



УДК 556.132

Р.И. Гета

ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ С ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ

Испарение с водной поверхности, в зависимости от климатических условий, морфологии и морфометрии водных объектов, может играть в их водном балансе весьма заметную роль. Если для крупнейшего в России Братского водохранилища доля испарения в его водном балансе составляет в среднем всего около 2 % [4], то для находящегося в других природных и климатических условиях водохранилища Бухтарминской ГЭС она даже превышает 15 % расходной части водного баланса [6]. Таким образом, надежный расчет испарения с поверхности водоемов является важным фактором повышения точности водобалансовых расчетов. По данным А.П. Браславского [2], ошибка в оценке годового слоя испарения с поверхности Бухтарминского водохранилища только на 10 % обуславливает около одного миллиона рублей ущерба из-за появления незапланированного дефицита электроэнергии (на 1970 г.).

До настоящего времени проблема надежной оценки испарения с естественных водоемов и водохранилищ далеко не решена. Среди существующих методов расчета испарения с водоемов наибольший интерес, с практической точки зрения, представляет гидрометеорологический метод, позволяющий рассчитывать величину испарения на основе эмпирических зависимостей, используя стандартные гидрометеорологические наблюдения. Подобных зависимостей предложено много. Большинство из них имеет вид

$$E = An(1 + BW_z^m)(e_0 - e_z), \quad (1)$$

где E - величина испарения за период n , мм; n - число суток в периоде; e_0 и e_z - упругость водяного пара, определяемая по температуре поверхности и измеренная на высоте Z , гПа; W_z - скорость ветра на этой высоте, м/с.

Подобную структуру имеют формулы В.К. Давыдова [7], Б.Д. Зайкова [8], А.П. Браславского и З.А. Викулиной [1] и других, в том числе и зарубежных исследователей. Аналогичную структуру имеет и формула ГГИ, рекомендованная для расчетов испарения с водной поверхности озер и водохранилищ [13].

Значения коэффициентов A и B , показателя степени m у разных авторов различаются, отвечая осредненным за некоторый период гидродинамическим условиям переноса водяного пара с поверхности испарительных устройств в атмосферу в местах их установки. Различия в установке, типе и защищенности испарительных устройств, наблюдения на которых положены в основу эмпирических зависимостей, не позволяют получить универсальную зависимость, удовлетворяющую самым разным условиям.

Строго говоря, эмпирические зависимости применимы только в тех условиях и для тех испарителей, по наблюдениям на которых они получены. Распространение их в другие

природные условия, на другие типы испарителей, а также за пределы наблюдавшихся значений градиента упругости водяного пара и скоростей ветра, связано со снижением достоверности получаемых по ним расчетных значений испарения.

Более обоснованными с теоретической точки зрения являются метод теплового баланса и метод турбулентной диффузии. Применение метода теплового баланса предполагает учет теплоток в водоеме, в том числе теплообмена водной массы с его дном и берегами. Однако использование для их оценки различных полуэмпирических зависимостей снижает надежность этого метода.

Метод турбулентной диффузии как и метод теплового баланса теоретически также достаточно обоснован, поскольку учитывает гидродинамические условия испарения не осредненно по акватории и во времени, а в зависимости от состояния испаряющей поверхности и приповерхностного слоя атмосферы в определенной точке и в конкретный момент времени. Однако ряд допущений, недостаточная надежность определения параметров формул турбулентной диффузии, необходимость не всегда обоснованной экстраполяции метеозаписей по площади водоемов, обладающих зачастую сложным морфологическим строением и поэтому неоднородными гидродинамическими и термическими условиями водной поверхности, наконец, неизбежность их осреднения за расчетные интервалы времени, практически сводят на нет преимущества, которые дает более строгий учет в этих формулах физической основы процесса.

Существование большого числа зависимостей для расчета испарения с водной поверхности обусловлено, на наш взгляд, тем, что при их выявлении не учитывалась степень подобия факторов, влияющих на процесс испарения. Выяснить, соответствует ли выстраиваемая модель процесса самому процессу или явлению, - задача теории подобия. Теория подобия нашла широкое применение в технических приложениях, в частности при решении задач по теплообмену и в теории сушки. Обоснование приложений теории подобия содержится в целом ряде работ российских и зарубежных авторов [9, 14 и др.].

Суть теории подобия кратко сводится к следующему. Множество размерных величин, характеризующих определенный процесс, эквивалентно множеству составленных из них, безразмерных комплексов-критериев подобия (Пи-теорема), и, следовательно, интеграл дифференциального уравнения, описывающего процесс, может быть представлен как функция этих безразмерных комплексов. Одновременно теория подобия регламентирует распространение результатов моделирования процесса только на подобные явления, устанавливая на основе анализа критериев подобия границы использования полученной модели.

Уравнение Фика

$$\frac{dq}{d\tau} = D \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

связывающее скорость массопереноса $\frac{dq}{d\tau}$ с полем концентраций q при решении стационарной задачи для случая вынужденной конвекции, позволяет обобщить данные по испарению в виде критериальной зависимости

$$Nu_D = K Re^n Pr_D^m, \quad (3)$$

где $Nu_D = \frac{\beta L}{D}$ - диффузионный критерий Нуссельта; β - коэффициент массоотдачи, м/час; L - характерный размер, м; D - коэффициент молекулярной диффузии водяного

пара в воздух, м²/час; $Re = \frac{WL}{\nu}$ - динамический критерий Рейнольдса; ν - коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с; Pr_D - диффузионный критерий Прандтля. Его значение для воды близко к единице (0,75), а показатель степени в среднем составляет 0,33 [10].

Из попыток применения теории подобия к изучению и расчетам испарения с водной поверхности, осуществленных на основе опытов в лабораторных условиях, можно указать на работы Л.С. Лейбензона, А.В. Лыкова [10], И.П. Бударова [3], А.В. Нестеренко [11]. По Лыкову [10] уравнение для скорости испарения в безразмерных координатах имеет вид

$$A = K Re^n, \quad (4)$$

где $A = \frac{Nu_D}{Pr_D}$; K и n зависят от соотношения A и Re .

Первая попытка использовать теорию подобия для изучения и моделирования испарения с водной поверхности (насколько известно автору) принадлежит З. Сакипову [12]. Взяв за основу схему Лыкова, Сакипов, используя данные разных авторов, получил зависимость, которая была описана им двумя уравнениями:

$$1. A = 0,072 Re^{0,78} \quad \text{для области } 2 \cdot 10^4 \leq Re \leq 3 \cdot 10^5; \quad (5)$$

$$2. A = 0,002 Re^{0,97} \quad \text{для области } Re \geq 3 \cdot 10^5. \quad (6)$$

Автором настоящей работы также проводилось исследование испарения с водной поверхности испарителей и испарительных бассейнов с использованием теории подобия [5]. В отличие от Сакипова, было получено три критериальных зависимости безразмерной скорости испарения от числа Re . Предлагаемая работа является дальнейшим развитием этого исследования. Для выявления численного вида критериальных уравнений использованы данные наблюдений на водноиспарительной сети СССР по испарителям ГГИ-3000, испарительным бассейнам площадью 3, 10,7, 20, 100 и 526 м² (Форт-Коллинз, США), расположенным в разных природных зонах, в общей сложности по 420 месяце-пунктам за период 1941-1974 гг. (СССР) и 1926-1928 гг. (Форт-Коллинз).

Согласно закону Дальтона скорость испарения можно представить выражением

$$E = \beta S(q_0 - q_{200}), \quad (7)$$

откуда

$$\beta = \frac{E}{S(q_0 - q_{200})}, \quad (8)$$

где E - скорость испарения, кг/час; S - площадь испаряющей поверхности, м²; q_0 и q_{200} - абсолютная влажность воздуха при температуре испаряющей поверхности и на высоте 200 см, соответственно, кг/м³.

Подставляя (8) в формулу (7) и переходя от абсолютной влажности к упругости водяного пара, получим

$$A = \frac{ER_n T}{Pr_D^m DL(e_0 - e_{200})}, \quad (9)$$

где R_n - удельная газовая постоянная водяного пара, м²/(с²·град.); T - температура в °K,

определяемая как $T_0 + \bar{t}$, где $\bar{t} = (t_0 + t_{200})/2$.

Коэффициент диффузии водяного пара в воздух определяется по формуле

$$D = 0,0792 + 0,00054t_0, \quad (10)$$

где t_0 - температура испаряющей поверхности, °C.

Коэффициент кинематической вязкости воздуха при определении числа Re находится по выражению

$$\nu = (13,28 + 0,09\bar{t}) \cdot 10^{-6}. \quad (11)$$

Полученная критериальная зависимость безразмерной скорости испарения от числа Re графически представлена на рис.1. Зависимость построена в логарифмических координатах, имеет сложный характер и описывается семью уравнениями степенной функции

$$1. A = 8,85Re^{0,261} \text{ для области } 1,8 \cdot 10^4 \leq Re \leq 8 \cdot 10^4 \quad (12)$$

(испаритель ГГИ-3000);

$$2. A = 0,012Re^{0,845} \text{ для области } 8 \cdot 10^4 \leq Re \leq 6,3 \cdot 10^6 \quad (13)$$

(установки всех типов);

$$3. A = 221Re^{0,104} \text{ для области } 1,4 \cdot 10^5 \leq Re \leq 5 \cdot 10^5 \quad (14)$$

(бассейн 20 м²);

$$4. A = 0,336Re^{0,596} \text{ для области } 5 \cdot 10^5 \leq Re \leq 2 \cdot 10^6 \quad (15)$$

(бассейн 20 м²);

$$5. A = 701Re^{0,071} \text{ для области } 3,2 \cdot 10^5 \leq Re \leq 10^6 \quad (16)$$

(бассейн 100 м²);

$$6. A = 2,88Re^{0,468} \text{ для области } 10^6 \leq Re \leq 6,3 \cdot 10^6 \quad (17)$$

(бассейн 100 м²);

$$7. A = 12,7Re^{0,396} \text{ для области } 1,6 \cdot 10^6 \leq Re \leq 4,5 \cdot 10^6 \quad (18)$$

(бассейн 526 м²).

Из приведенных уравнений видно, что при скоростях ветра выше 1,6 м/с безразмерная скорость испарения для всех типов испарительных установок осредненно является однозначной функцией критерия Re (зависимость (13)). Со снижением скорости ветра влияние числа Рейнольдса на интенсивность испарения ослабевает, что на графике (рис. 1) проявляется уменьшением угла наклона линии связи к оси Re. При этом угловой коэффициент, характеризующий показателем степени при Re, уменьшается с увеличением размера испарительной установки. Ослабление зависимости безразмерной скорости испарения от числа Re предположительно указывает на то, что при определенных размерах испаряющей поверхности процесс испарения может стать автомодельным относительно Re. Следовательно, можно сделать вывод, что для оценки испарения с водоема достаточно большого размера ветровой член $f(w)$ в уравнениях традиционного вида может оказаться излишним. Влияние динамического фактора в этом случае будет учтено профилем влажности воздуха, который, в известной степени, сам является функцией скорости ветра.

Что касается зависимости (15), отклоняющейся от осредняющей линии в сторону оси Re, то для ее выявления были использованы данные наблюдений на испарительных бассейнах площадью 20 м², расположенных в зонах, достаточно увлажняемых или находящихся-

ся под влиянием близко расположенной водной поверхности. Это пункты: Ангарск, Братск, Якутск, Мыс Рожновский, о. Тюлений, Большой Ушканий остров (оз. Байкал) и др.

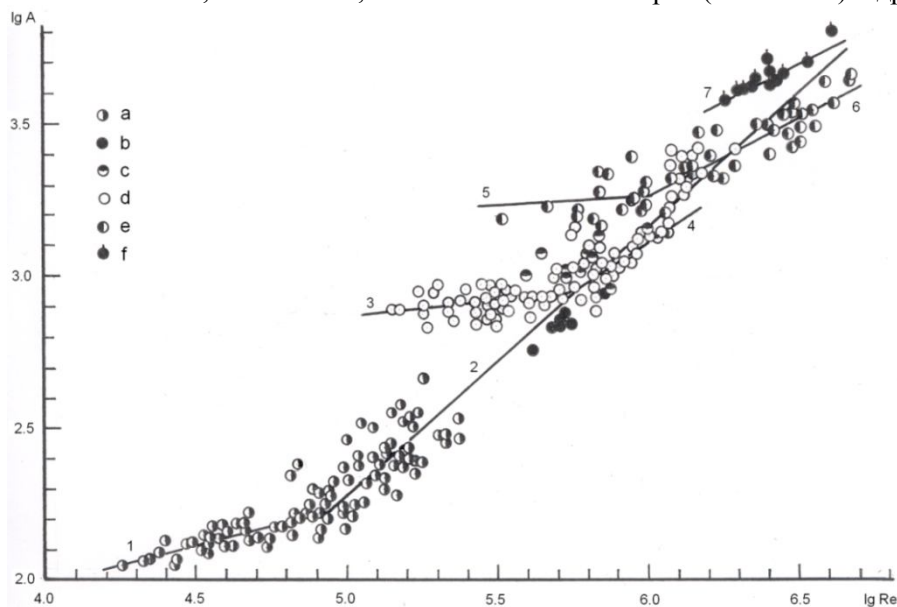


Рисунок 1 - Зависимость безразмерной скорости испарения A от числа Рейнольдса Re (номера зависимостей в тексте): а - испаритель ГГИ-3000; б - испарительный бассейн площадью 3 м^2 ; с - испарительный бассейн площадью $10,7 \text{ м}^2$; д - испарительный бассейн площадью 20 м^2 ; е - испарительный бассейн площадью 100 м^2 ; ф - испарительный бассейн площадью 526 м^2

Уравнение вида $A = K Re^n$ может быть преобразовано к виду с размерными переменными по формуле

$$E = \frac{24 \cdot 100 K Pr^m}{L^{1-n} R_n} \cdot \frac{D}{T V^n} W_{200}^n (e_0 - e_{200}), \quad (19)$$

где E – скорость испарения, м/сут.

Постоянные множители 24 и 100 в этой формуле служат для перехода от часовых к суточным величинам испарения и перевода Па в гПа.

Поскольку $\frac{D}{T V^n}$ является функцией температуры, то уравнение (14) для скоростей ветра $1,6 \text{ м/с}$ и ниже можно привести к виду

$$E = 0,252(1 + 0,0021\bar{t}) W_{200}^{0,104} (e_0 - e_{200}), \quad (20)$$

или, осредняя по средней температуре воды и воздуха,

$$E = 0,260 W_{200}^{0,104} (e_0 - e_{200}). \quad (21)$$

Для скоростей ветра выше $1,6 \text{ м/с}$ уравнение (15) преобразуется к виду

$$E = 0,203(1 - 0,00082\bar{t}) W_{200}^{0,596} (e_0 - e_{200}), \quad (22)$$

или в среднем

$$E = 0,201W_{200}^{0,596}(e_0 - e_{200}). \quad (23)$$

Для испарительного бассейна площадью 100 м^2 при скоростях ветра ниже $1,6 \text{ м/с}$ уравнение (17) можно представить в виде

$$E = 0,252(1 + 0,0013\bar{t})W_{200}^{0,071}(e_0 - e_{200}), \quad (24)$$

или в среднем

$$E = 0,257W_{200}^{0,071}(e_0 - e_{200}). \quad (25)$$

Для скоростей ветра выше $1,6 \text{ м/с}$ уравнение (18) будет иметь вид

$$E = 0,222W_{200}^{0,468}(e_0 - e_{200}). \quad (26)$$

В этом уравнении влияние температуры на скорость испарения уже не проявляется.

Общая для всех типов испарительных установок зависимость (13), при $Re \geq 8 \cdot 10^4$ приводится к виду

$$E = 0,172(1 - 0,0025\bar{t})W_{200}^{0,845}(e_0 - e_{200}), \quad (27)$$

или, осредняя по температуре, получим

$$E = 0,166W_{200}^{0,845}(e_0 - e_{200}). \quad (28)$$

На рис. 2 показаны зависимости величины испарения с поверхности испарительного бассейна (20 м^2) от скорости ветра (отнесенные к единице градиента упругости водяного пара), рассчитанные по формулам разных авторов (формулы Б.А. Аполлова и С.С. Ремезовой, А.Н. Афанасьева, ГГИ приведены в подрисуночной подписи). Из рисунка видно, что формула Б.А. Аполлова и С.С. Ремезовой, формула А.Н. Афанасьева и формула автора (22) дают более низкие значения испарения по сравнению с формулой ГГИ. Наиболее точно соответствует полю точек в интервале скоростей ветра $1-3 \text{ м/с}$ формула Афанасьева. Поэтому при средних скоростях ветра выше 1 м/с при расчетах испарения с водной поверхности водоемов предпочтительнее применять эту формулу, используя для расчета характеристик метеоэлементов над водоемом методику ГГИ.

Видимый на графике разброс значений единичного испарения при скоростях ветра выше 3 м/с , скорее всего, обусловлен выбрызгиванием воды из испарительного бассейна.

Более высокие значения испарения, которые дает формула (22), по сравнению с полученными по формуле Афанасьева, обусловлены тем, что в отличие от нашей формулы формула Афанасьева получена по данным наблюдений на оз. Байкал (ст. Большой Ушканый остров) при направлениях ветра только со стороны водной поверхности. В то же время расчет испарения по формуле (26), полученной для испарительного бассейна площадью 100 м^2 при скоростях ветра выше $1,6 \text{ м/с}$, практически совпадает с результатом, полученным по формуле Афанасьева.

Подводя итог данной статьи, следует отметить, что одним из достоинств представления результатов наблюдений над испарением в виде критериальных зависимостей является возможность его моделирования, исходя из равенства критериев подобия. В случае вынужденной конвекции таким критерием является критерий динамического подобия Рейнольдса.

Анализ уравнений безразмерной скорости испарения показывает, что при прочих рав-

ных условиях интенсивность испарения прямо пропорциональна скорости ветра в степени n и обратно пропорциональна размерам испаряющей поверхности в степени $1 - n$.

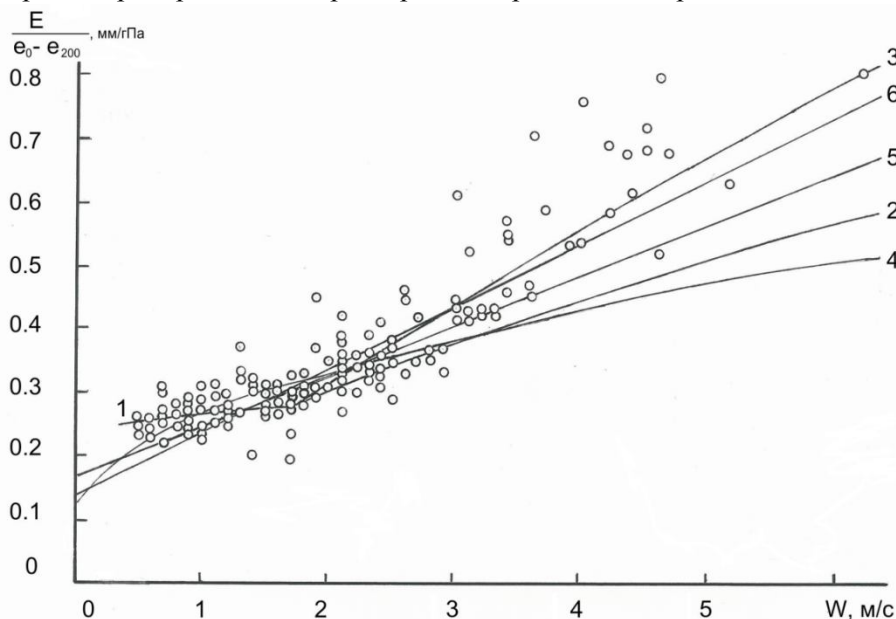


Рисунок 2 - Зависимость месячных величин испарения с поверхности испарительного бассейна площадью 20 м^2 (на единицу градиента упругости водяного пара) от среднемесячной скорости ветра (по формулам разных авторов): 1 - зависимость автора (21); 2 - зависимость автора (23); 3 - зависимость автора (28); 4 - зависимость А.Н.Афанасьева: $E = 0,13(1 + W_{200}^{0,6})(e_0 - e_{200})$; 5 - зависимость Б.А.Аполлова и С.С.Ремезовой: $E = 0,174(1 + 0,46W_{200})(e_0 - e_{200})$; 6 - зависимость ГГИ: $E = 0,14(1 + 0,72W_{200})(e_0 - e_{200})$

Для обобщающей критериальной зависимости (13) показатель степени - величина, одинаковая для всех типов испарительных установок. Однако выделяются режимы испарения и условия подобия, при которых этот показатель будет меняться в зависимости от размеров испаряющей поверхности, что отчетливо прослеживается при малых скоростях ветра. Влияние скорости ветра на интенсивность испарения зависит от размера испаряющей поверхности. Чем больше протяженность водного зеркала по направлению воздушного потока, тем меньше, при прочих равных условиях, влияние на интенсивность испарения горизонтальной составляющей скорости ветра.

По-видимому, уменьшение этого влияния происходит по гиперболическому закону, достигая при достаточно большой протяженности водной поверхности какого-то определенного значения, обусловленного термическими и гигрометрическими свойствами испаряющей поверхности и атмосферы.

Полученные критериальные зависимости безразмерной скорости испарения от числа Рейнольдса, строго говоря, могут использоваться только в пределах, ограниченных наблюдавшимися значениями критерия Re . Иными словами, они применимы для расчета испарения с испарителей ГГИ-3000 и испарительных бассейнов площадью до 100 м^2 при скоростях ветра от $0,5$ до $6,0 \text{ м/с}$. Распространение области их применения на большие водоемы требует все же соответствующего экспериментального обоснования с последую-

ющей обработкой данных наблюдений методами теории подобия.

Анализ процесса испарения на основе теории подобия позволяет рассчитывать редукционные коэффициенты для перехода показаний испарительной установки одного размера к другой. Выражение для редукционного коэффициента r_{1-2} в этом случае запишется в виде

$$r_{1-2} = \frac{K_1 L_2^{1-n,2} T_2 D_1 v_2^{n,2} W_1^{n,1} (e_0 - e_{200})_1}{K_2 L_1^{1-n,1} T_1 D_2 v_1^{n,1} W_2^{n,2} (e_0 - e_{200})_2}. \quad (29)$$

Теория подобия позволяет строить модель испарения с водной поверхности испарительных установок и водоемов, не опираясь на субъективные предпочтения той или иной эмпирической модели, а на основе комплексного анализа данных наблюдений на испарительных установках всех типов, исходя из равенства критериев подобия.

Список литературы

1. Браславский А.П. Нормы испарения с поверхности водохранилищ / А.П. Браславский, З.А. Видулина. - Л.: Гидрометеиздат, 1954. - 212 с.
2. Браславский А.П. Методика составления водного баланса водохранилищ / А.П. Браславский, Н.П. Капитонова, Г.В. Коротких, Б.А. Краснов и др. // Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства. - Вып. 7. - Алма-Ата: Казахстан, 1970. - С. 8-110.
3. Бударов И.П. Уравнение для скорости испарения жидкости в условиях вынужденной конвекции // Журнал физической химии. - 1959. - Т. XXXIII. - № 4. - С. 920-921.
4. Гета Р.И. Водный баланс Братского водохранилища. - Новосибирск: Наука, 1978. - 134 с.
5. Гета Р.И. Применение теории подобия к расчету испарения с водной поверхности // Метеорология и гидрология. - 1979. - № 2. - С. 88-97.
6. Гета Р.И. К характеристике водного баланса Бухтарминского водохранилища / Р.И. Гета, В.П. Кондратьев, Г.А. Айтходжаева // Вопросы географии и экологии: сб. науч. тр. - Усть-Каменогорск: ВГИ, 2000. - С. 10-15.
7. Давыдов В.К. Испарение с водной поверхности в Европейской части СССР. - Свердловск; М.: Гидрометеиздат, 1944. - 120 с.
8. Зайков Б.Д. Испарение с водной поверхности прудов и малых водохранилищ на территории СССР // Труды ГГИ. - 1949. - Вып. 21 (75). - 54 с.
9. Конаков П.К. Теория подобия и ее применение в теплотехнике. - М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. - 208 с.
10. Лыков А.В. Теория сушки. - М.; Л.: Госэнергоиздат, 1955. - 416 с.
11. Нестеренко А.В. Тепло- и массообмен при испарении жидкости со свободной поверхности // Журнал технической физики. - 1955. - Т. XXIV. - Вып. 4. - С. 729-741.
12. Сакипов З. О возможности моделирования испарения с поверхности водохранилищ-охладителей // Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства. - Вып. 6. - Алма-Ата: Наука, 1968. - С. 170-175.
13. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. - Л.: Гидрометеиздат, 1969. - 84 с.
14. Эккерт Э.Р. Теория тепло- и массообмена. - М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. - 680 с.

Получено 30.10.12

УДК 626.81:626.80

Р.И. Гета, А.Н. Логиновская
ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И ВОДНЫЙ БАЛАНС ШУЛЬБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Шульбинское водохранилище - третья, нижняя ступень каскада иртышских водохра-

нилищ - образовано подпором течения р. Иртыш земляной плотиной (длиной по гребню 645 м) в 70 км выше г. Семей (бывший Семипалатинск). Водохранилище долинно-руслового типа предназначено для сезонного регулирования стока на участке между створами Бухтарминской и Шульбинской ГЭС. Его площадь при НПУ 240 м БС - 255 км², полный объем - 2,39 км³, отметка УМО - 232 м БС. Рабочий объем водохранилища - 1,47 км³. Для аккумуляции стока половодья с вероятностью превышения 0,01 % предусмотрено повышение уровня до 243 м БС (форсированный подпорный уровень). Максимальная пропускная способность сооружений ГЭС при НПУ с вероятностью превышения расходов 1 % составляет 7770 м³/с, при ФПУ с вероятностью превышения расходов 0,01 % - 8770 м³/с [6].

Водоохранилище комплексного назначения, но основным его водопользователем является гидроэнергетика. Шесть турбоагрегатов ГЭС обеспечивают установленную мощность 702 МВт и среднегодовую выработку электроэнергии 1,66 млрд кВт·ч [10].

Протяженность водохранилища по долине Иртыша около 72 км при средней ширине 3,5 км, наибольшая ширина достигает 6 км. Средняя глубина при НПУ - 9,4 м, наибольшая - около 29 м. В местах впадения притоков водохранилище образует несколько заливов (до 11 км, р. Кызылсу).

Речная сеть бассейна водохранилища, помимо самого Иртыша, представлена двумя крупными реками - Ульбой и Убой, формирующими свой сток на хорошо увлажняемых склонах горных хребтов Западного Алтая. Из малых притоков наиболее крупным является р. Аблайкетка (1680 км²) со среднемноголетним расходом 4,56 м³/с. Другие малые притоки водохранилища - Уланка, Дресвянка, Глубочанка, Красноярка, Осиха, Шульбинка, Кызылсу и др. существенной роли в его питании не играют. К низовьям эти притоки в значительной степени теряют свой сток, часто пересыхая летом и перемерзая зимой. Плотность их речной сети, за исключением бассейна Аблайкетки, не превышает 0,30 км/км².

Площадь бассейнов малых левобережных притоков составляет 15568 км². Площадь бассейнов малых правобережных притоков значительно меньше (всего около 1600 км²). Наиболее крупные из них - Шульбинка (430 км²) и Красноярка (422 км²) [7, 8].

Средний многолетний приток в водохранилище с неизученной территории определен балансовым методом: как разность стока р. Иртыш в створах Усть-Каменогорск - Шульба за синхронный период наблюдений (до 1959 г.), и составил 18 м³/с. Это русловой и подрусловой сток малых притоков, а также сток с межустьевых пространств.

Сток малых притоков водохранилища характеризуется высокой изменчивостью. Коэффициенты вариации (C_v) годового стока, определенные методом наибольшего правдоподобия, колеблются от 0,42 (Аблайкетка) до 0,88 (Ковалевка). При подсчете ресурсов годового стока малых рек средний для территории их бассейнов коэффициент вариации принят равным 0,60 при соотношении $C_s = 3C_v$, где C_s - коэффициент асимметрии распределения годовых величин стока.

Среднемноголетний приток из Усть-Каменогорского водохранилища подсчитан за период 1967-1999 гг. (после заполнения Бухтарминского водохранилища) и составил 576 м³/с с коэффициентом вариации годового стока, равным 0,16. Эмпирическая обеспеченность годового стока (P) рассчитана по формуле С.Н. Крицкого - М.Ф. Менкеля.

Распределение годовых величин стока через Усть-Каменогорскую ГЭС (рис. 1) хорошо аппроксимируется теоретической кривой трехпараметрического гамма-распределения С.Н. Крицкого - М.Ф. Менкеля при соотношении $C_s = C_v$. Размах вариации годовых рас-

ходов через ГЭС составил $388 \text{ м}^3/\text{с}$. Высокие значения стока были отмечены в 1969, 1971, 1972 и 1982 гг. (721 , 719 , 730 и $729 \text{ м}^3/\text{с}$, соответственно). Самый низкий сток был в 1983 году - $342 \text{ м}^3/\text{с}$. Низкий сток наблюдался также в 1978 г. ($439 \text{ м}^3/\text{с}$), в 1981 г. ($448 \text{ м}^3/\text{с}$), в 1986 г. ($493 \text{ м}^3/\text{с}$).

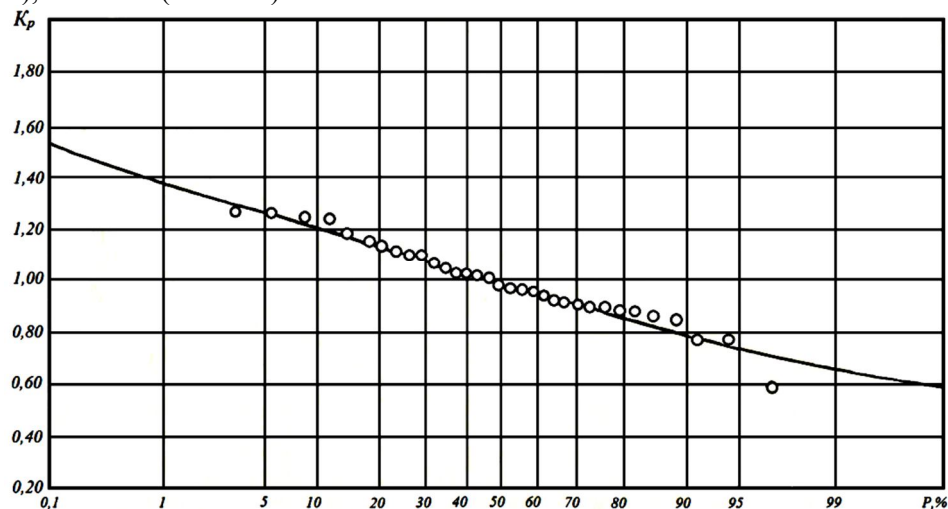


Рисунок 1 - Кривая обеспеченности стока через Усть-Каменогорскую ГЭС

На втором месте по значимости источником питания Шульбинского водохранилища, после стока через Усть-Каменогорскую ГЭС, является сток рр. Ульбы и Убы [5, 6].

Река Ульба - правый приток Иртыша, впадает в него в черте г. Усть-Каменогорска. Свое начало Ульба берет в месте слияния рр. Тихой и Громотухи в нижней части Риддерской котловины. Длина реки 100 км , площадь бассейна 4990 км^2 . Водораздельная линия проходит по высотам Убинского и Ульбинского хребтов с отметками до 1812 , 1895 м над уровнем моря. Внутренними водоразделами являются вершины Ивановского, Рассыпного и Проходного хребтов (высшая точка 2776 м над ур. моря). Лесистость бассейна 55% , средняя высота 960 м . В бассейне насчитывается 40 озер общей площадью $15,9 \text{ км}^2$ и 15 небольших ледников [9].

Ульба имеет развитую речную сеть. Средняя плотность речной сети бассейна $0,67 \text{ км}/\text{км}^2$. Большинство притоков невелики, 96% их общего числа - реки длиной менее 10 км . Наиболее значительным притоком является Малая Ульба с площадью бассейна 2300 км^2 . Ульба - типично горная река, средневзвешенный уклон ее русла 10% . Течение многих притоков бурное, с большими уклонами.

Среднемноголетний расход Ульбы за период 1946-2001 гг. составляет $98,5 \text{ м}^3/\text{с}$. Средний многолетний модуль стока равен $19,7 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$. Коэффициент вариации годового стока составляет $0,27$. По характеру водного режима Ульба, как и другие реки Казахстанского Алтая, относится к рекам алтайского типа с растянутым весенне-летним половодьем и частыми дождевыми паводками. Питание реки смешанное, доля талых вод - около 50% , вклад дождевого питания - 28% , грунтовый сток - 22% .

Начало весенне-летнего половодья в низовьях начинается обычно в конце марта и длится почти до конца июля. Максимальный расход половодья ($2000 \text{ м}^3/\text{с}$) был отмечен $17.05.1958 \text{ г.}$ Максимум дождевых паводков заметно ниже - $725 \text{ м}^3/\text{с}$ ($15.06.1958 \text{ г.}$).

Эрозионная деятельность в бассейне Ульбы развита слабо. Среднемноголетняя мутность речных вод составляет $95,8 \text{ г}/\text{м}^3$.

Ледостав на реке устанавливается чаще всего в последних числах ноября и длится в среднем 131 сутки. Вода Ульбы сильно загрязнена стоками предприятий Риддерского и Усть-Каменогорского промышленных узлов. В верховьях реки имеется несколько малых водохранилищ.

Другой крупный приток - р. Уба, впадает непосредственно в водохранилище. Длина Убы - 278 км, площадь бассейна - 9850 км². Бассейн ее ограничен высотами Тигирецкого, Коргонского, Ивановского и Убинского хребтов Западного Алтая с высотами до 1967, 2488 м над уровнем моря. Около 60 % территории занимают горы, и только на западе и юго-западе местность принимает характер мелкосопочника и всхолмленной степи. Лесистость бассейна – 50 %, средняя высота - 900 м.

Начинается Уба от слияния рр. Черной и Белой Убы, истоки которых лежат на склонах Коргонского и Ивановского хребтов. Наиболее крупными притоками являются Становая Уба (717 км²), Белопорожная Уба (590 км²), Осиновка (1610 км²). Средняя плотность речной сети - 0,72 км/км². Большую часть своего пути Уба протекает в горной местности в извилистых щелях. Среднезвешенный уклон ее русла 12 %.

Среднегодовое расхождение Убы за период 1936-2001 гг., приведенный к створу с. Нижне-Убинское, составляет 183 м³/с с коэффициентом вариации 0,26. В питании Убы талые воды составляют 47 %, сток дождевых вод – 30 %, грунтовое питание – 23 %. Весеннее половодье в низовьях реки начинается, как правило, в последних числах марта и длится до конца июля - начала августа. Средняя продолжительность половодья - 130 суток. Максимальные расходы половодья колеблются от 1160 м³/с (1965 г.) до 3050 м³/с (1958 г.). Наивысший паводочный расход Убы у г. Шемонаихи был равен 2490 м³/с (19.07.1970 г.).

Эрозионная деятельность в бассейне Убы, по сравнению с бассейном Ульбы, выражена в большей степени. Среднегодовое мутность воды составляет 159 г/м³.

Ледостав в низовьях реки устанавливается примерно в начале второй декады ноября и длится в среднем 140 суток.

Среднегодовые характеристики стока притоков Шульбинского водохранилища и значения ресурсов годового стока расчетной обеспеченности приведены в табл. 1. Расчет обеспеченных водных ресурсов рр. Ульбы и Убы выполнен на основе трехпараметрического гамма-распределения С.Н. Крицкого - М.Ф. Менкеля при соотношении $C_s = 2C_v$. По нашей оценке, суммарный среднегодовое приток в Шульбинское водохранилище составил 880 м³/с. Сток 50 % обеспеченности равен 27,273 км³/г, а 95 % обеспеченности - 19,170 км³/г. 65,4 % суммарного притока составляет приток из Усть-Каменогорского водохранилища, 32 % дает сток Ульбы и Убы и только 2,6 % составляет сток малых притоков на участке между Усть-Каменогорской и Шульбинской ГЭС.

Таблица 1
Водные ресурсы Бухтарминского водохранилища расчетной обеспеченности

Источник водных ресурсов	Площадь бассейна, км ²	Среднегодовое сток		Ресурсы годового стока (км ³), обеспеченного на:			
		м ³ /с	л/(с·км ²)	50 %	75 %	90 %	95 %
р. Иртыш (приток через Усть-Каменогорскую ГЭС)	147000	576	3,92	17,985	16,169	14,534	13,444
р. Аблайкетка	1680	4,56	2,71	0,131	0,102	0,079	0,068
р. Ульба	4990	98,5	19,7	3,013	2,498	2,091	1,870
р. Уба	9850	183	18,6	5,656	4,687	3,948	3,555

Другие реки	15480	18	1,16	0,488	0,329	0,273	0,233
Всего	179000	880	4,91	27,273	23,785	20,925	19,170

Сложный процесс взаимодействия факторов, влияющих на формирование речного стока, обуславливает циклический характер его межгодовых изменений. Ход многолетних колебаний и изменений стока рр. Убы и Ульбы в замыкающих створах показан на рис. 2, а, б. В ходе стока на фоне короткопериодных (2-4 года) колебаний отчетливо проявляется внутривековая цикличность с циклами продолжительностью от 8 до 10 и более лет. Говорить о циклах водности более высоких порядков (вековых и сверхвековых) сложно из-за сравнительно коротких рядов наблюдений за стоком, хотя можно предположить, что, начиная примерно с 1958 г., когда годовые расходы рек были самыми высокими, в ходе стока проявляется нисходящая ветвь векового цикла. Учитывая длительность векового цикла (около 80 лет), можно также предположить, что в ближайшие годы не исключено увеличение водности рек Западного Алтая.

Нисходящий тренд в ходе стока Ульбы прослеживается весьма отчетливо. В ходе стока Убы, особенно после 1974 г., он выражен менее заметно и с некоторым сдвигом, что хорошо видно в ходе разностных интегральных кривых (рис. 2, в, г).

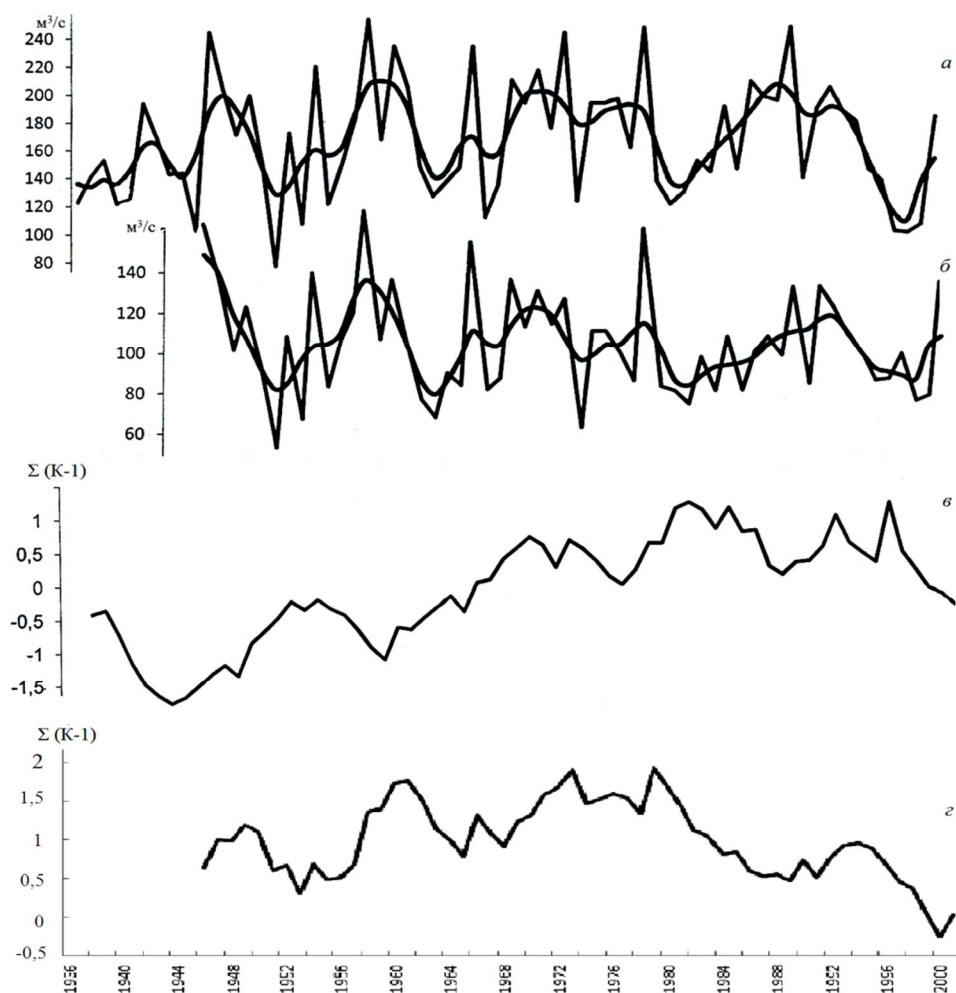


Рисунок 2 - Многолетние колебания и изменения стока р. Убы у г. Шемонаиха (а) и р. Ульба у с. Ульба Перевалочная (б); разностные интегральные кривые годового стока в модульных коэффициентах: р. Уба (в); р. Ульба (г). Условные обозначения: — годовые значения; — сглаженные по скользящим пятилетиям с помощью биномиальных весовых коэффициентов

Самый низкий годовой сток исследуемых рек наблюдался в 1951 г., когда годовые расходы снизились до 47 % на Убе и до 50 % на Ульбе от их среднемноголетнего значения. Низким стоком отмечены также 1945, 1953, 1963, 1981, 1998 и 2000 гг. на Убе. На Ульбе годами минимумов были 1953, 1962, 1963, 1974, 1982, 1999 и 2000 гг.

Цикличность стока притоков водохранилища носит синфазный характер [1, 3]. Определенные различия, помимо влияния местных физико-географических факторов, обусловлены особенностями глобальной атмосферной циркуляции. Более северное положение бассейна Убы способствует преобладающему влиянию на сток циркуляционных процессов типа Е (по Г.Я. Вангенгейму - А.А. Гирсу), в то время как для бассейна Ульбы более значимо влияние циркуляции типа С. Если тип Е способствует повышению атмосферных осадков преимущественно летом, то тип С, наоборот, благоприятствует увеличению зимних осадков.

Водный баланс Шульбинского водохранилища охарактеризован нами в среднем за период 2006-2008 гг. Как видно из таблицы главными элементами баланса является приток и сток через сооружения ГЭС. Остальные его элементы сколь-нибудь существенной роли в структуре водного баланса не играют. Средний за период суммарный приток в водохранилище составил 24,464 км³/г., соответственно сток из водохранилища был равен 24,533 км³/г. Суммарные потери (потери на испарение, фильтрацию) составили 0,236 км³/г. Величина невязки баланса в среднем за год равна минус 0,069 км³ или 0,28 %. При уравнивании баланса она отнесена к боковому притоку в водохранилище как наименее точно определяемому элементу баланса. Исправленный таким образом среднегодовой водный баланс водохранилища представлен в табл. 2.

Таблица 2

Уравненный среднегодовой водный баланс Шульбинского водохранилища за период 2006-2008 гг.

Элементы прихода	км ³	%	Элементы расхода	км ³	%
Приток из водохранилища Усть-Каменогорской ГЭС	16,578	67,6	Сток через ГЭС	24,297	99,0
Боковой приток	7,955	32,4	Суммарные потери	0,236	1,0
Суммарный приток	24,533	100	Суммарный расход	24,533	100
			Изменение объема водохранилища	0	0

Что касается среднемесячных величин элементов водного баланса (табл. 3), то приток через Усть-Каменогорскую ГЭС был относительно равномерным, в среднем около 1,38 км³/мес. Основная доля бокового притока приходится на апрель-май - 4,755 км³, приток в остальные месяцы в среднем был равен 0,313 км³. Повышенный сток из водохранилища также отмечен в апреле-мае - 8,087 км³. В остальные месяцы года сток достаточно равномерный, в среднем 1,645 км³/мес.

Объем Шульбинского водохранилища и емкость его рабочей призмы позволяют работать Шульбинской ГЭС только на боковом притоке. Даже в очень маловодный год 99 % обеспеченности боковой приток в водохранилище составит 4,5 км³/г., что существенно больше его полного объема. Однако падение притока из Усть-Каменогорского водохра-

нилища приведет к падению выработки электроэнергии на ГЭС и к большим негативным и водохозяйственным, и экологическим последствиям ниже по течению Иртыша.

Приток к створам Бухтарминской и Усть-Каменогорской ГЭС формируется в основном за счет стока Черного Иртыша, Курчума и Бухтармы, подверженного циклическим изменениям разной продолжительности и силы. Наблюдавшееся в 70-80-е гг. прошлого столетия маловодье обусловило значительную сработку Бухтарминского водохранилища (с 39,16 км³ в 1972 г. до 14,61 км³ в 1983 г.) [2]. Соответственно на 40 % от «нормы» снизился сток и через Усть-Каменогорскую ГЭС. Все это привело к существенному снижению выработки электроэнергии на Бухтарминской и Усть-Каменогорской ГЭС.

Таблица 3

*Среднемесячные за период 2006-2008 гг. водные балансы
Шульбинского водохранилища, км³*

Элементы водного баланса	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Приток из водохранилища Усть-Каменогорской ГЭС	1,201	1,064	1,103	1,448	1,638	1,340	1,438	1,473	1,473	1,436	1,413	1,551
Боковой приток	0,142	0,103	0,209	2,306	2,449	0,903	0,424	0,295	0,246	0,375	0,273	0,161
Суммарный приток	1,343	1,167	1,312	3,754	4,087	2,243	1,862	1,768	1,719	1,811	1,686	1,712
Сток из водохранилища	1,339	1,121	1,299	4,645	3,407	2,055	1,835	1,755	1,693	1,787	1,665	1,696
Суммарные потери воды	0,013	0,012	0,013	0,016	0,019	0,023	0,027	0,027	0,026	0,023	0,021	0,016
Суммарный расход из водохранилища	1,352	1,133	1,312	4,661	3,426	2,078	1,862	1,782	1,719	1,810	1,686	1,712
Изменение объема водохранилища	0,003	0,003	0	-0,804	0,654	0,165	0	-0,015	0	0	0	0
Невязка баланса	-0,012	0,037	0	-0,103	0,007	0	0	-0,001	0	0,001	0	0
Невязка баланса, %	0,89	3,17	0	2,74	0,17	0	0	0,06	0	0,06	0	0

Доля стока Черного Иртыша в питании Шульбинского водохранилища в средний по водности год достигает 23 %. Однако в последние годы его сток испытывает тенденцию к систематическому снижению. На естественные причины падения стока накладываются и антропогенные факторы. По нашим расчетам [4] после 2000 г. из реки на стороне Китая в разные по водности годы изымается от 1,5 до 3,0 км³ воды. Всего же, по планам Китая, предусматривается изымать из Черного Иртыша 4,35 км³/г., хотя, учитывая острую нехватку водных ресурсов в СУАР, нельзя исключать и практически полного изъятия стока реки на территории КНР.

В случае изъятия из Черного Иртыша 4 км³ воды в год 95 % обеспеченности, его расход в створе с. Буран снизится до 25 м³/с, а учитывая, что сток рек Юго-Западного Алтая изменяется синфазно, то соответственно снизится и суммарный приток к Шульбинскому водохранилищу.

Список литературы

1. Гета Р.И. Колебания водности в бассейне верхнего Иртыша / Р.И. Гета, Г.А. Айтходжаева // Охрана окружающей среды и природопользование Прииртышья: Тез. докл. - Усть-Каменогорск, 1990. - С. 64-65.
2. Гета Р.И. К характеристике водного баланса Бухтарминского водохранилища / Р.И. Гета, В.П. Кондратьев, Г.А. Айтходжаева // Вопросы географии и экологии: сб. науч. тр. - Усть-Каменогорск: ВГИ, 2000. - С. 10-15.
3. Гета Р.И. Сток рек Юго-Западного Алтая и проблема Черного Иртыша / Р.И. Гета, А.Н. Логиновская, В.С. Ревякин // География и природные ресурсы. - 2002. - № 4. - С. 128-130.

4. Гета Р.И. Сток и водные ресурсы Черного Иртыша // Записки Усть-Каменогорского филиала Казахского географического общества. – Усть-Каменогорск, 2011. – Вып. 5. – С. 88–94.
5. Логиновская А.Н. Водные ресурсы Шульбинского водохранилища и их использование / А.Н. Логиновская, Н.Ж. Женсикбаева // Записки Усть-Каменогорского филиала Казахского географического общества. – 2009. – Вып. 2. – С. 67–68.
6. Правила использования водных ресурсов Верхне-Иртышского каскада водохранилищ / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды РК. – Алматы, 2001. – 59 с.
7. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики. – М.: Гидрометеиздат, 1965. – Т. 15. – Вып. 1. – 224 с.
8. Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. – М.: Гидрометеиздат, 1966. – Т. 15. – Вып. 1. – 216 с.
9. Ресурсы поверхностных вод СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – Т. 15. – Вып. 1. – 252 с.
10. Шульбинская ГЭС – история и современность // Энергетика и экспертиза. – 2004. – № 7. – С. 13–14.

Получено 30.10.12

УДК 622.271:622.341

В.Х. Кумыков, Т.М. Кумыкова, А.Д. Дуйсенова
ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

ПОЖАРОБЕЗОПАСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВЫЕМКИ САМОВОЗГОРАЮЩИХСЯ ТИПОВ РУД

Добыча смешанных свинцово-цинковых руд сопряжена с опасностью возникновения очагов эндогенных пожаров. Современное состояние изученности вопроса позволяет сделать вывод о том, что главными факторами, обуславливающими пожароопасность, являются: концентрация сульфидной серы в руде, кислотность (pH) рудничных вод, температурный режим окружающей среды и собственно рудной залежи, типы руд и их текстурно-структурные особенности, наличие тектонической нарушенности массива, гидрогеологическая обстановка участка.

При равенстве влияния факторов определяющим является система разработки и ее параметры. Отбойка блоков многорядными скважинами с отработкой рудной массы сплошными забоями продольными экскаваторными заходками при мощности навала 5-10 м, как показали наблюдения [1], всегда сопровождаются эндогенными пожарами. При этом на основании экспериментальных исследований установлено, что для возникновения пожаров критическое содержание пиритной серы должно составить не менее 21,77 % [1]. С учетом главных классификационных факторов: локализация очагов в границах стратиграфических горизонтов с большим содержанием (более 40 % глобулярного пирита); нахождение указанного типа руд в восстановительной подзоне коры выветривания; приуроченность к зоне тектонических нарушений и интенсивной трещиноватости; высокое содержание сульфидной серы и мощности рудных тел свыше 5 м, согласно инструкции УНИПРОМЕДИ [2], нами произведено геолого-структурное районирование Дальнезападного участка Жайремской группы полиметаллических месторождений (Центральный Казахстан) по степени пожароопасности и составлена технологическая карта распределения типов и сортов руд по эксплуатационным горизонтам.

Технология выемки типов руд, склонных к самовозгоранию, требует выявления основных физических и химических факторов, приводящих к загоранию массы. Натурные наблюдения в зоне карьера № 2, спецотвала забалансовых руд № 11, рудных складов № 7

и № 8 выявили следующие особенности:

- опасность самовозгорания при равенстве прочих условий возрастает при вскрытии горизонтов по рудному телу (9 из 10 случаев);
- самовозгоранию способствует экскаваторная выемка рудной массы сплошным забоем с продольными заходками шириной 10-12 м. Время подготовки горизонтов при этом составляет 4-5 месяцев, что значительно превышает критическое время самовозгорания;
- запасы взорванной рудной массы значительно превышают нормативные по объему, что приводит к удлинению продолжительности их отработки одним экскаватором в среднем в 1,5-2 раза;
- рудные навалы, составленные кусками размером в поперечнике в среднем 10-15 см менее подвержены самовозгоранию, чем навалы, составленные из кусков 1-7 см. По данным [3] площадь окисления в отбитой рудной массе, подверженной самовозгоранию, составляет $480 \text{ м}^2/\text{м}^3$ (в нарушенном массиве уступа $320\text{-}350 \text{ м}^2/\text{м}^3$);
- на рудных складах пожары обусловлены большими скоплениями рудной массы, значительным разрывом во времени (в среднем 9-12 месяцев) между складированием и отгрузкой, преобладанием мелкой фракции 0,5-1,5 см в общей массе кусков (75-80 % по замерам на складе № 8), значительной высотой штабелей (12-15 м, склад № 11) и отсутствием каких-либо профилактических мер.

Руды горят, как правило, во взорванном состоянии при отработке сплошными забоями. Время подготовки горизонтов при данной системе занимает 2-3 месяца. С целью установления критического времени самовозгорания нами проведены исследования на физической модели образцов жайремских руд. Исходя из реальной обстановки в карьере, были заданы следующие условия эксперимента: диапазон начальных температур нагрева образцов - 25, 35, 70, 90, 120 °C; кислотность подаваемой воды $\text{pH}=3$ в количестве 1-4 %; продолжительность опытов при непрерывном нагревании - до 15 суток; количество воздуха на окисление одного образца - 100 мл/мин; градиент температуры $T^\circ=0,82$ град/мин. Анализ отходящих газов на содержание сернистого ангидрида и окиси углерода показал, что в первую очередь в руде окисляются сульфиды, а не углеродсодержащие вещества, как отмечено в работе [4]. Угlistые соединения начинают окисляться при более высоких температурах (около 400 °C), и ход реакции выделения углекислого газа характеризуется плавной кривой. При значениях $T=25$, $T=35$ и $T=70$ °C время начала самовозгорания возрастает. Время до начала самовозгорания смешанных свинцово-цинковых руд, представленных пробами с гор.+ 297м с содержанием общей серы 21,77 % при температуре массива + 25 °C, составляет 10-12 суток. Эти данные хорошо согласуются с практическими данными наблюдений случаев самовозгорания руд в карьере № 2 в летний период при среднесуточной температуре воздуха +25 °C. Руда горит, теряя свои технологические свойства. Как показывают данные практики разработки многосортных руд Жайремского месторождения, для эффективной выемки запасов самовозгорающихся руд хорошо подходит система с поперечными экскаваторными заходками с бурением и взрыванием блоков на полную высоту уступа и подступной выемкой взорванной массы.

Преимущества предлагаемой системы разработки блоков самовозгорающихся руд:

- возможность максимальной интенсификации добычных работ за счет уменьшения объемов подготовки руд к выемке;
- управление качеством на основе регулирования кусковатости рудной массы;
- повышение качества выемки за счет управления параметрами взрыва;
- возможность совмещения во времени работы нескольких добычных экскаваторов за счет исключения процесса проведения разрезной траншеи из цикла подготовки горизон-

тов, при этом 2-3 экскаватора могут быть задействованы на добыче в пределах блока одновременно.

Принцип перехода на подступную выемку отработки пожароопасных руд обоснован на основании экономического критерия, позволяющего оценить преимущества данной технологии по сравнению с применяемой при стабилизации производительности карьера по руде. В общем случае целевая функция будет иметь следующий вид:

$$n(h) = \left\{ \frac{1-\eta}{1-\rho} \left[\sum_{i=1}^m P_i \cdot \alpha_i \cdot \varepsilon_i \cdot \dots_i \right] - a^{(h)} - n_T \cdot b - \frac{V^{(h)}}{D^{(h)}} \cdot (b^{(h)} - b) - d \right\} \rightarrow \max, \quad (1)$$

если производительность карьера по руде и горной массе постоянна, при ограничении по времени отработки запасов блока T_j (мес.), задаваемого неравенством

$$T_j = \left[(B_j / A_{p_j}) + t_{\sigma_j} \cdot B_j \right] \leq \tau.$$

Содержание i -го компонента в товарной руде равно

$$\alpha_i = (B\alpha_{\delta_i} - \Delta P\alpha_{Ti} + \Delta V\alpha_{Pi}) D^{(h)}. \quad (2)$$

Тогда, выразив количество потерянной руды ΔP и примешиваемых пород ΔV в виде

$$(1-\eta)/(1-\rho) = \pi_k, \quad (3)$$

получим выражение целевой функции

$$\pi(h) = \pi_k \left\{ \sum_{i=1}^m [P_i(\alpha_{\delta_i} - \eta\alpha_{Ti}) + \rho\alpha_{Pi}] \right\},$$
$$\pi(h) = \pi_k \left\{ \sum_{i=1}^m [P_i(\alpha_{\delta_i} - \eta\alpha_{Ti}) + \rho\alpha_{Pi}] \cdot \varepsilon_{..i} - [a^{(h)} + n_T b + \frac{V^{(h)}}{D^{(h)}} (b^{(h)} - b) + d] \right\} \rightarrow \max. \quad (4)$$

В формулах (1)-(4) приняты следующие обозначения:

α_{δ_i} - содержание i -го компонента в балансовых запасах, доли ед.;

m - число компонентов в добытой руде;

α_{Ti} - содержание того же компонента или условного металла при добыче многосортных руд в теряемых запасах, доли ед.;

α_{Pi} - то же в примешиваемых породах, доли ед.;

ε_i - извлечение i -го компонента в концентрат, доли ед.;

P_i - оптовая цена i -го компонента, руб/т;

$a^{(h)}$ - себестоимость добычи 1 т руды без погашения вскрыши для рассматриваемой толщины слоя (подступа), руб/т;

n_T - текущий коэффициент вскрыши с учетом потерь руды и его качества;

b - удельные затраты на выемку одного кубометра пустых пород;

$b^{(h)}$ - то же для рассматриваемой толщины слоя;

$V^{(h)}$ - объем пустых пород, удаляемых при вскрытии и подготовке горизонтов зон подступной выемки запасов, м³;

$D^{(h)}$ - количество добываемой товарной руды при подступной выемке, т;

B - количество погашаемых балансовых запасов, т;

d - затраты на транспортирование и обогащение одной тонны товарной руды, руб/т.

Выразив объем блока V_{Bj} через его параметры - длину L_{Bj} , ширину m_j , и задавшись условием, что зона подступной выемки не меньше ширины рабочей площадки b_0 плюс продолжение откоса $h_j \cdot \text{ctg} \alpha$ в границах горизонта, а также учитывая, что система с поперечными экскаваторными заходками не требует проведения разрезной траншеи, получим:

$$T_j = [L_{Bj} \cdot (h_j \cdot \operatorname{ctg} \alpha_j + b_0) \cdot h_j / A_{pj} + t_{\delta j} \cdot B_j] \leq \tau, \quad (5)$$

где A_{pj} - производительность экскаватора по j -му блоку в соизмеримых с объемом блока единицах; τ - пожаробезопасное нахождение руды во взорванном состоянии, месяцы.

Оптимальное значение высоты добычного блока, установленное по критерию максимальной прибыли (1) для условий Жайрема, равно 7,5 м. При такой высоте трудно организовать добычу и осуществить сбойку подступов на полную высоту уступа 12 м при выходе добычных работ в зону пустых пород. Поэтому для удобства целесообразно принять значение подступа кратным высоте уступа - 6 м. Тогда при угле откоса уступа $\alpha = 65^\circ$ ширина выемочного блока в зоне подступной выемки для $b_0 = 32$ м составит 35 м. Часовая производительность экскаватора по рудной массе со среднестатистическим размером куска 20÷40 см составляет 300÷350 м³.

Применение системы разработки с поперечными экскаваторными заходками позволяет интенсифицировать добычные работы, обеспечивающие выемку запасов в нормативный срок за счет оптимизации параметров рудного блока по минимуму нахождения рудной массы во взорванном состоянии.

Система разработки блоков поперечными экскаваторными заходками сокращает время нахождения взорванной массы до полной очистки блока с 1,8 месяца до 0,5 месяца. Это способствует сохранности свойств руды до полной разработки блока и размещения ее на складах по специальной технологии. Таким образом, переход на подступную выемку пожароопасных руд малыми блоками позволяет повысить производительность добычного экскаватора и сократить время отработки уступа.

Выявленные закономерности самовозгорания рудной массы в рамках исследования по данной проблеме позволили разработать ряд технических рекомендаций, направленных на создание принципиально новой технологии добычи и складирования пожароопасных руд [6-8]. При их использовании достигается повышение выхода металла из труднообогатимых и склонных к самовозгоранию свинцово-цинковых руд за счет усреднения качества в процессе добычи.

Сущность предложенного способа заключается в одновременном ведении процесса усреднения и профилактических работ по предупреждению самовозгорания путем включения в состав шихты ингибитора-известняка в сочетании с пожароопасным технологическим сортом руды. Для этого после геолого-технологического картирования рудного поля и выделения сорта, склонного к самовозгоранию, на верхнюю площадку отсыпают слой руды пожаробезопасного технологического сорта в смеси с мелкодробленным до 2 мм известняком. Расчетное количество известняка, необходимое для нейтрализации кислотности среды, удваивают, исходя из фактической концентрации серной кислоты в карьерной воде добычного горизонта. Блок взрывают. Известняк, используемый в качестве ингибитора, распределяется в объеме взорванной рудной массы. После этого полученная шихта отгружается в автосамосвалы и подается в бункер корпуса крупного дробления.

Показатели обогащения руд повышаются на 1-3 % по извлечению и на 1-1,5 % по содержанию металлов в концентратах, т. к. переработка однородного рудопотока позволяет обогащать руды в наиболее оптимальном режиме. При этом прирост извлечения металлов в концентрат: 3,1 % - свинца, 1,3 % - цинка.

Способ защиты штабеля сульфидной руды от самовозгорания [6] включает формирование отвала сульфидных руд, обработку рудной массы известью содержащим реагентом, установку в отвале инъекторов и подачу через них в массив щелочной воды под давлением.

ем. Предварительно основание отвала покрывают слоем глины и крупнокускового известняка. Отвалообразование ведут послойно чередованием руды со слоем измельченного известняка, поверхность отвала покрывают измельченным известняком и через инъекторы в массив подают щелочную воду.

Согласно другому способу [7], за счет принудительного нагнетания в скважины огнетушащего состава достигается стабилизация физико-химических условий, приводящих к эндогенным пожарам. Это обеспечивает применение технологических схем отбойки и экскавации, используемых в карьерах при отработке мономинеральных руд.

Технологический эффект торможения и затухания процессов, приводящих к эндогенным пожарам, по способу [8] достигается за счет послойной отсыпки руд дифференцированно по кусковатости с первоочередной отсыпкой в штабель мелкокусковой фракции, наиболее подверженной окислению и самовозгоранию, до заданной высоты слоя. Торцовые части каждого слоя формируют крупнокусковой фракцией руд того же технологического сорта горизонтальной мощностью не менее величины, определяемой из соотношения $h/\cos\alpha$, где h – критическая толщина слоя, которая обеспечивает теплоизоляцию мелкокусковой части слоя; α – угол откоса штабеля.

На основании термодинамических исследований разработан способ установления склонности к самовозгоранию сульфидных свинцово-цинковых руд [9]. Все разработанные технические решения апробированы в производственных условиях Жайрема (Центральный Казахстан). В рамках исследований доказана их высокая технологичность, экономическая эффективность и реализуемость в сложных горно-геологических условиях разработки полиметаллических месторождений. Этому способствовала комплексность изучения проблемы и многообразие методов обоснования технологических решений.

Список литературы

1. Обосновать параметры системы разработки при селективной добыче технологических типов и склонных к самовозгоранию руд Дальнезападного рудника: Инф. карта / ВНИИцветмет. Руководитель В.Х. Кумыков. – Усть-Каменогорск, 1991.
2. Влияние ряда неорганических веществ на окисление медно-никелевых руд // Г.П. Колпакова, В.Я. Манаков и др. / Тр. ин-та УНИпромедь. – Свердловск, 1976.
3. Ахмеджанов Т.К. Изменение температурного режима в объеме окисляющейся сульфидной руды / Т.К. Ахмеджанов, А.А. Жанбатыров // Повышение безопасности работ и совершенствование проветривания на горнодобывающих предприятиях Казахстана. – Алма-Ата, 1982.
4. Манаков В.Я. Классификация колчеданных и полиметаллических руд по степени склонности к самовозгоранию / Тр. ин-та УНИпромедь. – Свердловск, 1978.
5. Кумыков В.Х. Экспериментальный метод определения пожаробезопасного времени отработки блоков самовозгорающихся руд / В.Х. Кумыков, М.З. Тогузов, Т.М. Кумыкова // Проблемы освоения, разработки и переработки полезных ископаемых на месторождениях Жезказганского региона // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Жезказган, 1997.
6. А.с. 1432247 А1 SU кл. Е 21 F 5/00. Способ защиты штабеля сульфидных руд от самовозгорания / В.Х. Кумыков, Л.М. Лукер и др., Бюл. № 39. – 1988.
7. А.с. 1640445 А 1 SU кл. Е 21 F 5/00. Способ предупреждения и тушения эндогенных пожаров / В.Х. Кумыков, В.А. Шестаков, Т.М. Кумыкова и др., Оpubл. 07.04.91, Бюл. № 13.
8. А.с. 1710776 А 1 SU кл. Е 21 F 5/00. Способ защиты штабеля сульфидных руд от самовозгорания / В.Х. Кумыков, М.З. Тогузов и др. – 1992.
9. Предвар. пат. КЗ (В) (11) 505. Способ установления склонности к самовозгоранию сульфидных свинцово-цинковых руд / В.Х. Кумыков, Т.М. Кумыкова, М.З. Тогузов. – Бюл. № 3. – 1997.

Получено 7.11.12

