

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ,
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ

УДК 556.18

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ АСУАНСКОГО
ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА р. НИЛ¹

© 2013 г. Г. Х. Исмайлов*, В. М. Федоров*, М. Р. Яссер**

*Институт водных проблем РАН
119333 Москва, ул. Губкина, 3
E-mail: ism37@mail.ru

**Московский государственный университет природообустройства
127550 Москва, ул. Прянишникова, 19

Поступила в редакцию 09.06.2010 г.

Рассмотрены построение и реализация имитационной модели функционирования Асуанского водохозяйственного комплекса. Дана оценка экологической и гидролого-водохозяйственной обстановки р. Нил до и после строительства Асуанского гидроузла. Даны рекомендации по режиму работы Асуанского водохозяйственного комплекса в изменяющихся природно-хозяйственных условиях.

Ключевые слова: гидроузел, плотина, водохранилище, расчетная обеспеченность, полезная водоотдача, потребление воды, высотная Асуанская платина, межбассейновые связи, водоохранные комплексы, предельно-допустимая концентрация, предельно-допустимые сбросы

DOI: 10.7868/S0321059613030061

ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Бассейн р. Нил занимает 3.03 млн км² и включает территории десяти государств Африканского континента: Египта, Судана, Эфиопии, Эритреи, Бурунди, Руанды, Кении, Уганды, Танзании и Демократической Республики Конго. Государства Нильского бассейна являются аграрными странами со слаборазвитой промышленностью. Наибольшие темпы экономического развития и, соответственно, наибольший рост потребления воды наблюдается в Египте. Заметно возрастает потребление воды в засушливых зонах Судана и Эфиопии. Если Египет и Судан используют воду Нила в качестве главного источника орошения земель и производства электроэнергии, то государства в верхнем течении реки заинтересованы в развитии рыболовства, судоходства, а также в использовании энергетических ресурсов Нила.

Среди государств бассейна Нила наиболее уязвим в плане обеспеченности пресной водой Египет, в котором 90% населения проживает в долине и дельте Нила и полностью зависит от вод этой реки. В настоящее время на территорию Египта поступает 55–60 км³ нильской воды, а на долю

грунтовых вод приходится лишь около 3 км³. При этом суммарная величина составляет 58–63 км³/год. Однако быстрый рост населения и увеличение площади орошаемых земель в Эфиопии требуют не менее 14 км³ нильской воды. В связи с этим поступление вод на территории Египта может уменьшиться до 40–45 км³, что приведет здесь к значительной напряженности водохозяйственного баланса вплоть до появления дефицита водных ресурсов. А это в свою очередь вызовет снижение темпов развития экономики Египта и уменьшение производства продовольствия для населения страны. В этих условиях при ведущей роли Асуанского водохозяйственного комплекса (ВХК) в обеспечении водой населения и экономики Египта возникает задача определения таких режимов его функционирования, которые обеспечивали бы устойчивое развитие экономики и сохранение экологического благополучия в долине и дельте р. Нил с учетом возможного роста водопотребления в остальных государствах бассейна и установления нового международного правового режима использования водных ресурсов р. Нил. Решение данной задачи требует анализа и оценки фактических притока воды в Асуанское водохранилище, потерь на испарение с его водной поверхности, степени его заиления и режимов попусков в ниж-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-05-00193а).

ний бьеф как в современных условиях, так и ближайшей перспективе.

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АСУАНСКОГО ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА

Для исследования таких больших систем, как Асуанский ВХК, требуется три аспекта описания: морфологическое, функциональное и информационное. Морфологическая структура ВХК Асуанского водохранилища, как и других больших систем, может быть распределена на иерархические уровни по территориально-отраслевому принципу. Самый верхний уровень – ВХК бассейна Нил, который включает ВХК речных бассейнов Голубого и Белого Нила, р. Атбара и нижнего течения и дельты Нила. Последние состоят из систем отдельных водохозяйственных районов, внутри которых выделяются балансовые участки, тяготеющие к разным балансовым створам, и типовые водопотребители.

Отраслевой разрез ВХК Асуанского водохранилища включает в себя семь основных специализированных систем: коммунально-бытовое водоснабжение, промышленное водоснабжение, орошение, водное благоустройство, рыбное хозяйство, гидроэнергетику, водный транспорт. Они формируют территориально-отраслевые комплексы на всех уровнях иерархии. На нижнем уровне находятся объекты, потребляющие и использующие воду. Все большее значение приобретают рекреационные и водоохраные мероприятия. Системы высшего уровня ВХК бассейна р. Нил призваны управлять межбассейновыми и государственными водохозяйственными связями.

Основу Асуанского ВХК составляют высотная Асуанская плотина (ВАП) и водохранилище Насер. Строительство ВАП началось в январе 1963 г., а окончилось – в октябре 1967 г. Она расположена в 7 км южнее г. Асуана и представляет собой плотину с шестью тоннелями. Каждый тоннель разветвляется в своем окончании на два тоннеля, подающих воду на 12 турбин ГЭС. Затем вода попадает в открытый канал, расположенный на восточном берегу Нила. На западном берегу есть канал для пропуска катастрофических паводков. Общая длина высотной плотины – 3600 м, причем 250 м – над рекой, остальная часть – по обе стороны от реки, длина правого крыла 2325 м (на восточной стороне), левого – 755 м (на западной стороне). Отметка гребня плотины – 196 м абс. Ширина у дна – 280, у вершины – 40 м. Максимальный уровень воды, на который рассчитано водохранилище, составляет 183 м абс., НПУ – 180 м абс., и

УМО – 147 м абс. Длина водохранилища, образованного ВАП, составляет 500 км при средней ширине 12 км и площади водной поверхности 6500 км². Вместимость водохранилища – 162 км³, причем 90 и 22 км³ – многолетняя и сезонная составляющие, 31 км³ – мертвый объем и 19 км³ – емкость для срезки катастрофических паводков.

Гидроэлектростанция находится на выходе 12 тоннелей, мощность каждого из 12 генераторов – 175 тыс. кВт. Общая установленная мощность ГЭС – 2100 МВт, среднегодовая выработка электроэнергии – 10 млрд кВтч.

Асуанское водохранилище – стратегически важное сооружение для экономики Египта. Оно обеспечивает водой орошаемое земледелие на площади около 3.5 млн га, а электроэнергией – промышленность и население. Кроме того, оно способствует улучшению судоходства по Нилу и обеспечивает защиту долины и дельты реки от высоких паводков. В результате его строительства улучшились социально-экономические условия жизни населения страны.

Экономические выгоды от создания ВАП и водохранилища следующие (млн египетских фунтов):

расширение сельскохозяйственных угодий и превращение пустынных территорий в орошаемые поля (48);

повышение водообеспеченности старых орошаемых земель (56);

защита страны от наводнений (10);

улучшение судоходства (5);

повышение мощности старой Асуанской ГЭС до 344 МВт и выработки ею электроэнергии до 2 млрд кВтч (100).

К этому следует добавить 300 млн фунтов – доход государства от продажи вновь осваиваемых земель. В конечном итоге экономический эффект от создания Асуанского ВХК составляет 555 млн фунтов, что окупило его создания менее чем за два года.

В современных условиях основной водозабор осуществляется в нижнем бьефе Асуанского гидроузла. При этом отбор воды рассредоточен по длине реки вплоть до ее дельты. Для подачи воды в крупные магистральные каналы построены барражи, обеспечивающие самотечное поступление воды в них (рис. 1). Кроме того, начиная с 1998/1999 г. осуществляется водозабор из верхнего бьефа гидроузла в канал Тошка. Ежегодные объемы попуска в нижний бьеф Асуанского водохранилища за 1971/1972–2004/2005 гг. колебались от 53 до 71 км³/год (в среднем 57.1 км³/год). На

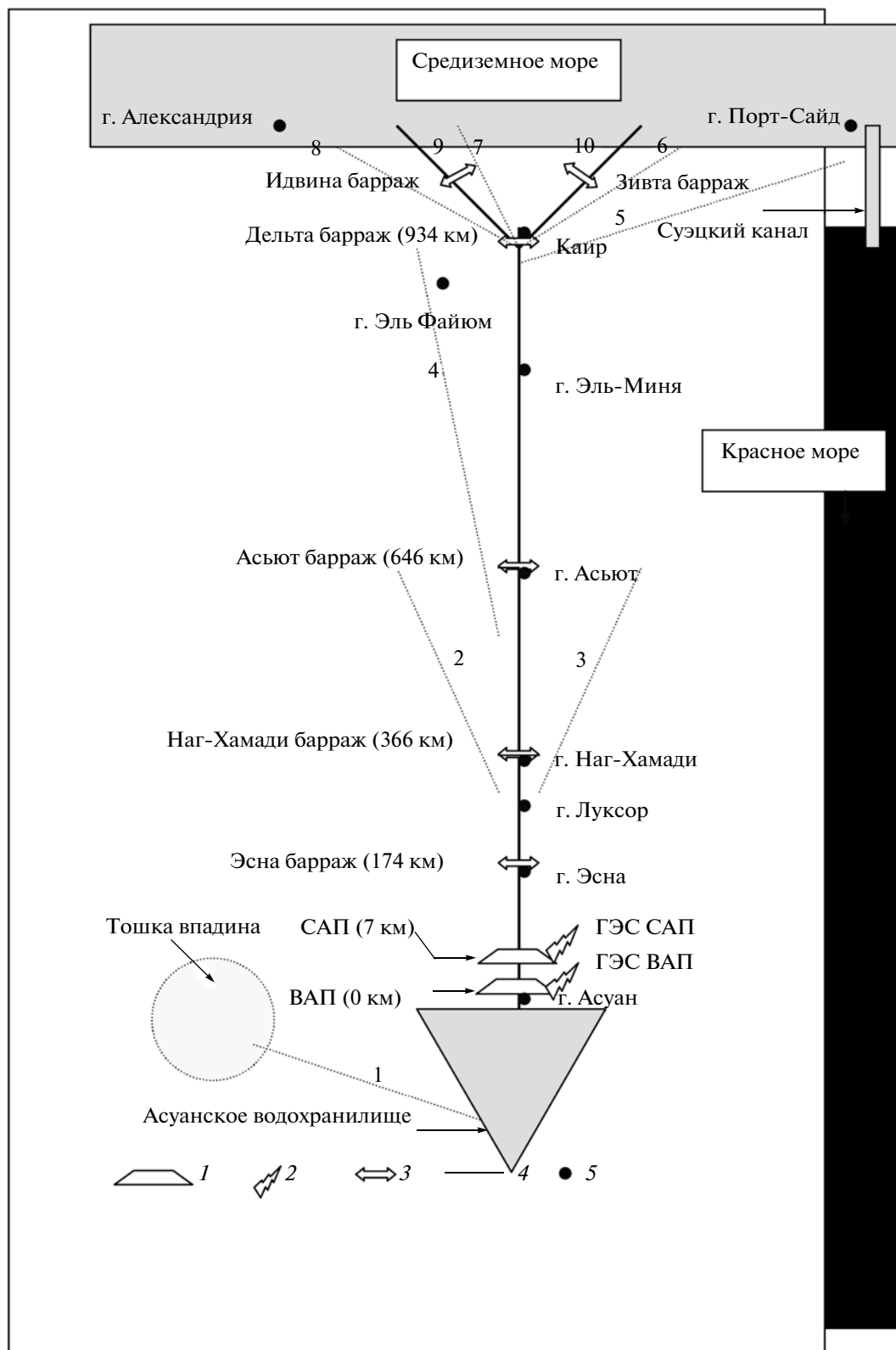


Рис. 1. Линейно-узловая схема ВХК Асуанского водохранилища. Каналы: 1 – Эль-Ших Зайед, 2 – Западный Канал Наг-Хамеди, 3 – Восточный Канал Наг-Хамеди, 4 – Ибрахимия, 5 – Исмаилия, 6 – Эль-Тауфики, 7 – Эль-Минуфия, 8 – Эль-Бехейра. Рукава: 9 – Розетта, 10 – Дамиетта. 1 – плотина, 2 – ГЭС, 3 – барраж, 4 – канал, 5 – город. САП – Средняя Асуанская платина.

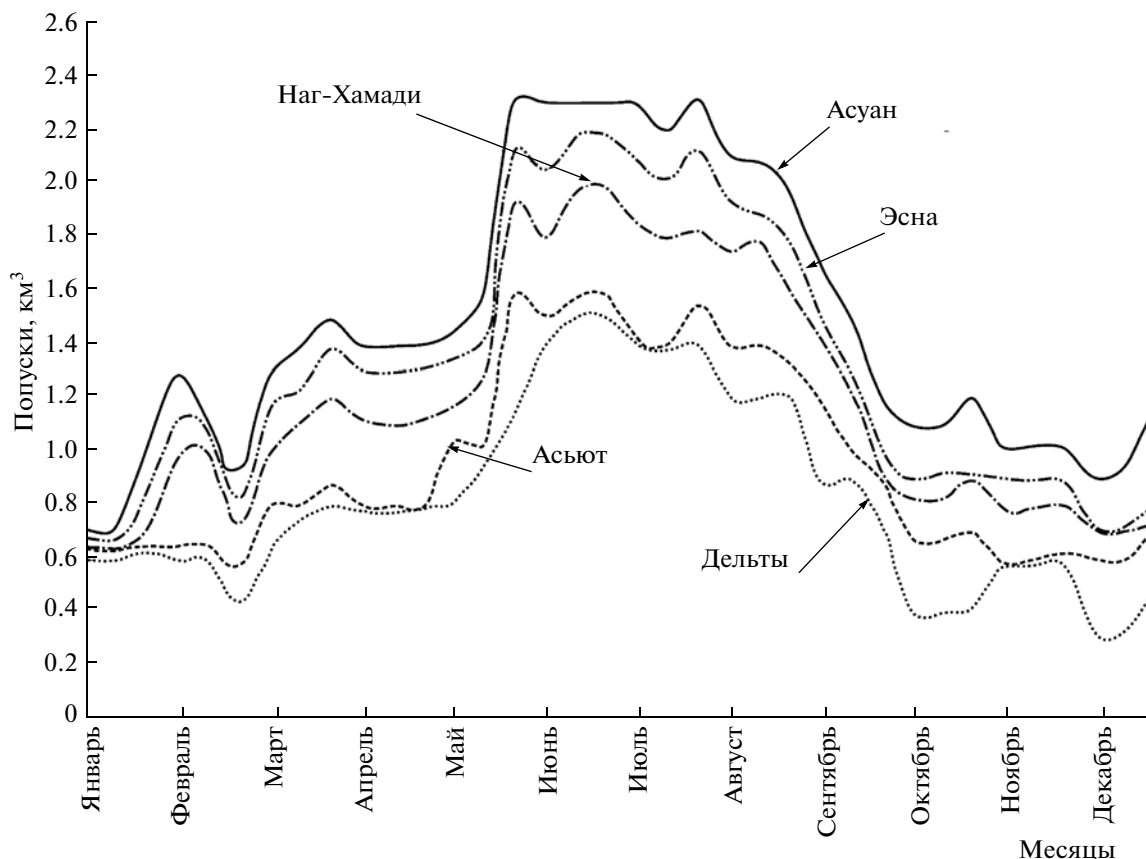


Рис. 2. Гидрографы стока в характерных створах нижнего течения и дельты р. Нил за 1990 г.

рис. 2 приведены гидрографы стока р. Нил в характерных створах нижнего течения и дельты реки за 1990 г. В соответствии с этими данными водозабор на участке Асуан–Эсна составил 6.2, Эсна–Наг-Хаммади – 4.8, Наг-Хаммади–Асьют – 10.40, Асьют–дельта – 32.0 км³/год (суммарно 53.4 км³/год).

В естественных условиях годовой сток р. Нил в створе Асуанского гидроузла (г/у) колебался от 42 до 140 км³/год при среднем многолетнем объеме 82.8 км³/год. В современных условиях средне-многолетний сток в нижнем бьефе Асуанского г/у снизился до 57, в море до 2 км³/год, 55 км³/год расходуются на хозяйственные нужды. Следует отметить, что это количество воды соответствует объему воды, выделяемому Египту по межгосударственному соглашению с Республикой Судан. Дальнейший рост потребления воды приведет к полному прекращению стока р. Нил в Средиземное море, что может резко ухудшить экологические условия в дельте реки, а следовательно — условия жизни населения. Особенно пострадает естественное размножение рыб за счет уменьше-

ния кормовой базы, ухудшения качества речных вод, вторжения морских вод в водоемы дельты.

Современное водопотребление населением и хозяйством Египта обеспечивается комплексным попуском из водохранилища, объем которого за 2000/2001–2004/2005 гг. в среднем составил 60.5 км³/год при крайних значениях от 57.1 до 67.1 км³/год (табл. 1).

Комплексный попуск включает в себя энергетический, навигационный, ирригационный и рыбохозяйственный попуски, а также попуск для обводнения природных комплексов нижнего течения и дельты р. Нил. Хотя эти попуски в настоящее время обеспечивают санитарные и экологические условия, по мере отбора воды на хозяйственные нужды вниз по течению реки на фоне непрерывного поступления в реку сбросных и дренажных вод не обеспечивается разбавление этих вод и сохранение необходимых условий для существования и воспроизводства рыб. Поэтому при управлении водными ресурсами Асуанского г/у необходимо рассмотреть возможности увеличения санитарного и экологического попусков. Все это

Таблица 1. Ежегодные попуски в нижний бьеф Асуанского водохранилища и водозабор из верхнего бьефа в канал Тошка, млн м³

Годы	Водозабор в канал Тошка	Попуск в р. Нил	Годы	Водозабор в канал Тошка	Попуск в р. Нил	Итого
1971/1972	0	55955	1988/1989	0	53388	
1972/1973	0	55240	1989/1990	0	54000	
1973/1974	0	56295	1990/1991	0	53795	
1974/1975	0	55797	1991/1992	0	54245	
1975/1976	0	53218	1992/1993	0	55295	
1976/1977	0	56140	1993/1994	0	55465	
1977/1978	0	61780	1994/1995	0	55500	
1978/1979	0	59724	1995/1996	0	55500	
1979/1980	0	56710	1996/1997	0	55990	
1980/1981	0	56600	1997/1998	0	55575	
1981/1982	0	59000	1998/1999	12596	71435	84031
1982/1983	0	58730	1999/2000	14088	67060	81148
1983/1984	0	57055	2000/2001	8320	61995	70315
1984/1985	0	56282	2001/2002	5670	57140	62810
1985/1986	0	55523	2002/2003	0	57140	
1986/1987	0	55271	2003/2004	0	57710	
1987/1988	0	52880				

требует разработки научно обоснованной методики управления водными ресурсами Асуанского ВХК.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АСУАНСКОГО ВХК

Одной из центральных задач при исследовании закономерностей функционирования ВХК является согласование нужд водопотребителей и производительности водоохранных комплексов с режимом речного стока и стока возвратных вод. Основной инструмент для решения этой задачи – имитационная модель функционирования ВХК с учетом режима работы водоохранных комплексов. Описание режима функционирования ВХК и управления речным стоком – одна из главных и самых сложных современных водных проблем. Сложность обуславливается рядом специфических особенностей регулирования речного стока.

Во-первых, практически все случаи регулирования речного стока являются по своей структуре комплексными и стохастическими в самом широком смысле этого слова. Стохастическая суть этих систем обусловлена: случайным характером их основного ресурса (речного стока) и ошибками при измерении; случайными, а иногда неопределенными характером водопотребления и величинами потерь воды в системах; неопреде-

ленностью некоторой исходной, особенно экономической, информации, используемой при оптимизации решений в системе.

Во-вторых, объектом управления здесь является взаимодействие водноресурсной системы с системами: социально-экономической – с одной стороны, природно-экологической – с другой. При этом далеко не все социально-экономические и природно-экологические процессы поддаются управляющему воздействию со стороны человека. Многие из этих процессов, особенно экологические, мало изучены. Недостаточны и знания о таких процессах, как распространение и трансформация загрязнителей в водном пространстве, а также о влиянии всего комплекса факторов, включая режимные параметры, на динамику экосистемы водохранилищ.

В-третьих, функционирование водохранилища характеризуется многообразием средств воздействия на чистоту его водных масс и последствий этих воздействий на его экосистему. Например, снижение загрязнений от сточных и возвратных вод, попадающих в водохранилище, может быть достигнуто за счет не только осуществления целевых водоохранных мероприятий, но и изменения технологии производства продукции и технологии производства и использования водных ресурсов. Немаловажное, а во многих случаях главное значе-

ние имеет создание оптимальных режимов работы водохранилища с учетом в равной степени интересов участников ВХК и природных комплексов, расположенных в верхнем и нижнем бьефах гидротрула, и показателей качества речной воды.

В-четвертых, один из основных факторов при управлении качеством речных вод — учет смешения возвратных и сточных вод с водой реки или водоема. Разбавление примесей сопровождается окислительными, биохимическими и физическими процессами, что очищает воды от загрязнителей. Интенсивность процесса самоочищения зависит прежде всего от параметров потока (турбулентной диффузии) и скорости пополнения воды кислородом либо через ее свободную поверхность за счет аэрации, либо за счет турбулентного переноса кислорода из менее загрязненных водных масс в более загрязненные. В результате процессов разбавления и аэрации, а также биохимических, физических, химических и физико-химических процессов происходит очищение потоков от загрязнения. При этом нормирование показателей качества воды устанавливается применительно к водоему, а не к концентрации ингредиентов в сбросных сточных водах. Как отмечается в [6, 7], объектом нормирования может быть только вода, предназначенная для определенного вида водопользования (для питьевого или технического водоснабжения, рыбозаведения, орошения, рекреации и т.п.). Содержание вещества в воде можно сопоставить с его предельно-допустимой концентрацией (ПДК) только в том случае, если других веществ того же лимитирующего признака вредности (ЛПВ) в воде нет, что маловероятно. Здесь для ПДК надо оставить роль исходного критерия, а качество воды сопоставлять с некоторой нормативной концентрацией $C_{\text{норм}}$, устанавливаемой в каждом случае в зависимости от конкретных местных условий, в частности от числа веществ одного ЛПВ, присутствия которых следует ожидать в воде водоема.

В-пятых, особенности функционирования водохранилища сказываются не только внутри административно-территориальных границ одного государства, и во многих случаях требуется учитывать разнообразные межрегиональные, а в ряде случаев международные последствия работы водохранилища.

Методика определения рациональных режимов работы каскада водохранилищ с ГЭС достаточно детально рассматривается в [1–5, 8–10]. В связи с возрастанием антропогенного влияния на водные ресурсы, особенно с ухудшением показателей качества речной воды и тесно с ним связанных

внутриводоемных процессов, требуется дальнейшее совершенствование моделирования функционирования каскада водохранилищ. В результате регулирования стока реки в водохранилищах происходит изменение не только количественных, но и качественных характеристик водных масс. При этом качество воды в водохранилищах формируется под влиянием множества факторов, основными из которых являются: качественное состояние воды в водоеме в начале текущего отрезка времени; состав и количество вещества, поступающего в водоем в течение данного отрезка времени с поверхностными и подземными водами; а также поступление вещества из донных отложений. Таким образом, актуальным является совершенствование модели функционирования ВХК в части включения в нее блока, моделирующего качество воды в реке и водохранилище. При этом под управлением качеством воды понимается комплекс мероприятий (с учетом ассимилирующей—саморегулирующей и самоочищающей способности реки), направленных на поддержание в расчетных створах ПДК. С точки зрения охраны речных вод, антропогенное влияние не должно выводить параметры водных систем за пределы их критических значений, при которых происходит нарушение состояния равновесия систем. Главное, наряду с ПДК, — регламентация предельно допустимых сбросов (ПДС), которые взаимодействуют режимы сточных и возвратных вод с водным режимом реки.

Таким образом, общая постановка задачи моделирования функционирования ВХК, включающего систему водохранилищ при долгосрочном планировании (год и более), может быть сформулирована следующим образом. Рассмотрим водноресурсную систему, состоящую из каскада N водохранилищ с ГЭС, расположенных на основных и боковых притоках реки ($i = \overline{1, N}$). Каждое водохранилище имеет m участников. В качестве участников принимаются: ирригация, гидроэнергетика, промышленное и коммунальное водоснабжение, санитарные попуски и требования природных комплексов. Период регулирования $[0, T]$ разбивается на n равных (или неравных) отрезков $\Delta t = T/n$ с помощью $n + 1$ моментов времени t_0, t_1, \dots, t_n , таких, что $t_0 = 0, t_1 = t_0 + \Delta t, \dots, t_n = T$ (или $t_0 = 0, t_1 = t_0 + \Delta t, \dots, t_n = t_{n-1} + \Delta t_n = T$). Выбор Δt зависит от вида регулирования речного стока в пределах одного водохозяйственного года с увязкой его со следующим годом. Продолжительность расчетного интервала (Δt) полагается равной одному месяцу, декаде или пентаде. С учетом важности водоснабжения населения, а также ма-

лой доли промышленного водоснабжения (не более 5% от общего водопотребления) в рамках данной постановки предусматривается их полное обеспечение и, соответственно, их требования в модель включаются в виде ограничения. Предполагается, что все ирригационные и неирригационные потребители ($j = \overline{1, J}$), расположенные вдоль реки, формируют загрязненные сбросные и возвратные воды. Сброс этих вод в русло реки прежде всего ухудшает показатели качества речной воды, это, в свою очередь, сопряжено с ухудшением почвенно-мелиоративных условий и вследствие этого — со снижением продуктивности орошаемых земель. В связи с этим считается, что каждая ирригационная система на выходе имеет накопители (искусственные или естественные), позволяющие в зависимости от ассимилирующей способности реки перераспределять во времени и в пространстве сток возвратных вод и тем самым сохранять нормативы показателей качества речной воды. Основное требование к накопителям — максимум их опорожнения в конце водохозяйственного года (в зависимости от водности года) при сохранении водотока в некоторых контрольных створах, расположенных ниже по течению, и концентрации загрязняющих веществ (ЗВ) в речной воде, не превышающей ПДК.

В соответствии с принятыми условиями требуется определить оптимальные режимы работы ВХК, включающего как одиночное водохранилище с ГЭС, так и систему водохранилищ с учетом оптимального регулирования сброса сточных и возвратных вод.

Математическая постановка рассматриваемой задачи такова: требуется минимизировать функционал

$$\Phi(\vec{V}, \vec{U}, t) = \min_{\vec{U}} M \left[\sum_{t=0}^T \left| \frac{\vec{U}_t - \vec{U}_{\text{opt}}}{\vec{U}_{\text{opt}}} \right| \right] \quad (1)$$

при ограничениях

$$\vec{V} = A\vec{W} + B\vec{U}, \quad (2)$$

$$\vec{V} \leq \vec{V} \leq \vec{\bar{V}}, \quad (3)$$

$$\vec{U} \geq 0 \quad (4)$$

при $t = 0$, $\vec{V} = \vec{V}_0$, где \vec{V} — вектор наполнения (объем водохранилища); \vec{V} , $\vec{\bar{V}}$ — соответственно нижнее и верхнее ограничение объема водохранилища; \vec{U} — вектор попусков из водохранилищ; \vec{U}_t — вектор попусков из водохранилищ в момент времени t ; \vec{U}_{opt} — оптимальное значения попусков; \vec{W} — вектор

водных ресурсов; t — текущее время; A и B — матрицы системных условий.

Решение задачи управления режимом ВХК в постановке (1)–(4) требует использования прямых методов стохастического программирования. Учитывая неполноту исходной информации, исключительную трудоемкость расчетов (особенно при динамической постановке) для решения задачи (1)–(4) строится имитационная модель функционирования ВХК многоцелевого назначения.

В настоящей работе использована имитационная модель, приведенная в [2]. Численная реализация данной модели осуществлена применительно к Асуанскому ВХК р. Нил. В ее русловую часть входят водохранилище “Насер” с ГЭС (основное средство управления объемами и минерализацией речной воды), восемь распределительных узлов, водозаборы на нужды народного хозяйства и населения (рис. 1). Агроэкосистема включает в себя орошаемые земли, ирригационные системы (ИС), места формирования и использования ирригационного возвратного стока (ИВС).

Динамику воды в водохранилище можно описать балансовым дифференциальным уравнением

$$\frac{dV_i(t)}{dt} - Q_i(t) + \rho_i(t) + U_i(t) + r_i(t) = 0, \quad (5)$$

$$V_i(t_0) = V_i^0, \quad i = \overline{1, N},$$

$$V_i = V_i(Q_i, H_i), \quad i = \overline{1, N}, \quad (6)$$

где t — время; i — номер водохранилища; $V_i(t)$ — объем воды в i -м водохранилище в момент t ; $Q_i(t) = \sum_{j=1}^n q_{ij}(t)$ — объем главных и боковых притоков к i -му водохранилищу, включающий сток возвратных вод из накопителей в момент t ; j — номер бокового притока с частного водосбора i -го водохранилища; $\rho_i(t)$, $U_i(t)$, $r_i(t)$ — соответственно водопотребление, попуск и потеря воды на испарение и фильтрацию из i -го водохранилища в момент t ; V_i^0 — начальный объем водохранилища в момент t_0 ; H — уровень воды в водохранилище.

Уравнение кинетики процесса смешения солей в i -м водохранилище в момент времени t :

$$\frac{dM_i(t)}{dt} - \sum_{j=1}^{n_i} q_{ij}(t) C_{ij}(t) - m_{\text{дн } i}(t) + \rho_i(t) C_i(t) + U_i(t) C_i(t) + \alpha_i V_i(t) C_i(t) = 0, \quad (7)$$

$$M_i(t_0) = M_i^0, \quad i = \overline{1, N},$$

где $M_i(t) = C_i(t) V_i(t)$ — масса солей в i -м водохранилище в момент t ; C_{ij} — минерализация j -го притока к i -му водохранилищу; C_i — минерализация воды,

вытекающей из i -го водохранилища; $m_{\text{дн}}(t)$ – количество солей, поступающих в момент времени t в водохранилище с подземным стоком через донные отложения (илы) или из донных отложений в результате молекулярной диффузии (при отсутствии градиента напора подземных вод); α_i – параметр, учитывающий самоочищение (седиментацию, поглощение CO_2 высшими водными растениями или радиоактивный распад); M_i^0 – масса солей в водохранилище в момент t_0 .

Динамика воды в накопителе описывается дифференциальным балансовым уравнением

$$\frac{dV_i^c(t)}{dt} - q_i^c(t) + U_i^c(t) + r_i^c(t) = 0, \quad (8)$$

$$V_i^c(t_0) = V_i^{c0} \quad i = \overline{1, N},$$

$$V_i^c = V_i^c(q_i^c, H_i^c), \quad i = \overline{1, N}, \quad (9)$$

где $V_i^c(t)$ – объем воды в i -м накопителе в момент t ; $q_i^c(t)$ – объем возвратных вод, поступающих в накопитель в момент t ; $U_i^c(t)$, $r_i^c(t)$ – соответственно попуск и потери воды на испарение и фильтрацию из накопителя в момент t ; H_i^c – уровень воды в накопителе; V_i^{c0} – начальный объем накопителя в момент t_0 .

Динамика солей в накопителе без учета поступления солей через донные отложения и процесса самоочищения представлена как

$$\frac{dM_i^c(t)}{dt} - q_i^c(t)C_{i1}^c(t) + U_i^c(t)C_i^c(t) = 0, \quad (10)$$

$$M_i^c(t_0) = M_i^{c0}, \quad i = \overline{1, N},$$

где $M_i^c(t) = C_i^c(t)V_i^c(t)$ – масса солей в i -м накопителе в момент t ; $C_{i1}^c(t)$ – минерализация стока возвратных вод в накопителе в момент t ; $C_i^c(t)$ – минерализация воды, вытекающей из накопителя в момент t ; M_i^{c0} – масса солей в накопителе в момент t_0 .

С учетом гидролого-водохозяйственных особенностей р. Нил задача управления водными ресурсами Асуанского ВХК формулируется так: при заданной структуре русловой части водноресурсной системы необходимо найти такие объемы и режимы попусков из Асуанского водохранилища, при которых обеспечивается надежное обеспечение водой пользователей в нижнем течении и дельте р. Нил, надлежащая минерализация реч-

ной (≤ 1 г/л), оросительной (≤ 1.5 г/л) и хозяйственно-питьевой (≤ 1 г/л) воды при соблюдении специальных попусков (санитарных, экологических, энергетических и судоходных).

При многокомпонентности и многокритериальности задачи функционирования водохранилища комплексного назначения для моделирования режимов его работы наиболее подходящим является метод машинной имитации с использованием блочной структуры. Блочная структура создает теоретическую схему динамической модели функционирования каскада водохранилищ. Каждый блок – подпроцесс, который по отношению к изучаемому процессу может рассматриваться элементарным. Каждая структурная связь на модельном уровне символизирует передачу информации от одного блока к другому и на физическом уровне соответствует категориям “влияет на”, “зависит от”. Подробно такая блочная структура имитационной модели функционирования каскада водохранилищ рассмотрена в [2].

ГИДРОЛОГО-ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АСУАНСКОГО ВХК

Анализ притока речных вод в Асуанское водохранилище за 1871/1972–2004/2005 гг. позволил выделить три характерных периода (рис. 3):

– многоводный – с 1871/1872 по 1898/1899 гг. (средний приток $W_{\text{ср}} = 102 \text{ км}^3/\text{год}$);

– средний по водности – с 1899/1900 по 1968/1969 гг. ($W_{\text{ср}} = 86.6 \text{ км}^3/\text{год}$);

– маловодный – с 1969/1970 по 2004/2005 гг. ($W_{\text{ср}} = 60.0 \text{ км}^3/\text{год}$).

Среднемноголетний приток к водохранилищу за 1871/1872–2004/2005 гг. составляет $82.8 \text{ км}^3/\text{год}$.

На рис. 4 приведены кривые обеспеченности годового притока в Асуанское водохранилище для всего периода (1871/1872–2004/2005 гг.) и для маловодного периода (1969/1970–2004/2005 гг.). Как видно из этого рисунка, параметры кривой обеспеченности за 1969/1970–2004/2005 гг. отличаются от таковых за 1871/1872–2004/2005 гг. Отсутствие данных по стоку р. Нил и его составляющим для створов, расположенных за пределами Египта, а также данных об использовании стока и о его регулировании водохранилищами в бассейне Верхнего и Среднего Нила не позволяет выявить причины такого изменения стока реки за последние 30 лет. Однако близость величины среднего притока за маловодный период 1969/1970–2004/2005 гг. к величине стока, выделяемого Егип-

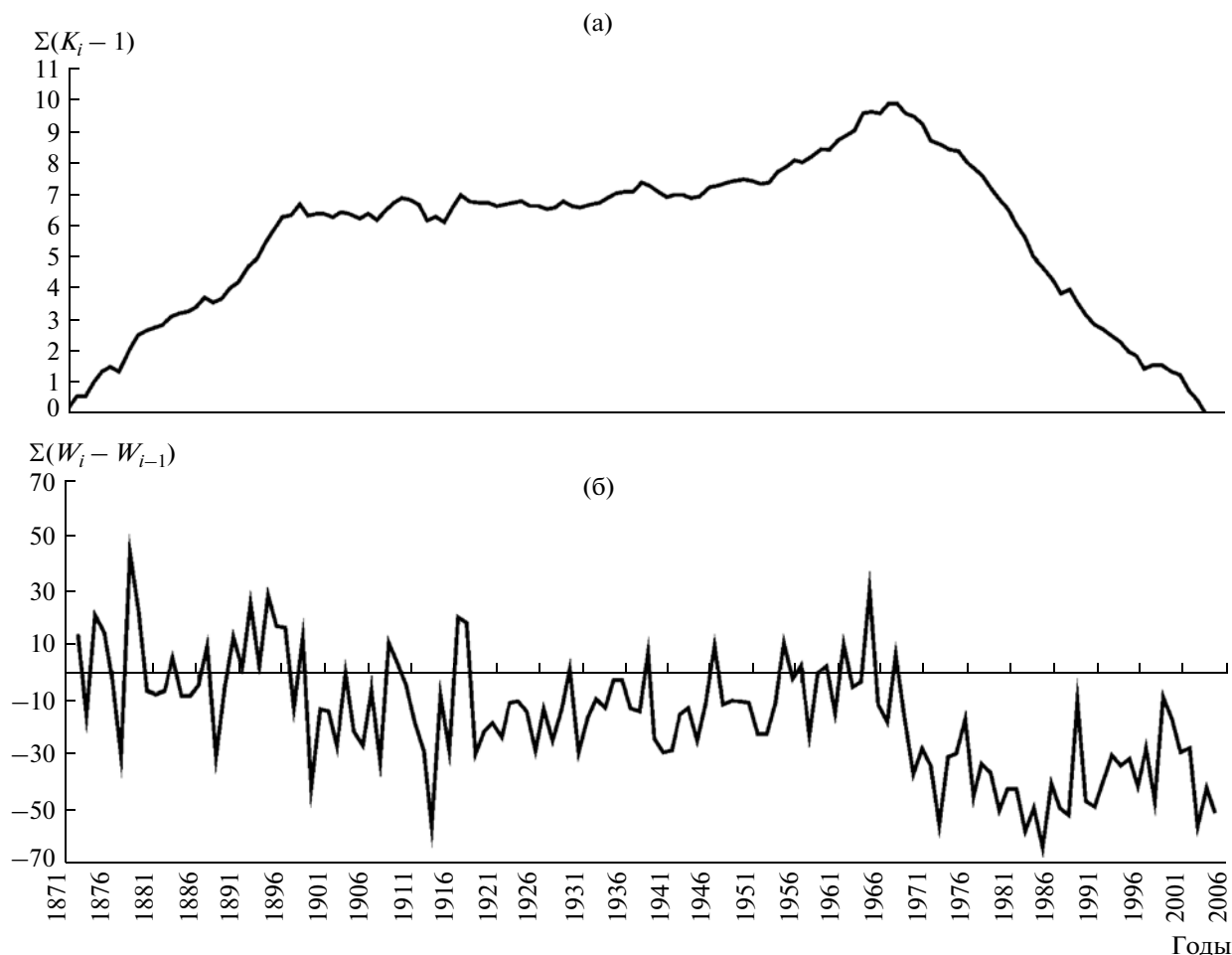


Рис. 3. Разностная интегральная кривая годового стока р. Нил (а) и его годовых приращений (б), км³, в створе Асуанского гидроузла за 1871/1872–2004/2005 гг.

ту по существующему межгосударственному соглашению с Суданом (60.1 км³/год), позволяет выбрать этот период для анализа закономерностей функционирования ВХК высотной Асуанской плотины в современных условиях и в перспективе. Сток в этот период характеризуется следующими статистическими параметрами: средний объем годового стока и объемы стока 75-, 90- и 95%-й обеспеченности составляют соответственно 60.1, 50.0, 43.5 и 40.0 км³/год; $\sigma_w = 13.0$ км³/год; $Cv = 0.22$; $R(1) = 0.13$. Кроме того, учитывая, что применительно к ВХК Асуанского водохранилища принята надежность обеспечения гарантированного попуска 90% (что свойственно ВХК аридной зоны), для расчетов в качестве модели стока были выбраны реальные годы, обеспеченность стока P которых близка к 90%: 1972/1973 (96%), 1976/1977 (89%), 1979/1980 (94%), 1980/1981 (88%), 1981/1982 (89%), 1982/1983 (96%), 1983/1984 (93%), 1985/1986 (85%), 1986/1987 (93%), 1987/1988 (96%), 1989/1990

(90%), 1990/1991 (92%), 1991/1992 (84%), 1995/1996 (85%), 1997/1998 (91%), 2003/2004 (86%) и 2004/2005 гг. (95%).

Рассматриваемый 36-летний расчетный период (1969/1970–2004/2005 гг.) был крайне маловодным. Из общего числа лет этого периода ($n = 36$ лет) 10 лет были маловодными ($P \geq 75\%$) с наименьшим объемом годового стока 34.8 км³/год (1984/1985 гг., $P = 97.5\%$). Можно выделить 2–3-летние группировки маловодных лет: 1986/1987–1987/1988 гг., $W_{cp} = 47.5$ км³/год; 1989/1990–1990/1991 гг., $W_{cp} = 50.6$ км³/год; 1982/1983–1984/1985 гг., $W_{cp} = 41.5$ км³/год. Отметим 10-летний период, соответствующий сильной засухе в Египте в 1978–1987 гг., когда средний годового стока составил 50.0 км³/год.

В естественных условиях внутригодовой режим стока реки характеризовался наличием двух четко выраженных периодов: повышенного стока с августа по октябрь и пониженного стока с нояб-

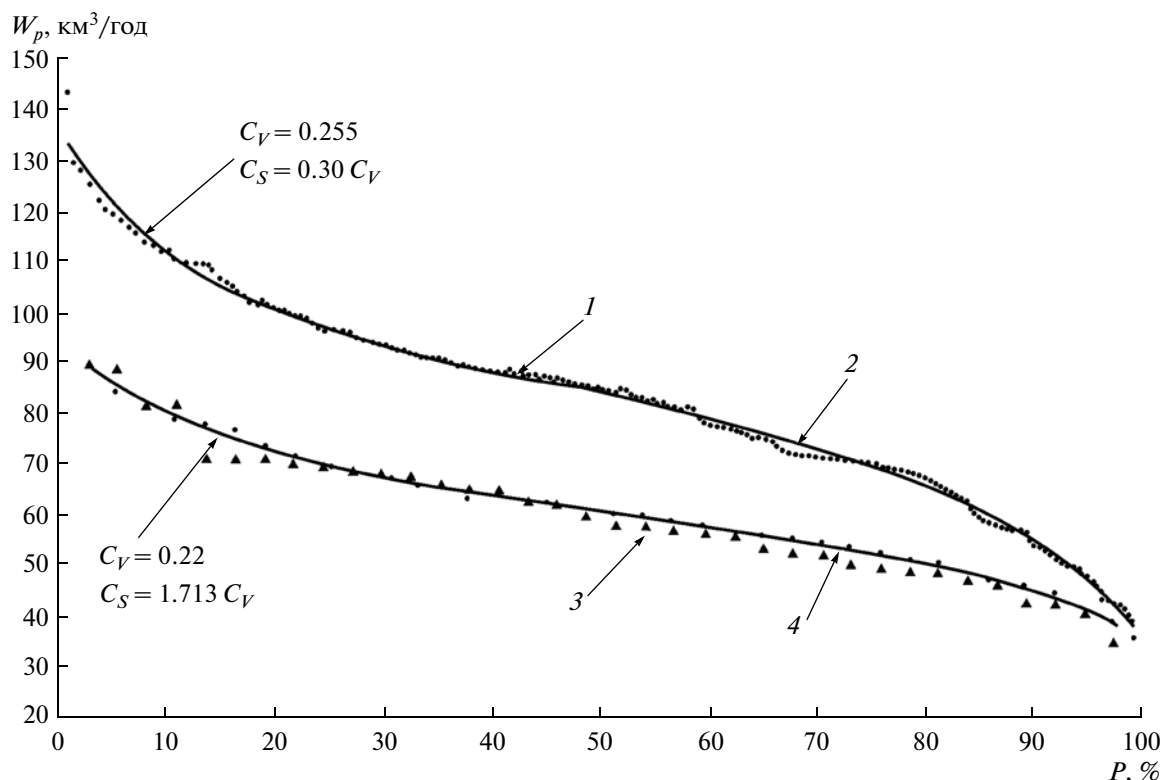


Рис. 4. Кривая обеспеченности годового стока $W_p = f(P)$ р. Нил у г. Асуана: 1 – эмпирическая за 1871/1972 – 2004/2005 гг.; 2 – аналитическая за 1871/1972–2004/2005 гг.; 3 – эмпирическая за 1969/1970–2004/2005 гг.; 4 – аналитическая за 1969/1970–2004/2005 гг.

ря по июль. На первый период приходилось в зависимости от водности года 55–70%, на второй 30–45% годового объема стока.

Кроме рядов стока, для моделирования режимов попусков из Асуанского водохранилища необходимо располагать данными о суммарных потерях воды из водохранилища. Для Асуанского водохранилища важное значение имеют потери воды на испарение. Зависимость суммарных месячных потерь воды на испарение от площади водного зеркала водохранилища приведена на рис. 5. Потери на фильтрацию в начальный период составляли 0.3–1.0 км³/год, увеличиваясь в дальнейшем с 4.0 (при уровне 165.3 м) до 10.5 км³/год (при уровне 175.7 м). В настоящее время потери на фильтрацию стабилизировались и составляют 1.9 км³/год (табл. 2).

Основные нормативные характеристики Асуанского водохранилища, используемые для моделирования режимов попусков из него с целью удовлетворения требований на воду участников ВХК, приведены на рис. 6.

В современных условиях основной водозабор осуществляется в нижнем бьефе Асуанского гидроузла. Кроме того, начиная с 1998/1999 гг. осуществ-

ляется водозабор непосредственно из водохранилища в канал Тошка. Ежегодные объемы попуска из водохранилища за 1971/1972–2004/2005 гг. изменялись от 53 до 71 км³/год (в среднем 57.1 км³/год) в зависимости от водности года.

Согласно разработкам Министерства экономики Египта с 1990 по 2010 г. был предусмотрен рост водозабора в следующих размерах: для орошения новых земель – на 9.3; для коммунальных нужд – на 1.4, для промышленности – на 1.5 км³/год (итого 12.2 км³/год). По этим же оценкам, к 2015 г. по отношению к уровню 1990 г. дополнительно потребуются 10.0 км³/год. Таким образом, суммарный попуск из Асуанского водохранилища на уровне 2015 г. должен составлять 65 км³/год. Этот попуск предполагается обеспечить за счет следующих четырех Суданских проектов: Канал Джонглий I (2.0), Канал Джонглий II (2.0), канал Бахр-Эль-Газель (3.5), Канал Мачар (2.0 км³/год). Соответственно, при разработке вариантов численных экспериментов учтены дополнительные водные ресурсы в размере 9.5 км³/год.

Основное назначение численного имитационного эксперимента заключается в нахождении та-

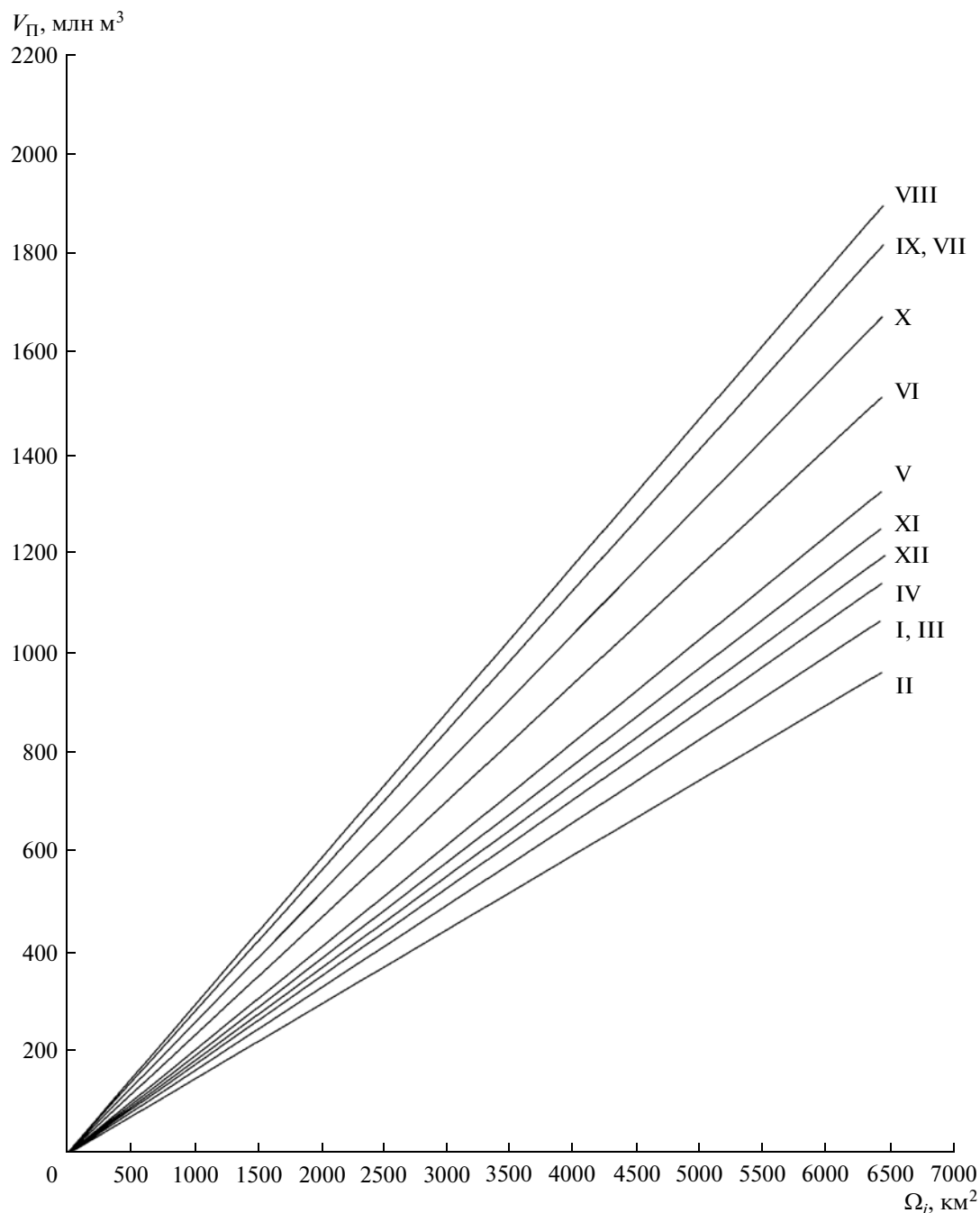


Рис. 5. Зависимость потерь воды на испарение из Асуанского водохранилища ($V_{п}$) от площади его водной поверхности (Ω) и месяца года (I–XII).

ких режимов пуска в нижний бьеф Асуанского гидроузла, которые, с одной стороны, обеспечивали бы потребность на воду населения и хозяйства, а с другой стороны, учитывали бы требования гидроэнергетики, судоходства, рыбного хозяйства и необходимость обводнения поймы и дельты р. Нил. В связи с этим при разработке вариантов численных расчетов учитывались возможный приток в водохранилище в характерные

по водности годы и требования основных участников ВХК Асуанского водохранилища с учетом перспектив их развития.

Прежде всего выделен расчетный период для валидации разработанной имитационной модели ВХК Асуанского водохранилища: 1977/1978–1987/1988 гг. ($n = 11$ лет), который был крайне маловодным ($W_{cp} = 51.20$ $km^3/год$). В качестве требо-

ваний на воду приняты фактические попуски в нижний бьеф водохранилища, которые меняются от 52.90 до 61.80 км³/год. Условно этот вариант принят в качестве нулевого (вариант 0), основное назначение его – убедиться в работоспособности модели. Кроме того, приняты следующие варианты расчетов: вариант I (многоводные годы): 1871/1872–1885/1886 гг. ($n = 15$ лет, $W_{\text{приток}} = 101$ км³/год, $W_{\text{попуск}} = 62$ км³/год); вариант II (средневодные годы): 1930/1931–1944/1945 гг. ($n = 15$ лет, $W_{\text{приток}} = 83.50$ км³/год, $W_{\text{попуск}} = 62.0$ км³/год); вариант III (маловодные годы): 1969/1970–1983/1984 гг. ($n = 15$ лет, $W_{\text{приток}} = 59.20$ км³/год, $W_{\text{попуск}} = 62.0$ км³/год); вариант IV (маловодные годы): 1969/1970–1983/1984 гг. ($n = 15$ лет, $W_{\text{приток}} = 59.20 + 9.50 = 68.70$ км³/год, $W_{\text{попуск}} = 70.0$ км³/год); вариант V (крайне маловодные годы): 1979/1980–1983/1984 гг. ($n = 5$ лет, $W_{\text{приток}} = 50.0$ км³/год, $W_{\text{попуск}} = 55.0$ км³/год); вариант VI (среднемаловодные годы): 1992/1993–1994/1995 гг. ($n = 3$ года, $W_{\text{приток}} = 66.7$ км³/год, $W_{\text{попуск}} = 70.0$ км³/год).

Численная реализация разработанной модели включала, во-первых, проверку степени адекватности модели реальным условиям функционирования ВХК Асуанского водохранилища и, во-вторых, проведение серии вариантных расчетов для оценки и выбора рационального режима попусков из водохранилища.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проверки адекватности разработанной модели, как уже отмечалось, выбран период с

Таблица 2. Потери воды на испарение и фильтрацию из Асуанского водохранилища в период его заполнения (1964–1976 гг.), км³/год (по данным управления водохранилища “Насар”)

Годы	Уровень воды, м абс.	Потери на фильтрацию	Потери на испарение	Суммарные потери
1964	126.00	–	–	–
1965	133.60	0.28	1.80	2.10
1966	140.70	1.00	2.30	3.30
1967	142.40	0.45	4.00	4.45
1968	156.50	6.84	5.50	12.30
1969	161.20	4.40	6.80	11.20
1970	164.90	4.30	7.80	12.10
1971	164.60	4.00	9.20	13.20
1972	165.30	–	9.60	9.60
1973	166.20	–	8.80	8.80
1974	170.60	4.90	9.70	14.60
1975	175.70	4.50	11.20	15.70
1976	176.50	5.90	12.40	18.30

1977/1978 по 1987/1988 гг., характеризующий реальные условия функционирования ВХК Асуанского водохранилища. Следует отметить, что заполнение водохранилища началось в 1964/1965 гг. и продолжалось вплоть до 1977/1978 гг., когда уровень воды в водохранилище стал близок к НПУ (177–178 м абс.). На рис. 7 приведены результаты сопоставления расчетного и фактического режимов работы Асуанского водохранилища за рассматриваемый период. Как видно из рисунка, имеется весьма хорошее совпадение как расчетных и фактических уровней воды в водохранилище, так и расходов попуска из него. В от-

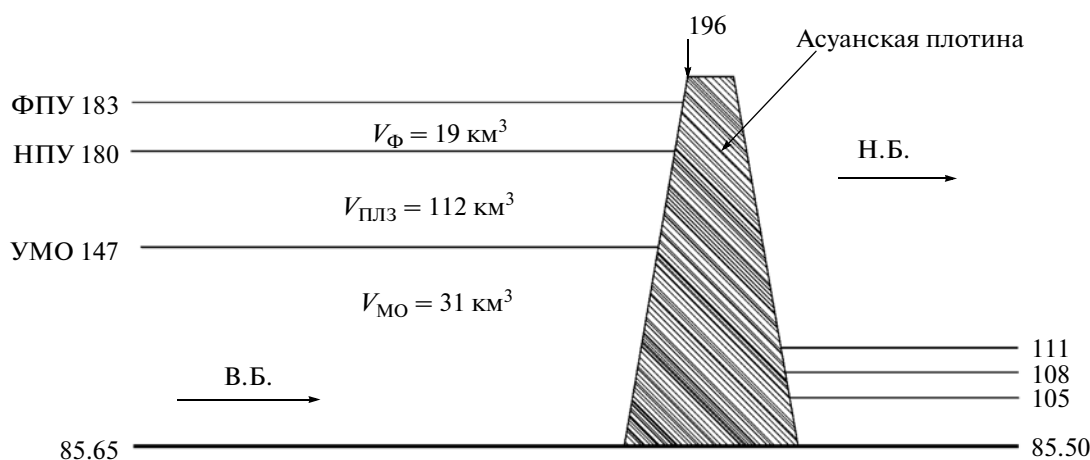


Рис. 6. Основные проектные параметры Асуанского водохранилища.

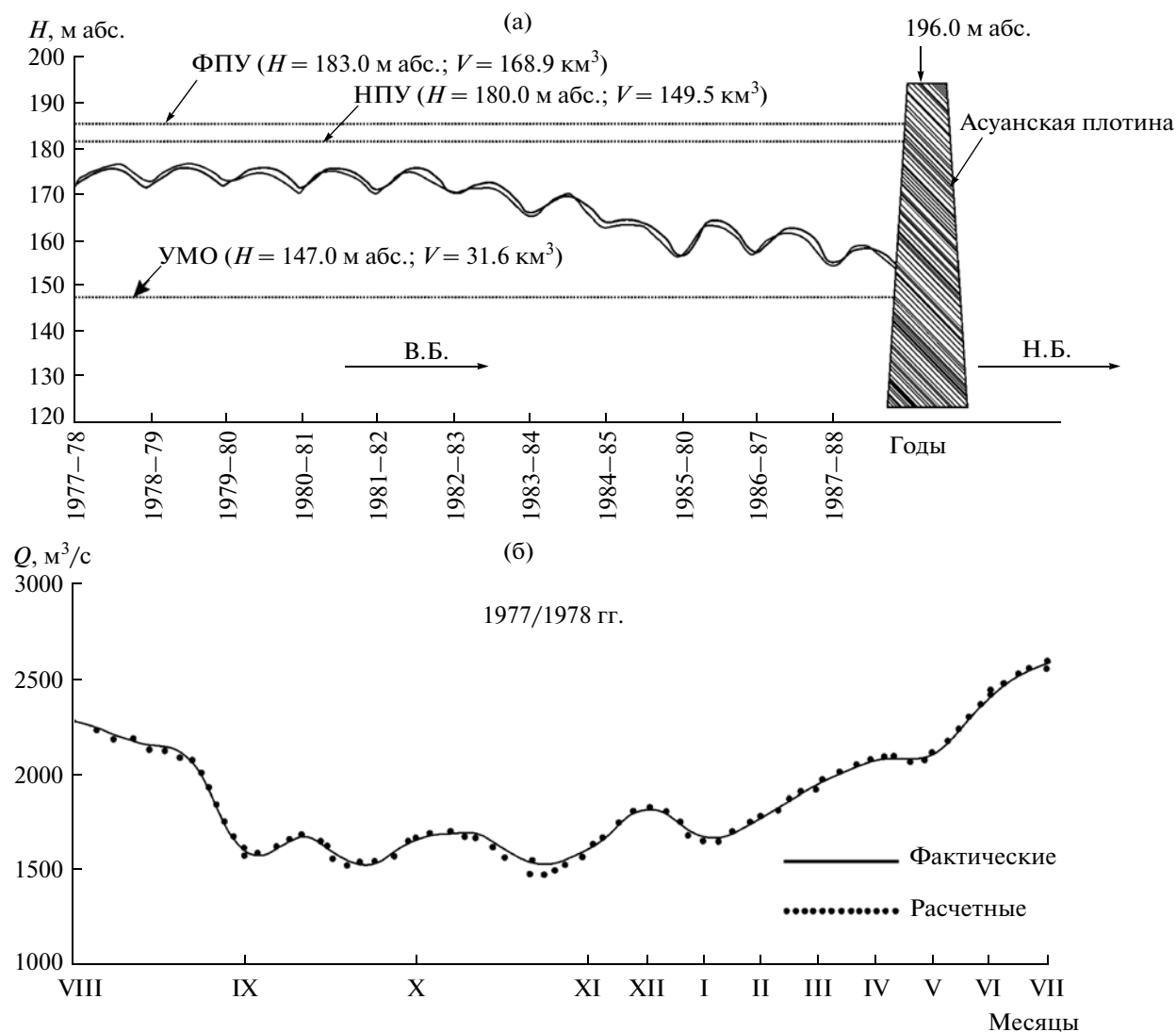


Рис. 7. Фактические и расчетные значения уровней воды (H , м абс.) в верхнем бьефе (а) и расходов воды (Q , м³/с) в нижнем бьефе (б) Асуанского водохранилища.

дельных случаях имеются отклонения расчетных параметров от фактических, но они находятся в пределах допустимой погрешности.

Таким образом, проведенное сопоставление расчетных и фактических характеристик режима работы Асуанского водохранилища свидетельствует о том, что разработанная модель его функционирования адекватна реальному режиму его работы.

Для выбора предпочтительных вариантов режима работы Асуанского водохранилища и, соответственно, рациональных режимов ппуска в нижний бьеф с учетом требований нижнего течения и дельты р. Нил проведена серия расчетов для выбранных вариантов гидрологических и водохозяйственных условий. Во всех этих вариантах

принимались три значения начального наполнения водохранилища: 61.0, 105.0, 149.5 км³. При выполнении водохозяйственных расчетов учитывалось, что Асуанское водохранилище осуществляет не только сезонное, но и многолетнее регулирование стока.

Рассмотрим результаты модельных расчетов для каждого из принятых вариантов.

Вариант I. В этом варианте среднемноголетний приток воды в водохранилище составил 1010 км³/год ($P = 19\%$) при крайних значениях 68.2 ($P = 76\%$) и 142.4 ($P = 0.7\%$) км³/год, т.е. данная выборка соответствует многоводному периоду. При упоминании притока конкретного календарного года во всех случаях имеется в виду модельный приток. Требуемый объем комплексного

попуска, отвечающий современным условиям, составил $62.0 \text{ км}^3/\text{год}$. В результате модельных расчетов установлено, что во все годы этого периода заявленный попуск удовлетворяется полностью. При этом уровень воды в водохранилище колеблется в диапазоне $176.6\text{--}183.0 \text{ м абс.}$ Хотя поддержание таких высоких отметок уровня воды в водохранилище и обеспечивает высокую степень удовлетворения заявленных требований к режиму попусков и максимальную выработку электроэнергии ГЭС, но, как показывают результаты численных расчетов, в этом случае имеют место значительные непроизводительные потери воды на испарение с водной поверхности водохранилища (до $20.4 \text{ км}^3/\text{год}$). Чтобы уменьшить эти потери, выполнен водохозяйственный расчет с введением ограничения на наполнение водохранилища в конце водохозяйственного года – не более 85.75 км^3 . В этом случае наполнение водохранилища составляет $161.5\text{--}173.2 \text{ м абс.}$ Соответственно уменьшается площадь водной поверхности водохранилища. Так, для модели притока для 1979/1980 гг. в первом случае площадь водного зеркала в конце водохозяйственного года составляет 6267 , во втором – 3677 км^2 . В результате потери на испарение уменьшаются с 20.4 до $12.0 \text{ км}^3/\text{год}$. Наряду с уменьшением потерь на испарение в многоводные годы создается возможность осуществлять повышенные попуски в зависимости от водности конкретного года. Например, при притоке обеспеченностью $P=1\%$ попуск достигает $124 \text{ км}^3/\text{год}$ при фактическом $62 \text{ км}^3/\text{год}$. Следовательно, численный имитационный эксперимент показывает, что при наличии прогноза притока к водохранилищу в следующем году можно найти такой режим попусков, реализация которого создаст условия не только для обеспечения заявленных требований на воду, но и для дополнительного обводнения поймы и дельты р. Нил для улучшения их экологического состояния.

Вариант II. В качестве модели притока выбран период с 1930/1931 по 1944/1945 гг. ($n = 15$ лет), для которого среднемноголетний годовой приток в Асуанское водохранилище равен $83.5 \text{ км}^3/\text{год}$ ($P = 53\%$) при крайних значениях $69.8 \text{ км}^3/\text{год}$ (73%) и $105 \text{ км}^3/\text{год}$ (15%). Таким образом, этот период в целом соответствует условиям средней водности. Требуемый объем комплексного попуска, как и в варианте I, принят равным $62 \text{ км}^3/\text{год}$.

Результаты численного эксперимента показывают, что в зависимости от начального объема наполнения водохранилища заполнение водохранилища до НПУ растягивается, в отличие от Ва-

рианта I, до 4–8 лет. После этого водохранилище наполняется и сбрасывается в диапазоне отметок от 173.9 до 183.0 м абс. При этом за весь рассматриваемый период комплексный попуск в размере $62 \text{ км}^3/\text{год}$ полностью обеспечивается. Потери на испарение с водной поверхности водохранилища и в этом варианте остаются высокими, изменяясь от 10 до $19.5 \text{ км}^3/\text{год}$. С целью снижения потерь на испарение ослаблено ограничение, накладываемое на конечное наполнение водохранилища в конце водохозяйственного года (не менее 58.6 км^3). В результате удается уменьшить потери на испарение до $9\text{--}10 \text{ км}^3/\text{год}$. Наряду с экономией ресурсов воды одновременно удается увеличить комплексный попуск с 62 до $96 \text{ км}^3/\text{год}$. При этом водохранилище наполняется и сбрасывается в диапазоне отметок от 157.8 до 167.9 м абс.

Вариант III. В качестве модели притока в водохранилище принят период с 1969/1970 по 1983/1984 гг. ($n = 15$ лет), для которого среднемноголетний годовой приток равен $59.2 \text{ км}^3/\text{год}$ ($P = 84\%$) при крайних значениях $40.6 \text{ км}^3/\text{год}$ (98.5%) и $81.6 \text{ км}^3/\text{год}$ (56%), т.е. данный период является маловодным. В отличие от предыдущих вариантов, в условиях маловодья при различных начальных наполнениях динамика уровня воды в водохранилище описывается тремя непересекающимися линиями в диапазоне уровня от НПУ до 153.3 м абс. Особенности режима уровня воды в водохранилище по этому варианту сводятся к следующему:

- при начальном объеме $V_n = V_{\text{НПУ}} = 149.5 \text{ км}^3$ водохранилище в течение трех первых лет периода наполняется и сбрасывается в диапазоне от форсированного подпорного уровня (ФПУ) – 183.0 м абс. до 176.3 м абс. В остальные годы периода уровень водохранилища остается ниже НПУ и в конце периода снижается до $159.4 \text{ м абс.};$

- при $V_n = 105.0 \text{ км}^3$ уровень воды в водохранилище – от 176.4 до $156.7 \text{ м абс.};$

- при $V_n = 61.0 \text{ км}^3$ уровень – от 173.0 до $153.3 \text{ м абс.};$

- независимо от начального наполнения, во все годы комплексный попуск в размере $62 \text{ км}^3/\text{год}$ удовлетворяется полностью;

- потери на испарение различны в зависимости от начального наполнения и в основном составляют $9\text{--}16 \text{ км}^3/\text{год}$.

Отличительная особенность маловодного периода – необходимость поддержания наполнения водохранилища в конце водохозяйственного года не ниже, чем средний уровень воды, равный

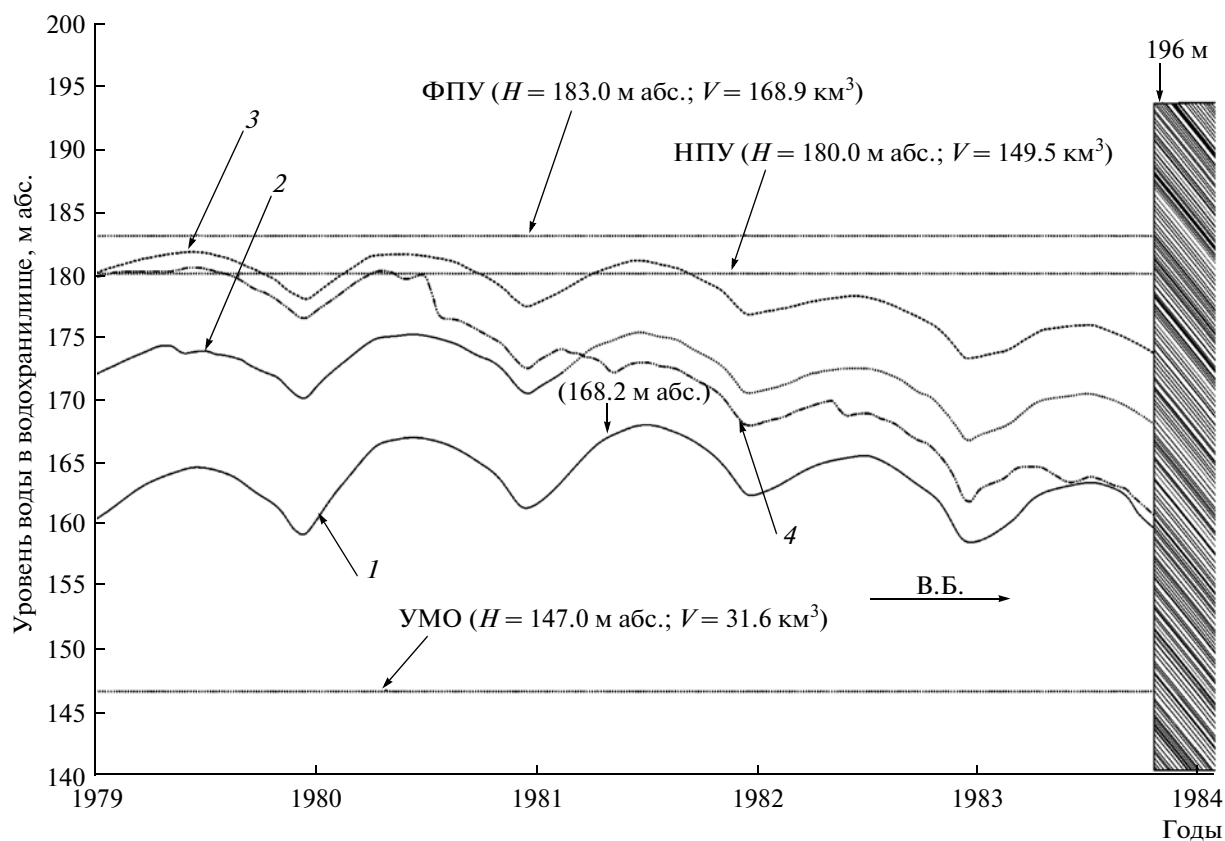


Рис. 8. Режим работы Асуанского водохранилища в крайне маловодный период (Вариант V). 1 — $V_n = 61.0 \text{ км}^3$, 2 — $V_n = 105.0 \text{ км}^3$, 3 — $V_n = 149.5 \text{ км}^3$, 4 — требуемый минимальный объем воды в водохранилище в конце водохозяйственного года $V_k(T) \geq 50.0 \text{ км}^3$.

164.0 м абс., что создает благоприятные условия для гидроэнергетического участника комплекса.

Вариант IV отличается от предыдущего варианта тем, что приток воды в водохранилище увеличивается на $9.5 \text{ км}^3/\text{год}$ за счет снижения потерь воды в области Сэдд (Судан) посредством создания канала Джонджли. Ресурсы воды увеличиваются до $68.7 \text{ км}^3/\text{год}$ в маловодные годы, а комплексный попуск достигает $70 \text{ км}^3/\text{год}$. В результате численного эксперимента установлено, что режим работы Асуанского водохранилища оказывается идентичным режиму работы, полученному по варианту III.

Вариант V. В этом варианте рассматривается в качестве модели стока период с 1979/1980 по 1983/1984 гг. ($n = 5$ лет), являющийся крайне маловодным — средний объем притока равен $50.0 \text{ км}^3/\text{год}$ ($P = 91\%$) при крайних значениях $40.6 \text{ км}^3/\text{год}$ (98.5%) и $56.2 \text{ км}^3/\text{год}$ (88%).

На рис. 8 приведен режим работы Асуанского водохранилища для этого варианта при попуске $55.0 \text{ км}^3/\text{год}$. При $V_n = 61.0 \text{ км}^3$ уровень воды в во-

дохранилище во все годы не поднимается выше 168.2 м абс. Значительное улучшение наблюдается при $V_n = V_{нпу} = 149.5 \text{ км}^3$. Это еще раз свидетельствует о важности того, с каким начальным наполнением приходим к началу маловодного и очень маловодного периода.

Как показывают численные эксперименты, ослабление ограничения на конечное наполнение водохранилища в конце водохозяйственного года ($V_k^{(T)} = 50.0 \text{ км}^3$) позволяет увеличить попуск в нижний бьеф с 55.0 до $76.8 \text{ км}^3/\text{год}$.

Вариант VI. В качестве модели притока выбран среднеловодный период с 1992/1993 по 1994/199 г. ($n = 3$ года) при среднем стоке $66.7 \text{ км}^3/\text{год}$ ($P = 80\%$). Комплексный попуск в соответствии с требованиями на ближайшую перспективу увеличен до $70 \text{ км}^3/\text{год}$. Результаты численного эксперимента приведены на рис. 9. При $V_n = 61.0 \text{ км}^3$ уровни воды колеблются в диапазоне $168.3\text{--}159.2 \text{ м абс.}$, попуск удовлетворяется полностью, а потери на испарение составляют 9.5--

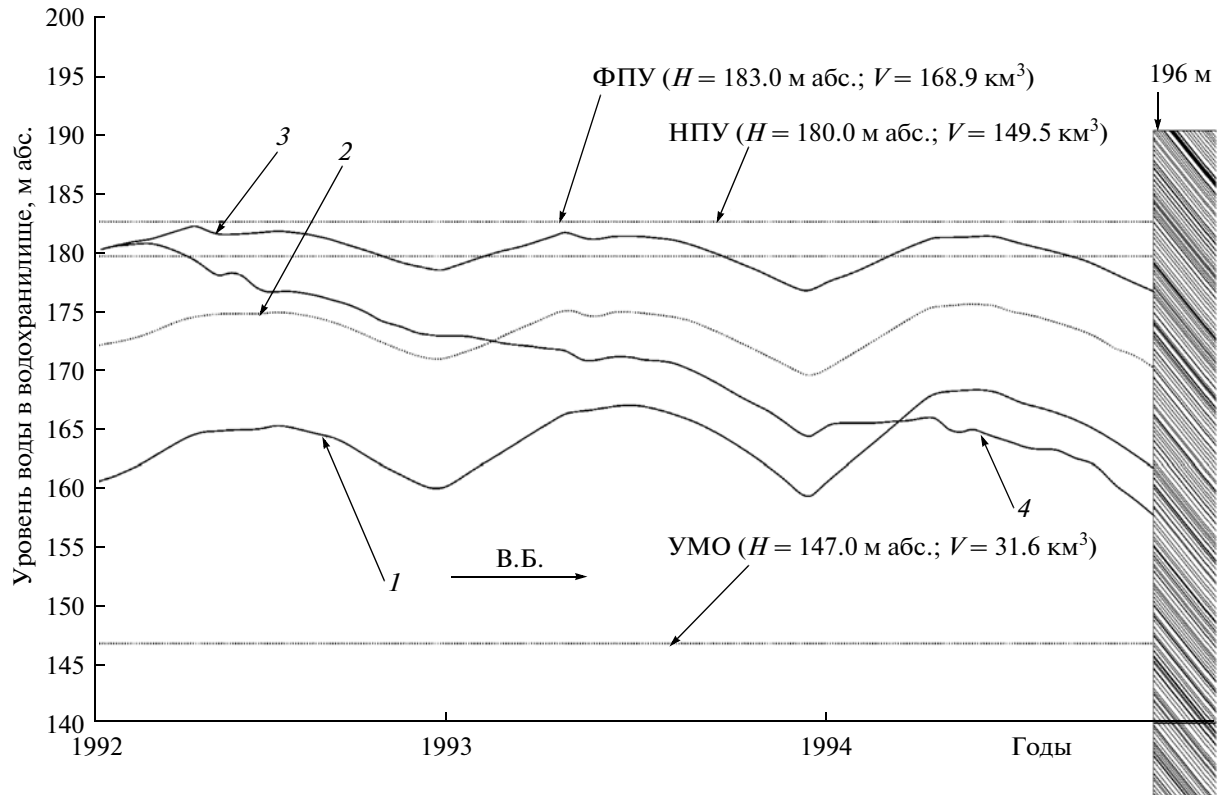


Рис. 9. Режим работы Асуанского водохранилища в среднемаловодный период (Вариант VI). 1 — $V_n = 61.0 \text{ км}^3$, 2 — $V_n = 105.0 \text{ км}^3$, 3 — $V_n = 149.5 \text{ км}^3$, 4 — требуемый минимальный объем воды в водохранилище в конце водохозяйственного года $V_k(T) \geq 50.0 \text{ км}^3$.

10.2 км³/год. При повышенном начальном наполнении и ослаблении ограничения на наполнение водохранилища в конце водохозяйственного года становится возможным увеличить попуск, доведя его до 103.0 км³/год (рис. 9, линия 4).

ВЫВОДЫ

Независимо от водности р. Нил, во всех рассматриваемых вариантах по определению режимов работы Асуанского ВХК полностью обеспечивается требуемый комплексный попуск в размере 62 км³/год (современный уровень) и 70 км³/год (ближайшая перспектива).

В многоводные годы появляется возможность увеличить попуск до 77–124 км³/год, что создает благоприятные санитарно-экологические условия в нижнем течении и дельте р. Нил.

В средние и маловодные годы благодаря поддержанию наполнения водохранилища на отметке 164 м абс. создается возможность не только уменьшить непроизводительные потери воды на

испарение, но и обеспечить величину пуска в нижний бьеф не ниже требуемых 62 км³/год.

Численный эксперимент создает реальную возможность рассмотреть достаточно большое количество вариантов функционирования ВХК Асуанского водохранилища, связанных как с возможным изменением климатических условий в зоне формирования стока р. Нил и в зоне его использования, так и со стратегией развития экономики Египта.

Учитывая большую роль гидроэнергетики в ВХК Асуанского водохранилища, в дальнейшем в функциональную структуру разработанной имитационной модели необходимо включить блок режима работы ГЭС с последующим определением водноэнергетических показателей (мощность, выработка электроэнергии, напор и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асарин А.Е., Бестужева К.Н. Водноэнергетические расчеты. М.: Энергоатомиздат, 1986. 224 с.

2. *Великанов А.Л., Коробова Д.Н., Пойзнер В.И.* Моделирование процессов функционирования водохозяйственных систем. М.: Наука, 1983. 150 с.
3. *Воропаев Г.В., Исмайлов Г.Х., Федоров В.М.* Проблемы управления водными ресурсами Арало-Каспийского региона. М.: Наука, 2003. 427 с.
4. *Елаховский С.Б.* Гидроэлектростанции в водохозяйственных системах. М.: Энергия, 1979. 191 с.
5. *Резниковский А.Ш., Рубинштейн М.И.* Диспетчерские правила управления режимами водохранилищ. М.: Энергоатомиздат, 1984. 102 с.
6. *Родзиллер И.Д.* Прогноз качества воды водоемов-приемников сточных вод. М.: Стройиздат, 1984. 263 с.
7. *Черкинский С.Н.* Санитарные условия спуска сточных вод в водоемы. М.: Стройиздат, 1971. 208 с.
8. *Цветков Е.В., Алябышева Т.М., Парфенова Л.Г.* Оптимальные режимы гидроэлектростанций в энергетических системах. М.: Энергоатомиздат, 1984. 303 с.
9. *Albert G. Mercer, Tewfik Eid.* Impact of future water resources projects on the Nile Project development specialist // RNPД. 2002. P. 1–12.
10. The operation of multiple reservoir systems. Laxenburg: IASA, 1982. 402 p.