
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ,
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ

УДК 556.013, 556.048

**ПОИСК КОМПРОМИССНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ
И УПРАВЛЕНИИ ПОПУСКАМИ В НИЖНИЙ БЬЕФ
ВОЛГОГРАДСКОГО ГИДРОУЗЛА**

2. Тактическое планирование и оперативное управление¹

© 2019 г. М. В. Болгов^{1,*}, А. Л. Бубер², А. А. Комаровский², А. В. Лотов³

¹Институт водных проблем РАН,
Россия 119333 Москва

²Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова,
Россия 193333 Москва

³Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ «Информатика и управление» РАН,
Россия 11933 Москва

*e-mail: bolgovmv@mail.ru

Поступила в редакцию 04.04.2016 г.

После доработки 23.08.2018 г.

Принята к публикации 25.04.2018 г.

Продолжено обсуждение результатов разработки новой компьютерной технологии анализа проблем и поддержки принятия решений, связанных с обеспеченностью водными ресурсами пользователей водохозяйственного комплекса Нижней Волги и всего Волжско-Камского каскада водохранилищ. Во второй части рассмотрены задачи тактического планирования, определяющие попуск в нижний бьеф Волгоградского гидроузла (спецпопуск), и разработан алгоритм оперативного управления, который используется для поддержки процесса определения спецпопуска в зависимости от прогноза притока в весеннее половодье (апрель–июнь) и реализует цели, выбранные на этапе стратегического планирования.

Ключевые слова: Волжско-Камский каскад водохранилищ, водные ресурсы, боковая приточность, гидрологический ряд, спецпопуск, тактическое планирование, оперативное управление.

DOI: 10.31857/S0321-0596463333-344

ВВЕДЕНИЕ

Цель исследования – разработка математической модели и методов решения задачи управления попусками воды в нижний бьеф (НБ) Волгоградского гидроузла (ГУ) с формированием удобной вычислительной технологии, поддерживающей действия пользователей – специалистов в области управления водным хозяйством. Для реализации поставленной цели процесс принятия решения был разбит на две фазы:

1) стратегическое планирование, направленное на решение задачи выбора долгосрочной цели – предпочтительного достижимого (реализуемого) сочетания обеспеченностей водопользователей;

2) тактическое планирование и оперативное управление, в рамках которых принимаются решения с целью выполнения стратегического плана с учетом конкретных гидрологических условий текущего года.

В [3] рассмотрены задачи стратегического планирования. С помощью современного подхода к анализу результатов многокритериальной оптимизации (метода достижимых целей [5]) на основе использования математической модели Волжско-Камского каскада водохранилищ (ВКК) и многолетнего ряда бокового притока к водохранилищам строится и визуализируется совокупность достижимых целей долгосрочного управления каскадом, что помогает специалистам указать предпочтительное достижимое сочетание обеспеченностей водопользователей [2].

Цель настоящей статьи – анализ тактического (годового) планирования и оперативно-

¹ Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 17-29-05108).

го управления попуском в наиболее сложный период года — весеннее половодье (апрель—июнь), определение спецпуска в соответствии с результатами стратегического планирования и прогнозом приточности на текущее половодье; описание процедуры оперативного управления.

ТАКТИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ

Основная цель этапа тактического планирования — формирование спецпуска, реализующего принятые цели стратегического планирования и учитывающего возможный вариант развития гидрологической обстановки на водохранилищах ВКК в период весеннего половодья.

Решение этой задачи осуществляется за счет разбиения диапазона возможных объемов притока за половодье на конечное число зон таким образом, чтобы спецпуск, определяемый внутри этих зон, обеспечивал в совокупности реализацию выбранной стратегической цели.

В [3] в качестве критериев выбора стратегического плана взяты обеспеченности требований по числу перебойных лет четырех основных водопользователей ВКК.

1. Наполнение к концу половодья всех водохранилищ каскада до нормального подпорного уровня (НПУ). Это комплексный показатель, соблюдение которого позволяет обеспечить надежное функционирование практически всех водопользователей (энергетики, транспорта, промышленности, коммунального хозяйства и т. д.) в летне-осеннюю и зимнюю межени для всего каскада.

2. Среднесезонная зимняя (с декабря по март) гарантированная мощность ГЭС ВКК.

3. Транспортный попуск в НБ Волгоградского ГУ в летне-осеннюю межень.

4. Экологический попуск в НБ Волгоградского ГУ за половодье. Этот попуск при объеме 100 км^3 обеспечивает удовлетворение сельскохозяйственных, рыбохозяйственных, транспортных и санитарных требований для Волго-Ахтубинской поймы.

При выборе стратегического плана был принят следующий компромиссный вариант сочетания обеспеченностей по числу перебойных лет по критериям: 85, 95, 93, 41%. Принято, что водохранилища ВКК к началу половодья срабатываются до уровня принудительной предполоводной сработки (УПС), при котором суммарный полный объем водохранилищ ВКК равен 105.62 км^3 .

В табл. 1 показаны основные параметры реализации соответствующего выбранного стратегического решения: объем сброса за половодье, объем наполнения водохранилищ ВКК к концу половодья и статистика.

Характер затопления сельскохозяйственных угодий и нерестилищ Нижней Волги (площади затопляемых земель, время стояния воды, глубина затопления и пр.) зависят от конфигурации спецпуска. Принято экспертное решение о типовом графике специального весеннего пуска (рис. 1), позволяющем максимально затоплять площади сельскохозяйственных угодий

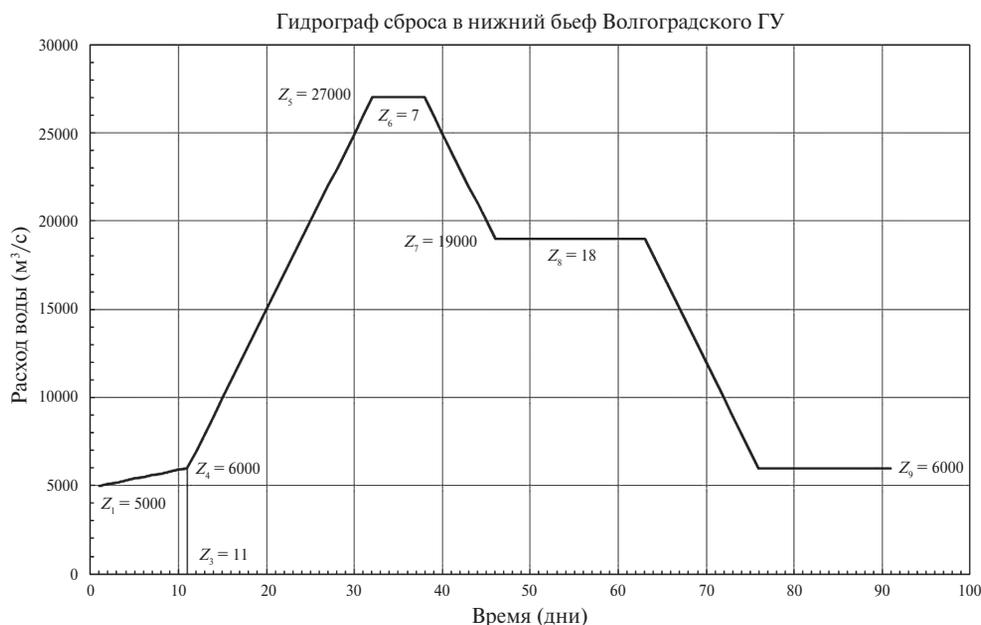


Рис. 1. Конфигурация спецпуска (сбросного гидрографа) в половодье (II квартал). Z_1-Z_9 — параметры оптимизации модели.

Таблица 1. Реализация выбранного стратегического решения

Год	Параметры реализации выбранного стратегического решения для водохранилищ ВКК				Нарушение требований по критериям (1 – наличие перебора)			
	приточность в половодье, км ³	спецпуск, км ³	наполнение к концу половодья, км ³	пороговые величины, км ³	наполнение до НПУ	мощность зимой	транспорт	экология
1948	234.83	173.71	166.74					
1927	212.86	151.74	166.74					
1980	208.24	147.12	166.74					
1958	208.00	146.88	166.74					
1994	204.17	143.05	166.74					
1991	203.21	142.09	166.74					
1967	203.19	142.07	166.74					
1956	196.72	135.60	166.74					
1930	195.02	133.91	166.74					
1959	194.88	133.76	166.74					
1971	192.52	131.40	166.74					
1947	189.60	128.48	166.74					
1929	187.60	126.48	166.74					
1949	186.79	125.67	166.74					
2001	185.92	124.80	166.74					
1986	183.83	122.72	166.74					
1928	180.87	119.76	166.74					
1990	180.70	119.58	166.74					
1942	179.49	118.37	166.74					
1933	179.37	118.25	166.74					
1999	178.80	117.68	166.74					
1982	177.91	116.80	166.74					
1975	177.85	116.73	166.74					
2002	176.30	115.18	166.74					
1943	174.03	112.91	166.74					
1918	172.40	111.28	166.74					
1924	171.40	110.28	166.74					
1916	170.31	109.19	166.74					
1917	168.99	107.96	166.65					
1995	168.78	107.90	166.50					
1988	163.87	102.75	166.74					
1992	163.71	102.59	166.74					
1964	163.22	102.10	166.74					
1998	162.38	101.27	166.74					
1945	161.76	100.64	166.74					
1920	161.06	99.94	166.74	161.06				
1966	159.68	98.60	166.70					1
1993	158.11	97.08	166.65					1
1987	157.58	96.57	166.63					1
2000	156.29	95.32	166.59					1
1944	155.83	94.87	166.57					1
1960	155.38	94.44	166.56					1
1969	154.93	94.01	166.54					1
1979	154.63	93.72	166.53					1
1952	153.38	94.14	164.85					1

Таблица 1. Окончание

Год	Параметры реализации выбранного стратегического решения для водохранилищ ВКК				Нарушение требований по критериям (1 – наличие перебора)			
	приточность в половодье, км ³	спецпуск, км ³	наполнение к концу половодья, км ³	пороговые величины, км ³	наполнение до НПУ	мощность зимой	транспорт	экология
1925	153.26	92.41	166.47					1
1981	152.79	91.95	166.45					1
1962	151.83	91.04	166.41					1
1954	151.68	90.90	166.40					1
1973	149.07	91.06	163.63	149.07				1
2003	150.76	90.02	166.36					1
1923	150.47	89.74	166.35					1
1983	149.74	89.05	166.31					1
1997	149.46	88.78	166.30					1
1950	146.74	87.45	164.92					1
1957	146.70	86.18	166.15					1
1965	145.11	84.68	166.05					1
1963	143.93	83.58	165.97					1
1932	143.81	83.47	165.96	143.81				1
2004	143.32	83.02	165.93					1
1961	141.34	81.18	165.78					1
1970	140.94	80.81	165.75					1
1972	140.31	80.23	165.70					1
1989	139.25	79.27	165.61					1
1921	137.42	79.00	164.04	137.42				1
1919	135.61	75.97	165.26					1
1984	135.39	75.78	165.23					1
1926	135.25	75.65	165.22					1
1941	130.79	71.72	164.69	130.79				1
1946	127.32	68.76	164.19					1
1951	126.52	68.08	164.06					1
1953	125.76	67.44	163.94					1
1977	125.70	67.40	163.93					1
1978	124.62	65.50	164.74					1
1940	120.41	62.00	164.03			1		1
1937	118.57	60.00	164.19					1
1934	118.15	60.00	163.77	118.15				1
1968	115.26	57.00	163.88		1			1
1935	113.10	55.00	163.72		1			1
1939	110.28	52.00	163.90		1	1		1
1955	107.24	49.00	163.86		1			1
1936	106.49	49.00	163.11		1			1
1931	105.01	46.00	164.63		1			1
1974	103.72	46.00	163.34		1			1
1985	102.88	45.00	163.50		1			1
1996	91.74	34.00	163.36		1			1
1922	89.77	32.00	163.39		1	1	1	1
1976	89.73	32.00	163.36		1	1	1	1
1938	83.44	26.00	163.07	83.44	1	1	1	1
			Обеспеченность, %:		85	95	93%	41

и нерестилищ, а также создавать благоприятные условия для рыбного хозяйства.

В спецпуске задаются следующие фазы: “подъем” – нарастание расхода, “сельскохозяйственный (с/х) попуск” – фаза пропуска постоянного максимального расхода для затопления пойменных лугов, “рыбохозяйственный (р/х) попуск” – фаза пропуска постоянного максимального расхода для поддержания оптимальных режимов нереста, “спад” – фаза убывания расходов, “транспортный попуск” – фаза навигации ($\geq 5000 \text{ м}^3/\text{с}$).

В соответствии с рекомендациями КаспНИРХ [4] предложены приведенные в табл. 2 характерные типы спецпусков и даны параметры (пороговые величины) с/х, р/х и транспортного пусков. Суммарный объем спецпуска (7-й столбец) учитывает попуск на всех фазах графика (типы спецпусков упорядочены в соответствии с объемом). Пороговые величины (границы) объемов половодья (8-й столбец) определяют объем спецпуска для реализации выбранной стратегической цели. Графа 8 табл. 2 равна графе 2 табл. 1 при значении графы 3 табл. 1, равному значению графы 7 табл. 2 (все цифры приведены с округлением). Так, для реализации экологического пускa (тип 7, объем спецпуска – 100 км^3) требуется, чтобы объем половодья был $\geq 161 \text{ км}^3$. Аналогичным образом определяются пороговые величины и для других типов спецпусков.

Отметим, что при объеме половодья $>83 \text{ км}^3$ (первая строка табл. 2) к концу половодья обеспечивается наполнение водохранилищ ВКК

близко к объему при нормальном подпорном уровне (НПУ – 166.74 км^3), благодаря чему обычно обеспечивается выполнение транспортных требований в летне-осеннюю межень и энергетических требований в зимнюю межень для всего каскада водохранилищ.

На основе определенных по принятому стратегическому решению пороговых объемов половодья реализуется вычислительная технология для формирования в текущем году набора альтернативных спецпусков, реализующих тактическое планирование. В соответствии с полученными значениями пороговых величин область возможных объемов половодья разбивается на 7 зон; причем, для каждой из зон устанавливается своя цель, которая позволит установить конкретные значения изломов гидрографа пускa (рис. 1).

Первая зона – многоводное половодье с притоком $>161 \text{ км}^3$. В этой зоне возможно одновременное наполнение водохранилищ ВКК до НПУ, т.е. выполнение летне-осенних транспортных и зимних энергетических требований, а также экологического пускa объемом $\geq 100 \text{ км}^3$. Цель управления в период половодья в этой зоне – максимизация продолжительности р/х пускa при выполнении сформулированных требований, т.е. наполнение водохранилищ ВКК до НПУ и обеспечение экологического пускa. Вероятность того, что приточность будет выше первого порога в 161 км^3 , составит 41%.

Вторая зона – среднее по водности половодье с притоком $<161 \text{ км}^3$, но $>149 \text{ км}^3$. В этой зоне возможны одновременное наполнение водо-

Таблица 2. Характерные параметры и пороговые величины половодья для различных типов спецпусков

Тип спецпуска	Продолжительность с/х пускa, дни	Величина с/х пускa, $\text{м}^3/\text{с}$	Продолжительность р/х пускa, дни	Величина р/х пускa, $\text{м}^3/\text{с}$	Транспортный попуск, $\text{м}^3/\text{с}$	Объем спецпуска, км^3	Пороговые величины объемов притока за половодье, км^3
Санитарный	7	3000	23	3000	3000	26	83
Нарушенный р/х	7	15 000	10	15 000	5000	60	118
Минимальный р/х	7	15 000	23	15 000	5000	71	131
Сниженный р/х – 1	7	17 000	23	17 000	5000	79	137
Сниженный р/х – 2	7	20 000	23	17 000	5000	84	144
Максимальный р/х – 1	7	20 000	23	20 000	5000	91	149
Экологический	5	25 000	23	20 000	5000	100	161

хранилищ ВКК до НПУ, частичная реализация экологического попуска, максимального р/х и транспортного попуска ($>91 \text{ км}^3$). Цель управления в период половодья в этой зоне – также максимизация продолжительности р/х попуска при выполнении сформулированных выше требований. Вероятность того, что приточность будет выше второго порога в 149 км^3 , составляет $\sim 56\%$.

Третья зона – среднее по водности половодье с притоком $<149 \text{ км}^3$, но $>144 \text{ км}^3$. В этой зоне возможны одновременное наполнение водохранилищ ВКК до НПУ, реализация максимального р/х и транспортного попуска ($>84 \text{ км}^3$). Как альтернатива может быть выполнен сниженный р/х – 2 и транспортный попуск. Вероятность того, что приток за половодье будет выше третьего порога в 144 км^3 , составляет 65.6% .

Четвертая зона – маловодное половодье с притоком $<144 \text{ км}^3$, но $>137 \text{ км}^3$. В этой зоне возможны одновременное наполнение водохранилищ ВКК до НПУ, реализация сниженного р/х – 2 и транспортного попуска ($>79 \text{ км}^3$) в нижний бьеф Волгоградского ГУ. Вероятность того, что приток будет выше четвертого порога в 137 км^3 , составляет 72% .

Пятая зона – маловодное половодье с притоком $<137 \text{ км}^3$, но $>131 \text{ км}^3$. В этой зоне возможны одновременное наполнение водохранилищ ВКК до НПУ, реализация сниженного р/х – 1 и транспортного попуска ($>71 \text{ км}^3$). Как альтернатива может быть выполнен минимальный р/х ($>71 \text{ км}^3$) и транспортный попуск. Вероятность того, что приток будет выше пятого порога в 131 км^3 , составляет 76% .

Шестая зона – это крайне маловодное половодье с притоком $<131 \text{ км}^3$, но $>118 \text{ км}^3$. В этой зоне возможны одновременное наполнение водохранилищ ВКК до НПУ, реализация минимального р/х и транспортного попуска ($>60 \text{ км}^3$). Вероятность того, что приток будет выше шестого порога в 118 км^3 , составляет 85% .

Седьмая зона – крайне маловодное половодье с притоком $<118 \text{ км}^3$ (минимально наблюдаемый приток – 83 км^3). В этой зоне возможны одновременное наполнение водохранилищ ВКК до НПУ, реализация транспортного попуска ($>24 \text{ км}^3$). В качестве альтернативы может рассматриваться наполнение, близкое к НПУ, и реализация санитарного попуска. Вероятность того, что приток будет выше минимально наблюдаемого в 83 км^3 , составляет 99% .

Таким образом, в результате решения задачи тактического планирования полученный план имеет вид достаточно простого алгоритма расчета при заданном прогнозе объема половодья в форме набора попусков, реализующих стратегическую цель. На основе разработанной системы пороговых объемов половодья реализуется простая вычислительная технология поддержки принятия решений при оперативном планировании [5].

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СПЕЦПОПУСКА

После того как определен тактический план, обеспечивающий принятое компромиссное решение по удовлетворению требований водопользователей, и определены пороги, позволяющие поддерживать в многолетнем разрезе выбранное компромиссное стратегическое решение, реализуется вычислительная технология поддержки принятия решения при оперативном управлении попусками на основе краткосрочного и долгосрочного прогнозирования бокового притока к водохранилищам ВКК.

В период половодья Гидрометцентр России (ГМЦ) выпускает “Гидрометеорологический бюллетень”, в котором приводится прогноз бокового притока на следующий месяц и на период половодья в целом. Прогноз представляется в виде диапазона (максимального и минимального возможного) притока к каждому водохранилищу ВКК и к каскаду в целом (в створе Волгоградского ГУ). В табл. 3 приведен пример прогноза на период половодья 2015 г.

Вычислительная технология основана на прогнозах ГМЦ, ежедневных текущих данных по притоку к водохранилищам ВКК и ретроспективных гидрологических данных посуточных наблюдений за предыдущие годы, в качестве которых использованы гидрологические ряды суточных значений бокового притока к водохранилищам ВКК в период с 1999 по 2017 г. Использованный временной ряд включает в себя как маловодные, так и средние по водности и многоводные годы, т.е. он репрезентативный для исследуемых водохранилищ ВКК.

Этап оперативного планирования начинается с установления даты начала половодья и выбора варианта спецпопуска на половодье текущего года. На основе прогноза ГМЦ, выпускаемого в виде диапазона величин приточности на конец марта, определяется наиболее вероятный объем половодья (может быть

Таблица 3. Прогноз притока воды к водохранилищам ГЭС во II квартале 2015 г.

Река	ГЭС	Прогноз притока во II квартале		Норма, м ³ /с	Приток во II квартале 2014 г., м ³ /с
		м ³ /с	км ³		
Волга	Иваньковская	250–350	2.0–2.8	644	152
	Угличская	120–240	0.94–1.9	296	64.1
Волга	Рыбинская	700–1300	5.5–10.2	1280	523
	Горьковская	1100–1500	8.6–11.8	1510	835
	Чебоксарская	2600–3400	20.4–26.7	4910	2540
	Жигулевская	2900–3700	22.8–29.1	3450	2730
	Саратовская	300–500	2.4–3.9	590	235
	Волгоградская	80–240	0.63–1.9	275	140
	Шексна	Шекснинская	270–370	2.1–2.9	371
Кама	Камская	3400–4400	26.7–34.6	4080	4595
	Воткинская	170–270	1.3–2.1	244	270
	Нижекамская	1800–2800	14.2–22.0	2870	2565

выбрано несколько альтернативных вариантов). Далее рассчитываются прогнозные гидрографы притока с суточной дискретностью, а также основной и альтернативные спецпуски. Из построенной совокупности спецпусков выбирается тот, который будет реализован в апреле. В дальнейшем при поступлении текущей информации о прохождении половодья, а также при уточнении прогноза спецпуск может быть скорректирован или даже пересмотрен. Более подробно процесс выбора решений о спецпуске может быть представлен в виде ряда шагов.

Шаг 1 (Апрель). В конце марта ГМЦ дает прогноз притока воды к водохранилищам на апрель и на II квартал в целом. Из базы данных посуточных наблюдений (1999–2017 гг.) выбираются два года с близкими (к максимальному и минимальному прогнозируемому объему притока) данными за II квартал для каждого водохранилища ВКК. Гидрографы этих лет принимаются в качестве модельных, и по ним строятся два гидрографа (минимальный и максимальный) с дискретностью интервала времени в сутки для каждого водохранилища в соответствии с СП 33-101-2003 [6]. По двум полученным наборам гидрографов вычисляется средний.

В соответствии с [6] конфигурацию расчетных гидрографов принимают по моделям наблюдаемых высоких весенних половодий или дождевых паводков с наиболее неблагоприятной их формой, для которых основные элементы и их соотношения должны быть близки к расчетным. Для весеннего половодья расчеты выполняются

по среднесуточным расходам воды. При расчете для каскада водохранилищ строят расчетный гидрограф притока к верхнему гидроузлу и гидрографы бокового притока для участков между гидроузлами.

В среде Excel разработана вычислительная схема, поддерживающая формирование прогнозного притока к водохранилищам ВКК. На рис. 2 в качестве примера показаны гидрографы прогнозного притока, а также модельный гидрограф 1999 г. для Рыбинского водохранилища.

Для максимального, минимального и среднего наборов прогнозных гидрографов определяются дата начала половодья, предполагаемая конфигурация спецпуска, основной и альтернативные режимы работы водохранилищ ВКК на апрель и до конца половодья. При этом большая часть объема спецпуска в апреле должна планироваться на период стабильной нерестовой температуры – от +8 до +10°C. Методы построения спецпуска на основе решения задачи оптимизации описаны далее, а пуски для остальных водохранилищ ВКК определяются исходя из обеспечения объемов и конфигурации спецпуска в створе Волгоградского ГУ. Решение о назначении приоритетов, используемых в целевой функции, и ограничений для задачи оптимизации (приведена ниже) принимается в зависимости от прогноза на оставшийся период и данных фактических наблюдений о притоке.



Рис. 2. Прогнозный и модельный гидрографы для Рыбинского водохранилища.

Сформированные варианты режимов работы водохранилищ ВКК передаются в Межведомственную рабочую группу (МРГ) для обсуждения и выработки рекомендаций. Рекомендации передаются в Росводресурсы, а управленческое решение принимается руководством агентства с учетом уточненных данных. Окончательное решение о начале спецпуска и о прогнозе величины и продолжительности с/х и р/х пуска принимается агентством в апреле в зависимости от фактического притока за прошедший период апреля и величины прогноза притока на оставшийся период II квартала.

Шаг 2 (Май). В конце апреля ГМЦ дает прогноз притока воды к водохранилищам на май и на II квартал в целом с учетом фактических наблюдений за апрель. Аналогично шагу 1 строится набор посуточных прогнозных гидрографов приточности на II квартал, уточненных фактическими наблюдениями за апрель. Набор состоит из трех гидрографов (максимальный, минимальный и средний) для каждого водохранилища.

Для каждого из прогнозных гидрографов определяются величина и продолжительность с/х и р/х пуска, а также основной и альтернативные режимы работы водохранилищ ВКК на май и до конца половодья. Если график спецпуска, рассчитанный на шаге 1, оказывается невыполнимым, и во II квартале возникает конфликт при обеспечении требуемых характеристик водных ресурсов (между наполнением к концу половодья всех водохранилищ ВКК до НПУ, с/х, р/х и транспортным пусками),

то это распределение осуществляется на основе компромисса, разрешаемого с помощью оптимизационных методов. При этом, как и на Шаге 1, решение о назначении приоритетов, используемых в целевой функции задачи оптимизации, а также ограничений для этой задачи принимается в зависимости от прогноза на оставшийся период и данных фактических наблюдений о притоке.

Сформированные варианты режимов работы водохранилищ ВКК передаются в МРГ для обсуждения и выработки рекомендаций, а также дальнейшего принятия управленческого решения руководством Росводресурсов.

Шаг 3 (Июнь). В конце мая ГМЦ дает прогноз притока воды к водохранилищам на июнь и на II квартал с учетом фактических наблюдений за апрель и май. Аналогично шагу 1 строится набор уточненных с учетом фактических наблюдений за апрель и май посуточных прогнозных гидрографов на июнь. Как всегда, набор состоит из трех гидрографов (максимального, минимального и среднего) для каждого водохранилища. Для каждого из прогнозных гидрографов методами, описанными в разделе "Алгоритм построения спецпуска", определяются основной и альтернативные режимы работы водохранилищ ВКК на июнь (до конца половодья).

Сформированные варианты режимов работы водохранилищ ВКК передаются в МРГ для обсуждения, выработки рекомендаций и дальнейшего принятия управленческого решения руководством Росводресурсов.

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ СПЕЦПОПУСКА

Набор прогнозных гидрографов притока к водохранилищам ВКК на II квартал позволяет сформировать режимы работы каскада. При этом требуется выбрать компромиссный спецпуск с учетом интересов различных водопользователей верхнего (энергетики и т.д.) и нижнего (водного транспорта, сельского и рыбного хозяйства, коммунального хозяйства, экологии) бьефа. Режим работы остальных водохранилищ определяется по условиям выполнения требований Правил использования водных ресурсов (ПИВР) [7–9] и обеспечения спецпуска в створе Волгоградского ГУ.

В соответствии с прогнозными гидрографами притока на половодье определяется несколько вариантов прогнозных спецпусков. Стратегия формирования спецпуска состоит в следующем.

В многолетнем ряду гидрографов бокового притока к водохранилищам ВКК с суточным интервалом дискретности осуществляется поиск 2–3 лет с близкими объемами бокового притока по прогнозному интервалу.

Соответствующие найденным годам сбросные гидрографы принимаются за модельные для построения прогнозных гидрографов приточности для каждого водохранилища ВКК.

На основе оптимизационных методов строятся режимы работы водохранилищ ВКК и спецпуски различной конфигурации с различной иерархией приоритетов водопользователей, в интересах которых осуществляется управление ВКК.

Полученные режимы работы (спецпуски) оперативно уточняются (по мере реализации и уточнения прогнозных величин по стоку) и, в конечном итоге, один из них используется для управления.

Как уже говорилось, спецпуск имеет фиксированную конфигурацию, конкретный вид графика задается значениями параметров Z_1, Z_2, \dots, Z_9 (рис. 1):

Z_1 – пуск на 1 апреля, м³/с;

Z_2 – скорость изменения сбросного расхода в фазе подъема и спада (средняя скорость изменения 1–500 м³/с в сутки);

Z_3 – начало половодных пусков, дни;

Z_4 – пуск на начало половодья, м³/с;

Z_5 – величина с/х пускa, м³/с;

Z_6 – продолжительность с/х пускa, дни;

Z_7 – величина р/х пускa, м³/с;

Z_8 – продолжительность р/х пускa, дни;

Z_9 – величина транспортного пускa, м³/с.

На рис. 1 приведены некоторые типичные значения параметров.

При решении задачи формирования спецпуска значения переменных Z_1 и Z_2 считаются заданными. Значения переменных Z_3 и Z_4 определяются отдельно, а значения переменных Z_5, \dots, Z_9 определяются на основе решения ряда оптимизационных задач с различными целевыми функциями, отражающими принятую иерархию приоритетов водопользователей.

Ограничения для оптимизационных задач определяются на основе технических характеристик водохранилищ ВКК, указанных в [7–9], и предельных значений переменных, определяющих конфигурацию спецпуска [6]. На сегодняшний день границы изменения переменных Z_5, \dots, Z_9 определены действующими правилами и экспертными рекомендациями и в случае достаточно высокого половодья могут быть представлены в виде набора диапазонов:

$$C_5 = 24\,500 \text{ м}^3/\text{с} \leq Z_5 \leq D_5 = 27\,000 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$C_6 = 5 \text{ дней} \leq Z_6 \leq D_6 = 10 \text{ дней};$$

$$C_7 = 15\,000 \text{ м}^3/\text{с} \leq Z_7 \leq D_7 = 20\,000 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$C_8 = 14 \text{ дней} \leq Z_8 \leq D_8 = 23 \text{ дня};$$

$$C_9 = 5000 \text{ м}^3/\text{с} \leq Z_9 \leq D_9 = 7000 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Отметим, что ограничение на продолжительность рыбной полки Z_8 отражает современные требования рыбного хозяйства. В случае маловодных лет значения величин C_5, \dots, C_9 и D_5, \dots, D_9 могут быть выбраны другими.

Для формирования оптимизационной задачи прежде всего определяются критерии, каждый из которых представляет собой долю отклонения от требования какого-либо водопользователя (водопотребителя):

$$F_5 = (D_5 - Z_5) / (D_5 - C_5),$$

$$F_6 = (D_6 - Z_6) / (D_6 - C_6),$$

$$F_7 = (D_7 - Z_7) / (D_7 - C_7),$$

$$F_8 = (D_8 - Z_8) / (D_8 - C_8),$$

$$F_9 = (D_9 - Z_9) / (D_9 - C_9).$$

Отметим, что значения этих критериев лежат в диапазоне от 0 до 1. Кроме того, рассматривается критерий F_{10} , описывающий отклонение от требования энергетиков и характеризующий степень наполнения к концу половодья водохранилищ ВКК до НПУ:

$$F_{10} = (W(t_{\text{ф.пол}}) - W_{\text{НПУ}})^2 / (W_{\text{НПУ}})^2,$$

здесь $W(t)$ — объем воды в водохранилищах ВКК на дату t ; $t_{\text{ф.пол}}$ — дата окончания половодья (1 июля); $W_{\text{НПУ}}$ — объем воды в водохранилищах ВКК при нормальном подпорном уровне (НПУ).

Целевая функция задачи оптимизации (характеризующая возможный ущерб)

$$\Sigma_i = (\mu_i F_i)_{[5,10]}$$

строится на основе использования множителей μ_5, \dots, μ_{10} , которые задают приоритет одного требования над другим. Например, в соответствии с требованиями рыбного хозяйства желательно, чтобы спецпуск продолжался как можно дольше, пусть даже с меньшим расходом. Поэтому можно взять μ_6 такое, чтобы оно было на два порядка меньше μ_8 , например $100 \times \mu_6 \leq \mu_8$. Если требования энергетики доминируют над требованиями всех водопользователей, то можно взять $1000 \times \mu_i \leq \mu_{10}$ ($i = 5, \dots, 9$).

Значения переменных Z_5, \dots, Z_{10} определяются на основе решения оптимизационной задачи (минимум ущерба):

$$\Sigma_i = (\mu_i F_i)_{[5,10]} \Rightarrow \min \quad (1)$$

при выполнении соотношений математической модели ВКК, описанной в [1], а также при удовлетворении следующих ограничений:

$$C_i \leq Z_i \leq D_i, \quad i = 5, 10, \quad (2)$$

$$W_{\text{УПС}} = W(t_{\text{н.пол}}), \quad (3)$$

здесь $t_{\text{н.пол}}$ — дата начала половодья (1 апреля), $W_{\text{УПС}}$ — объемы воды в водохранилищах ВКК при уровне предполоводной сработки. Таким образом, значения переменных Z_5, \dots, Z_{10} и, следовательно, сбросной гидрограф, определяются в зависимости от выбранных приоритетов водопользователей μ_5, \dots, μ_{10} .

Для каждого прогнозного гидрографа притока к водохранилищам ВКК на основе решения задачи (1)–(3) может быть построено несколько спецпусков в зависимости от приоритетов водопользователей. Эти спецпуски используются при принятии решения об окончательной конфигурации сбросного гидрографа в зависимости от оперативной гидрологической обстановки.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ПРОГНОЗНОГО СБРОСНОГО СПЕЦПУСКА

Для реализации предложенных математических моделей в среде Excel разработаны вычислительные схемы, поддерживающие формирование прогнозного притока к ВКК и расчет набора спецпусков различного вида с вычисленными параметрами, соответствующими уровню прогноза.

Рассмотрим в качестве примера прогнозы за апрель и за весь период половодья (максимальные), соответствующие маловодному году. Из имеющегося ряда суточных гидрографов притока за 1999–2017 гг. выбран в качестве модельного 2000 г. Соответствующие данные, использованные в примере, приведены в табл. 3 (за апрель и за II квартал).

По графикам притока к водохранилищам ВКК, реально наблюдаемым в 2000 г. (табл. 3), построены прогнозные гидрографы притока к каждому водохранилищу каскада и к ВКК ГЭС в целом (рис. 3).

При помощи стандартного оптимизатора Solver (Поиск решения), встроенного в среду Excel, построены два прогнозные гидрографа спецпуска. На рис. 4 показаны два предлагаемых расчетных гидрографа спецпуска для принятия решения на заседании МРГ. Первый спецпуск соответствует минимальным требованиям сельского и рыбного хозяйства и экологии. Второй спецпуск соответствует выбору приоритета в пользу энергетики, т.е. наполнению водохранилищ каскада до уровней НПУ.

На рис. 5 показан ход наполнения ВКК для двух спецпусков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существенное влияние на состояние экосистемы Волги оказывает управление водными ресурсами, не всегда ориентированное на достижение экологического благополучия речного бассейна. Для улучшения управления предложена методика, основанная на современных методах многокритериальной оптимизации и теории компромиссов, что позволяет осуществлять поиск компромиссных решений в интересах всех водопользователей.

Из задач, которые остались за пределами данного исследования, отметим необходимость учета произошедших существенных изменений гидрометеорологических условий (перераспределения стока между сезонами в результате



Рис. 3. Прогнозные гидрографы приточности к водохранилищам ВКК.



Рис. 4. Прогнозные гидрографы сбросов с Волгоградского ГУ.

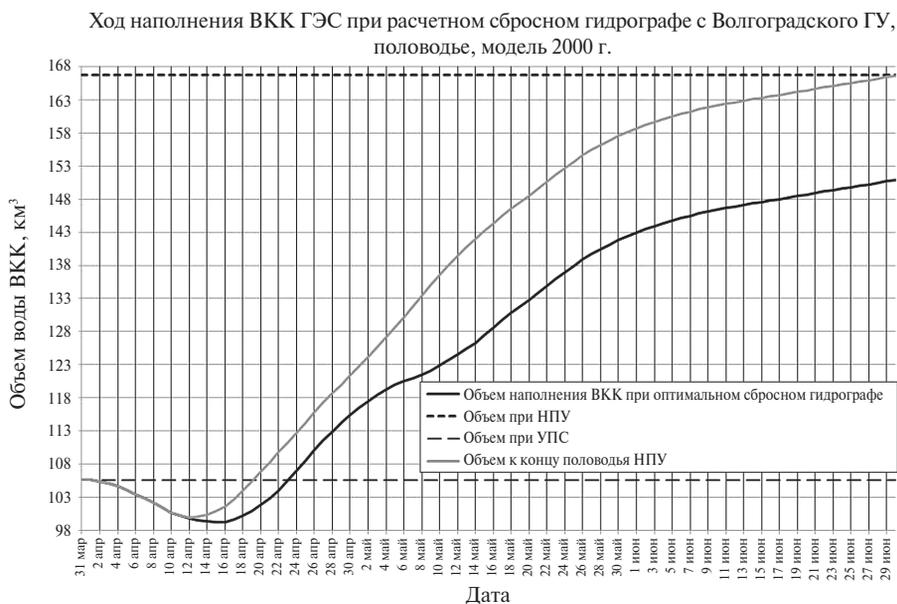


Рис. 5. Ход наполнения водохранилищ ВКК при реализации спецпусков в период половодья 2000 г.

климатических изменений), необходимость до-
работки Правил управления водными ресурсами
с учетом произошедших существенных изме-
нений технического состояния гидроузлов (по-
садка уровней, изменение расходных характе-
ристик турбин), а также разработку метода учета
неопределенности гидрологических прогнозов
при принятии управленческих решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асарин А.Е., Бубер А.Л. Оперативное управление каскадом водохранилищ Волжско-Камского каскада гидроузлов при пропуске весенних половодий: безопасность, поддержка принятия решений, оптимальное управление. // Тез. докладов Четвертого междунар. конгресса "Вода: Экология и технология". Экватек-2000. М.: Сибико Интернейшл, 2000. С. 457–459.
2. Болгов В.М., Бубер А.Л., Лотов А.В. Поддержка принятия стратегических решений по обеспечению водой Нижней Волги на основе визуализации границы Парето // Искусственный интеллект и принятие решений. 2017. № 1. С. 84–97.
3. Болгов В.М., Бубер А.Л., Комаровский А.А., Лотов А.В. Поиск компромиссных решений при планировании и управлении попусками в нижний бьеф Волгоградского гидроузла. 1. Стратегическое планирование // Вод. ресурсы. 2018. № 5. С. 573–580.
4. Катунин Д.Н. Гидроэкологические основы формирования экосистемных процессов в Каспийском море и дельте реки Волги. Астрахань: КаспНИРХ, 2014. С. 56–99.
5. Лотов А.В. Компьютерная визуализация оболочки Эджворта-Парето и ее применение в интеллектуальных системах поддержки принятия решений // Информационные Технологии и Вычислительные Системы. 2002. № 1. С. 83–100.
6. Методические Указания по разработке правил использования водохранилищ. Приказ МПР РФ от 26 января 2011 года № 17. Зарегистрировано в Минюсте РФ 04.05.2011 № 2065. 56 с.
7. Основные правила использования водных ресурсов Куйбышевского водохранилища на р. Волге. М.: Росгипрводохоз, 1983. 23 с.
8. Основные правила использования водных ресурсов Саратовского водохранилища на р. Волге. М.: Росгипрводохоз, 1983. 30 с.
9. Основные правила использования водных ресурсов Волгоградского водохранилища на р. Волге. М.: Росгипрводохоз, 1983. 36 с.
10. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Госстрой РФ, 2004.

COMPROMISE SOLUTIONS FOR PLANNING AND MANAGING AUGMENTATION TO DOWNSTREAM WATER OF VOLGOGRAD HYDROPOWER INSTALLATION

2nd Tactic planning and operating department

© 2019 M. V. Bolgov^{1,*}, A. L. Buber², A. A. Komarovskiy², A. V. Lotov³

¹Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences
Russia 119333 Moscow

²All-Russian Research Institute for Hydraulic Engineering and Land Reclamation (VNIIGiM)
Russia 19333 Moscow

³Federal Research Center Computer Science and Control of the Russian Academy of Sciences
Russia 11933 Moscow

*e-mail: bolgovmv@mail.ru

Received: 04.04.2016

Received version received: 23.08.2018

Accepted: 25.04.2018

The discussion on developing new computer technologies for problems analysis and support of decision-making is continued regarding water resources available for the users of the water utilization system of the Lower Volga and the entire Volga–Kama reservoirs cascade. Thus, this second part examines the objectives of the tactic planning to determine augmentation to the downstream water of Volgograd hydropower installation (special augmentation) and develops an algorithm for defining special augmentation based on the inflow forecast in the spring high water (April–June). This algorithm will aid in the operating management of the reservoirs for implementing the already set strategic goals.

Keywords: Volga–Kama reservoir cascade, water resources, lateral inflow, stream-flow series, special augmentation, tactic planning, operating management.

DOI: 10.31857/S0321-0596463333-344