, чем при закрытии направляющего аппарата для тех же целей. Это свидетельствует о демпфировании гидроударных явлений воздухом. В случае подачи воздуха через рабочее колесо место ввода необходимо максимально приближать к рабочему колесу, иначе возникает предварительное кратковременное увеличение (заброс) мощности турбины.

Рисунков 6, библиографических ссылок 8.

УДК 621.051.025 или 532.501.32

Аварийное регулирование мощности гидротурбины холостым выпуском. Рубцов Ю. А. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып 7, 1970.

Предлагается способ аварийного регулирования мощности гидротурбины холостым выпуском для повышения динамической устойчивости параллельной работы агрегатов ГЭС с системой. Приводятся расчетные зависимости, полученные путем преобразования уравнений гидроудара Жуковского, а также уравнения для случая, когда можно пренебречь упругими свойствами воды и материала водоводов. Приведен пример, иллюстрирующий технику выполнения расчетов.

Рисунков 1, библиографических ссылок 6.

УДК 621.224.0

Реконструкция гидротурбины типа РО 82—ГМ 50. Тамадаев А. М., Кузьмичев А. Т., Гамбургер Г. Г. Проблемы водного хозяйства и энергетики, вып. 7, 1970.

В статье дается анализ конструктивных недостатков турбины типа РО82—ГМ50, выпущенной заводом «Уралгидромаш». Приведена схема реконструкции радиально-упорного подшипника. Сочетание сферического самоустанавливающегося роликоподшипника с гидростатическим подшипником (устройство, разгружающее осевое усилие) дало возможность сохранить узел на подшипниках качения, которые лучше моделируют механические потери гидроагрегатов на полупромышленных экспериментальных установках. Как показали расчеты и опыт эксплуатации данного узла, возможна полная замена подшипников скольжения гидростатическими подшипниками.

Рисунков 2.

УДК 532.537.4

Винтообразное движение потока с переменным расходом в открытом канале прямоугольного сечения. Федорова Т. А. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 7, 1970.

Большой практический интерес представляет безнапорное движение потока с переменным расходом в длинных каналах, когда дополнительная масса жидкости поступает в канал через щель или отверстия, расположенные на боковой стенке у его дна. В результате нецентрального подвода жидкости движение потока в канале носит очень сложный винтообразный характер. При этом за счет увеличения расхода вдоль потока меняются и все его кинематические и динамические характеристики, т. е. движение потока в этом случае неравномерное. Исследования показали, что входящие струи жидкости, распространяясь вдоль дна канала, не успевают полностью перемещаться с основной массой потока и занимают его придонную часть. Указанное обстоятельство дало возможность при описании движения потока в данном случае разбить его на две зоны: струйную (придонную) и циркуляционную.

В статье на основе анализа производных в уравнении движения, записанного в форме Громека-Ламба, показывается, что для приближенного описания винтообразных потоков с переменным расходом в циркуляционной зоне при условии, если длина канала значительно больше его ширины, а порядок изменения составляющих скоростей по осям координат одинаков, можно пользоваться уравнениями, которые строго применимы для однородных циркуляционных потоков. Далее, на основании анализа результатов работ по винтовому движению потока, а также экспериментальных исследований автора предлагается схема расчета профилей, составляющих скорости по осям коорди-

нат в поперечных сечениях безнапорного винтообразного потока с переменным расходом.

Рисунков 3, библиографических ссылок 16.

УДК 532.537.4.

Исследование растекания водяной струи в ограниченном пространстве. Пигучина А. А. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 7, 1970.

Многими исследователями для целей инженерной гидравлики использовалась теория растекания свободных струй. На наш взгляд, для изучения связи между параметрами потока и размывом в грунте более правильным является использование теории растекания несвободных струй, в частности, теории удара струи в тупик.

Схема растекания потока в яме размыва принимается аналогичной схеме растекания струи в ограниченном пространстве. Сделана попытка проверить экспериментально применимость закономерностей движения газовых струй в глубоких тупиках к движению водяных струй в тупиках, имитирующих яму размыва. При этом размеры тупиков были соизмеримы между собой. На первом этапе изучалось растекание плоской струи в тупике прямоугольной формы.

Давление в струе и окружающем пространстве распределяется по гидростатическому закону, так что поведение отдельных струек жидкости не отличается от поведения их в среде с постоянным давлением, как это отмечалось при исследованиях газовых струй.

Результаты опытов показали, что изменение осевой скорости струи, бьющей в тупик прямоугольной формы, отлично от изменения ее в случае свободной струи. При достаточной длине тупика изменение осевой скорости может быть описано закономерностью для газовых струй, бьющих в тупик прямоугольной формы при введении экспериментальной постоянной (коэффициента расширения струи), равной для нашего случая 0,18.

Таблиц 1, рисунков 7, библиографических ссылок 5.

УДК 627.834

Исследование ферганского водозабора с донным циркуляционным порогом. Ахмедов Т. Х., Шаг И. П. Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 7, 1970.

Выбор схемы гидроузла является одним из самых ответственных моментов при проектировании. Положение осложняется тем, что имеется несколько схем водозаборов, которые могут быть использованы в данных условиях. В то же время критерия качества водозаборов, который мог бы позволить сравнить между собой различные схемы, не существует.

На основе исследований, выполненных при изучении водозабора на р. Иссык, и анализа опубликованных данных предлагается ввести критерий качества водозаборов. Это позволит сравнить между собой различные схемы.

Для гидравлического расчета донного циркуляционного порога предлагается расчетная зависимость, которая позволит более обоснованно определить параметры порога.

Исследования водозабора на р. Иссык производились для конкретного объекта, поэтому опытные данные получены для небольшого диапазона изменения параметров сооружения. Для развития предлагаемой схемы расчета желательно дальнейшее более широкое изучение.

Таблиц 3, рисунков 4, библиографических ссылок 8.

СОДЕРЖАНИЕ

I. Водохозяйственные системы

В. П. Захаров. Вопросы экономической эффективности капитальных вложений в водном хозяйстве 3
М. Н. Вагапов. Метод расчета оросительной нормы с учетом обеспеченности выпадения осадков 18
Ш. Ч. Чокин, А. И. Галынский, Н. И. Анойкин. Принципы оптимизации режима работы энерговодохозяйственного комплекса методом динамического программирования 25

II. Регулирование стока

Ш. Ч. Чокин, В. Я. Ким, В. К. Редькин. Влияние тактности работы водохранилища на параметры регулирования 37
С. К. Давлетгалиев. Режим предполоводной сработки водохранилища. 48
В. Я. Ким, А. С. Паутов. Использование аварийного резерва при эксплуатации энерготранспортного водохозяйственного комплекса . . . 61
В. А. Киктенко, В. Г. Логинов. Номограммы многолетнего регулирования стока на двух потребителей с разной обеспеченностью (P=95% и P=75%) : 69

III. Гидрологические и топографические характеристики

А. П. Браславский, Н. П. Капитонова, В. Г. Коротких, Б. А. Краснов, К. Б. Шергина. Методика составления водного баланса водохранилищ (на примере водохранилища Бухтарминской ГЭС) 80
Д. Маматканов. Об учете инерционной и циклической связи при долгосрочном прогнозировании вероятностных величин стока . . . 111
А. П. Браславский, Б. А. Краснов. К вопросу о влиянии атмосферного давления на испарение с водной поверхности 121
И. В. Бусалаев. Математическая модель развития эрозионного рельефа водосборов : 125
И. В. Бусалаев. Стохастическое дифференциальное уравнение стока и распределение вероятностей расходов горных рек 132
А. П. Браславский, К. Б. Шергина. Расчет поправки на испарение при измерении атмосферных осадков осадкомером Третьякова . . . 136

IV. Гидравлика сооружений и открытых русел

Н. А. Картвелишвили. О гидравлических сопротивлениях в замыкании уравнений Рейнольдса для установившихся русловых потоков . . 155
Н. А. Картвелишвили. Об устойчивости безволнового течения на быстротоках 166
Т. Х. Ахмедов. О роли абразивного истирания скалы при местном размыве по данным натурных исследований 175
Р. Х. Дюсенова. Определение силы полного давления потока на расщепители 181
А. А. Пичугина. Экспериментальное исследование гидродинамического воздействия потока при растекании его в тупике прямоугольной формы 187
А. М. Тамадаев, А. Т. Кузьмичев. О возможностях экстренного снижения мощности гидротурбин вводом воздуха в ее проточную часть . 190
Ю. А. Рубцов. Аварийное регулирование мощности гидротурбины холостым выпуском 197

А. М. Тамадаев, А. Т. Кузьмичев, Г. Г. Гамбургер. Реконструкция гидротурбин РО82—ГМ50 206
Т. А. Федорова. Винтообразное движение потока с переменным расходом в открытом канале прямоугольного сечения 211
А. А. Пичугина. Исследование растекания водной струи в ограниченном пространстве 221
Т. Х. Ахмедов, И. П. Шаг. Исследование Ферганского водозабора с донным циркуляционным порогом 229
Рефераты 237

ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА
ВЫПУСК 7

Утверждено к печати Ученым советом Казахского научно-исследовательского института энергетики Министерства энергетики и электрификации СССР

Редактор *Р. Тищенко*, Худож. редактор *В. Ткаченко*
Техн. редактор *А. Арестова*. Корректор *Н. Самохина*

Сдано в набор 21/IV-1970 г. Подписано к печати 20/XI-1970 г.
Формат 70×108$^{1}/_{16}$—15,5=21,7 усл. п. л. (20,0 уч.-изд. л.).
УГ07671. Тираж 1000. Цена 2 руб. 20 коп.

Издательство «Казахстан», г. Алма-Ата, ул. Кирова, 122.

Заказ № 2313. Типография № 18 Главполиграфпрома Госкомитета
Совета Министров Казахской ССР по печати, г. Алма-Ата, ул. Тулебаева, 16.

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
		$-\alpha_u \frac{F_3}{F_1}(e_0 - e_{200})\Big] + t_{200}$	$-\alpha_u \frac{F_3}{F_1}(e_0 - e_{200})\Big] + t_{200}$
151	4 сверху	$F_8 = 0,25\,\pi D^2$ *см*^{2}	$F_3 = 0,25\,\pi D^2$ *см*^{2}
151	2 снизу	$1 = 40$ *см*	$l = 40$ *см*
151	1 снизу	$1 - \rho = 0,5$	$l - \rho = 0,5$
152	10 сверху	$11,88 = 10^8\,\delta$	$11,88 = 10^8\,\alpha$
152—154		Колонку «Примечание» в Программах I и II считать недействительной	
153	В Программе 1, ьо 2 колонке „Адрес“ в строке 8	50	62
191	25 снизу	машины	шины
192	11 снизу	$E_2 = \left(\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_{1a}}{\gamma} + z_1\right) - \left(\frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_{5a}}{\gamma} - z_5 + \Delta h_{1-5}\right)$	$E_2 = \left(\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_{1a}}{\gamma} + z_1\right) - \left(\frac{v_5^2}{2g} + \frac{p_{5a}}{\gamma} - z_5 + \Delta h_{1-5}\right)$
193	20 сверху	v_3	v_5
199	4 снизу	$t < \tau\,\Phi(t-\tau) = 0, H(t-\tau) = H_0$	$t < \tau\ \Phi(t-\tau) = 0,\ H(t-\tau) = H_0$
199	14 снизу	$F(t-\tau)$	$-F(t-\tau)$
201	13 сверху	Q	$\overline{Q_\tau}$
206	16 сверху	925 *квт*	925 *ква*
228	9 снизу	Плетнев	Плетнева

Зак. 2313