



## УТОЧНЕНИЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ УЧАСТКОВ КАНАЛА ПРИ УПРАВЛЕНИИ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ В КАНАЛЕ ИРРИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Абдуллаев Шерали Абдукодир ўгли

Чирчикский Государственный педагогический университет

sheraliabdullayev1995@gmail.com

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7929029>

### Аннотация

Выбор режимов работы участков канала осуществляется из условия, что все боковые водозаборы гарантированно получают плановые расходы водных ресурсов при минимальных потерях воды на фильтрацию и испарение. Боковые отводы гарантированно получают расходы воды в том случае, если у них имеются соответствующие напоры воды перед сооружением. Эти необходимые напоры определяют значения уровней воды на участках канала, которые определяются в процессе водораспределения.

**Keywords:** optimal control, information systems, numerical methods, channels, water distribution, discrete water supply.

### Введение

Рассмотрим постановку задачи расчета режимов работы участков канала для управления водораспределением.

Рассчитанные плановые (лимитированные) расходы в начале участков, водовыпусков и конце канала, должны быть реализованы на каждом участке канала.

Режимы работы участков канала определяются на основе заданных расходов воды боковых отводов и уровня воды в конечных створах участков канала, т.е. уровней воды верхнего бьефа перегораживающих сооружений и эти режимы считаются постоянными в течение декады.

Боковые оттоки и притоки бывают сосредоточенными или распределенными. В качестве сосредоточенных притоков и оттоков рассматриваются боковые водовыпускные сооружения или сосредоточенные притоки, а распределенных оттоков - потери на фильтрацию и испарение.

Боковые притоки и оттоки задаются следующим образом [1]

$$q(x, h) = q_f(x, h) + q_i(x, h) + \sum_{n=1}^N q_n(h_a) \delta(x - a_n), \quad (1)$$

где  $q_f(x, h)$ ,  $q_i(x, h)$  – интенсивности потерь на фильтрации и испарение,  $q_n(h_a)$  – расход воды  $n$ -ного бокового водовыпуска,  $\delta(x - a_n)$  – дельта-функция, характеризующая место расположение отвода водопотребителей по длине канала,  $a_n$  – расстояния до  $n$ -ного бокового водовыпуска.

В качестве начальных условий задается расход и уровень воды на конце участков канала

$$Q(l) = Q_k, \quad h(l) = h_k. \quad (2)$$

В створе канала, где расположены боковые водовыпуски, задаются соответствующие ограничения на уровни воды, которые обеспечивают заданные расходы следующим образом [2]

$$h(a_n) \geq h_{an}^*, \quad n = 1, \dots, N, \quad (3)$$

где  $h_{an}^*$  - значение уровня необходимое для подачи расхода воды на водовыпуск.

Задача определения режимов работы участка канала при наличии подпора с нижнего перегораживающего сооружения сводится к определению такого значения уровня воды в конце участка канала  $h_k$ , которое минимизировало бы потери на фильтрацию и испарение на участке канала. При этом уровни воды в створах канала, где расположены боковые водовыпуски, удовлетворяют ограничениям (1) на напор воды перед водовыпускным сооружением и боковыми водовыпусками.

Для решения сформулированной задачи основным моментом является расчет свободной поверхности воды на участке канала с боковыми водозаборами.

В настоящее время имеются различные методики расчета кривой свободной поверхности неравномерного движения водного потока, основанные на интегрировании дифференциального уравнения неравномерного движения воды в открытых руслах без боковых оттоков и притоков.

Эти методики основаны на использовании графических зависимостей или табличных функции и неприспособлены для применения в современных компьютерах.

В настоящей работе приводится численный алгоритм расчета кривой свободной поверхности неравномерного движения водного потока на открытых руслах с боковыми оттоками и притоками, основанных на интегрировании дифференциального уравнения неравномерного движения воды с помощью конечноразностного метода и метода квазилинеаризации для аппроксимации нелинейных зависимостей [2].

Учитывая, что функции  $P(x, h)$  и  $\omega(x, h)$  являются функциями переменных  $x$  и  $h$ , второе уравнение можно записать так [3]

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial h} \frac{dh}{dx} + \frac{2Q\omega \frac{dQ}{dx} - Q^2 \frac{d\omega}{dx}}{\omega^2 dx} = -g\omega \left( \frac{dz_0}{dx} + \frac{Q|Q|}{K^2} \right) + F. \quad (4)$$

После несложных алгебраических преобразований и, учитывая

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q, \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( P + \frac{Q^2}{\omega} \right) = -g\omega \left( \frac{dz_0}{dx} + \frac{Q|Q|}{K^2} \right) + F, \quad (6)$$

$$\omega(x, h) = \int_0^h B(x, \zeta) d\zeta; \quad P(x, h) = g \int_0^h (h - \zeta) B(x, \zeta) d\zeta; \quad (7)$$

$$F(x, h) = g \int_0^h (h - \zeta) \frac{\partial B(x, \zeta)}{\partial x} d\zeta;$$

где  $Q=Q(x, t)$  – расход воды;  $h=h(x, t)$  – глубина воды;  $B=B(x, h)$  – ширина русла или канала при глубине  $h$ ;  $\omega = \omega(x, h)$  – площадь поперечного сечения при глубине  $h$ ;  $\rho P = \rho P(x, h)$  – сила гидростатического давления воды;  $\rho R = \rho R(x, h)$  – сила реакции стенок, вызванная непрямоугольностью канала или русла;  $K = K(x, h) = \omega C R^{1/2}$  – модуль расхода (задается по

эмпирическим формулам);  $z_0 = z_0(x)$  – отметка дна;  $q = q(x, t, h)$  – боковой приток на единицу длины;  $g$  – ускорение силы тяжести,  $C$  – коэффициент Шези,  $R$  – гидравлический радиус. В дальнейшем следует учесть следующие величины:  $z = z_0 + h$  – отметка свободной поверхности воды;  $v = Q/\omega$  – скорость воды.

получим следующее уравнение [4]

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial h} \frac{dh}{dx} + \frac{2Qq}{\omega} + \frac{Q^2}{\omega^2} \left( \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial h} \frac{dh}{dx} \right) = -g\omega \left( \frac{dz_0}{dx} + \frac{Q|Q|}{K^2} \right) + F. \quad (8)$$

После несложных преобразований окончательно имеем

$$\left( \frac{\partial P}{\partial h} + \frac{Q^2}{\omega^2} \frac{\partial \omega}{\partial h} \right) \frac{dh}{dx} = -g\omega \left( \frac{dz_0}{dx} + \frac{Q|Q|}{K^2} \right) + F - \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{2Qq}{\omega} - \frac{Q^2}{\omega^2} \frac{\partial \omega}{\partial x}. \quad (9)$$

Предположим, что заданы русло канала, расход  $Q$ , глубина воды  $h_n$ , например, в конце канала в сечении  $(N-N)$  и гидравлические параметры участка (рис. 1). Разбиваем участок канала, имеющую длину  $L$ , на отдельные участки относительно малой длины равной  $l_m$ . При этом каждый выделенный участок канала длиной  $l_m$  рассматриваем по отдельности, идя вверх по течению: сперва рассчитываем  $I$  участок, затем  $II$  и т.д. Расчет каждого участка состоит в определении глубины  $h_m$  и расхода  $Q_m$  потока в начале данного участка, по известным величинам  $l_m$  и  $h_{m+1}$ .

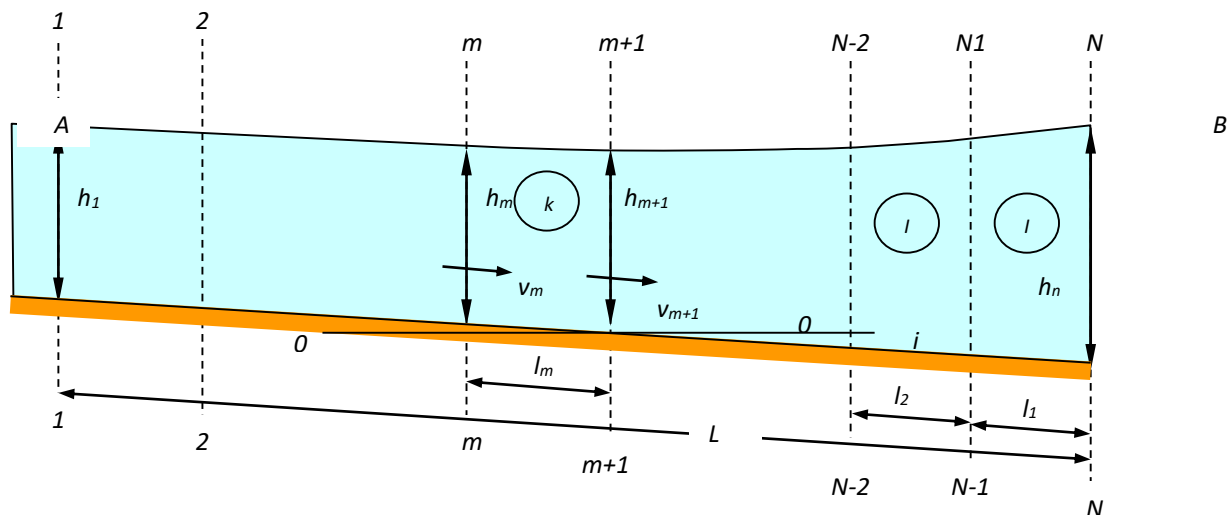


Рис. 1 Схема участка канала

Применяя конечно-разностные методы для уравнений (7) и (9), получим следующие разностные уравнения [5]

$$\frac{Q_{m+1} - Q_m}{l_m} = q_m, \quad (10)$$

$$\left( \frac{\partial P}{\partial h} + \frac{Q^2}{\omega^2} \frac{\partial \omega}{\partial h} \right)_{m+1} \frac{h_{m+1} - h_m}{l_m} = -g\omega_{m+1} \left( \frac{dz_0}{dx} + \frac{Q|Q|}{K^2} \right)_{m+1} + \left[ F - \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{2Qq}{\omega} - \frac{Q^2}{\omega^2} \frac{\partial \omega}{\partial x} \right]_{m+1} \quad (11)$$

Здесь  $(\cdot)_{m+1}$  – означает, что соответствующее выражение вычисляется по известным значениям  $Q_{m+1}$  и  $h_{m+1}$  и соответствует малым участкам с номером  $m+1$ .

Расчет ведется с конечного участка канала к началу, т. е. неизвестными величинами являются  $Q_m$  и  $h_m$ , которые рассчитываются по формулам (12) и (13), т.е. рекуррентно определяются расход  $Q_m$  и глубина  $h_m$  на граничных сечениях  $(N-1), (N-1), \dots, (2), (1)$ . [6]

$$Q_m = Q_{m+1} + q_m l_m, \quad (12)$$

$$h_m = h_{m+1} + \frac{\left( -g\omega_{m+1} \left( \frac{dz_0}{dx} + \frac{Q|Q|}{\bar{K}^2} \right)_{m+1} + \left( F - \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{2Qq}{\omega} - \frac{Q^2}{\omega^2} \frac{\partial \omega}{\partial x} \right)_{m+1} \right)}{\left( \frac{\partial P}{\partial h} + \frac{Q^2}{\omega^2} \frac{\partial \omega}{\partial h} \right)_{m+1}} l_m, \quad (13)$$

где  $(\cdot)_m$  и  $(\cdot)_{m+1}$  – параметры для сечения  $m$  и  $m+1$ ,  $l_m$  – шаг по длине.

Для призматического русла канала без бокового притока уравнение имеет следующий вид [7]

$$h_m = h_{m+1} + \frac{\left( i - \frac{Q|Q|}{\bar{K}^2} \right)_{m+1}}{\left( 1 - \frac{Q^2}{g \omega^3} B \right)_{m+1}} l_m. \quad (14)$$

Основной эмпирической переменной в зависимостях (13) и (14) является модуль расхода участка канала. В численных расчетах для вычисления свободной поверхности водного потока используется приближенная формула [8]

$$\bar{K} = \frac{1}{2} (K(x_{m+1}, h_{m+1}) + K(x_{m+1}, h_{m+1} + l_m K(x_{m+1}, h_{m+1}))). \quad (15)$$

Вычисления на компьютере по выражениям (13), (14) нами реализованы в виде программных модулей для расчета кривой свободной поверхности водного потока.

Имея алгоритм определения режимов с разными значениями уровня воды на конце участка канала при известных значениях расходов воды на конце и боковых водопотребителей, рассчитываем кривые свободной поверхности водного потока для соответствующих значений уровней. Далее по кривой свободной поверхности проверяются условия выполнения ограничения на напор перед водовыпусками и выбирается такое значение уровня воды на конце канала, при котором выполнялись бы все ограничения на напоры водовыпусков и были минимальными значения суммарной потери на испарение и фильтрацию на участке канала.

Нами были определены режимы работы первого участка канала. В табл. 1 приведены гидравлические параметры участка канала, при котором были проведены расчеты режимов работы. В табл. 2 приведены результаты расчета режимов работы участка канала, в которой приведены основные расчетные режимы работы канала при трех значениях уровня воды на конце канала. На рис. 2 приведены кривые свободной поверхности воды на участке канала для режима – 1 и режима – 2. Из рис. 2 видны для кривая свободной поверхности воды режима – 2 не покрывает все ограничения (3) для боковых водопотребителей участка, т.е. четыре водозабора на данном участке при

данном режиме не могут получить свои лимитированные воды. Уровень воды перед этим водовыпуском меньше, чем их допустимые значения и они показаны в таблице темным цветом.

На рис. 3 приведен расчет объемов и потерь воды на участке канала при различных уровнях режимах работы канала и показана область неудовлетворяющая условиям ограничения уровней воды боковых водовыпусков.

В режимах 1 и 3 таблица данных кривой свободной поверхности воды покрывает все допустимые значения уровней воды, т.е. удовлетворяет ограничениям (3), но в режиме 3 потери больше, чем в режиме 1, поэтому приемлемым режимом работы является режим 1. Полученные уровневые режимы канала поддерживаются с помощью систем автоматического регулирования уровней воды и централизованного контроля и управления [4].

Гидравлические параметры участка канала

Таблица 1

| b  | m | n    | y   | i                | g   | I     | K <sub>у</sub> |
|----|---|------|-----|------------------|-----|-------|----------------|
| 25 | 3 | 0,02 | 0,2 | 0,00007          | 9,8 | 30000 | 1              |
| m  |   |      |     | m/c <sup>2</sup> | m   |       |                |

Расчет режимов работы участка канала

| Расстояние до отсоса | Наименование отсоса | Боковой проток | Ограничения на уровни | Режим - 1        |                                |              |                   | Режим - 2        |                                |              |                   | Режим - 3        |                                |              |                   |
|----------------------|---------------------|----------------|-----------------------|------------------|--------------------------------|--------------|-------------------|------------------|--------------------------------|--------------|-------------------|------------------|--------------------------------|--------------|-------------------|
|                      |                     |                |                       | Расход воды      | Ордината свободной поверхности | Уровень воды | Потери на участке | Расход воды      | Ордината свободной поверхности | Уровень воды | Потери на участке | Расход воды      | Ордината свободной поверхности | Уровень воды | Потери на участке |
| m                    |                     | m/c            | m                     | m/c              | m                              | m            | m/c               | m/c              | m                              | m            | m/c               | m/c              | m                              | m            | m/c               |
| 0                    |                     | 0,00           |                       | 74,52            | 4,80                           | 2,67         | 0,000             | 74,52            | 4,52                           | 2,37         | 0,000             | 74,58            | 4,52                           | 2,82         | 0,019             |
| 1200                 | 1                   | 2,41           | 2,35                  | 72,03            | 4,74                           | 2,70         | 0,094             | 74,41            | 4,50                           | 2,38         | 0,089             | 72,09            | 4,50                           | 2,85         | 0,096             |
| 1800                 | 2                   | 3,20           | 2,40                  | 68,80            | 4,71                           | 2,71         | 0,038             | 71,93            | 4,44                           | 2,40         | 0,036             | 68,85            | 4,44                           | 2,86         | 0,039             |
| 2700                 | 3                   | 1,78           | 2,50                  | 65,66            | 4,67                           | 2,74         | 0,057             | 68,69            | 4,41                           | 2,41         | 0,054             | 65,71            | 4,41                           | 2,89         | 0,058             |
| 5100                 | 4                   | 0,18           | 2,65                  | 65,33            | 4,59                           | 2,82         | 0,152             | 65,56            | 4,37                           | 2,43         | 0,144             | 65,38            | 4,37                           | 2,98         | 0,156             |
| 6900                 | 5                   | 2,18           | 2,68                  | 63,03            | 4,52                           | 2,88         | 0,116             | 65,23            | 4,27                           | 2,51         | 0,110             | 63,08            | 4,27                           | 3,04         | 0,119             |
| 9900                 | 6                   | 1,49           | 2,60                  | 61,35            | 4,43                           | 3,00         | 0,196             | 62,94            | 4,20                           | 2,57         | 0,185             | 61,39            | 4,20                           | 3,17         | 0,201             |
| 12000                | 7                   | 0,61           | 2,70                  | 60,60            | 4,37                           | 3,09         | 0,139             | 61,27            | 4,10                           | 2,67         | 0,132             | 60,63            | 4,10                           | 3,26         | 0,143             |
| 14100                | 8                   | 1,30           | 2,72                  | 59,16            | 4,31                           | 3,18         | 0,141             | 60,52            | 4,03                           | 2,75         | 0,134             | 59,19            | 4,03                           | 3,36         | 0,145             |
| 16200                | 9                   | 0,61           | 2,72                  | 58,40            | 4,26                           | 3,28         | 0,143             | 59,09            | 3,97                           | 2,83         | 0,136             | 58,43            | 3,97                           | 3,46         | 0,147             |
| 18000                | 10                  | 1,20           | 2,74                  | 57,04            | 4,21                           | 3,39         | 0,167             | 58,35            | 3,91                           | 2,92         | 0,157             | 57,06            | 3,91                           | 3,57         | 0,171             |
| 21000                | 11                  | 1,40           | 2,78                  | 55,47            | 4,16                           | 3,51         | 0,170             | 56,99            | 3,85                           | 3,03         | 0,160             | 55,48            | 3,85                           | 3,70         | 0,174             |
| 26400                | 12                  | 3,40           | 3,00                  | 51,67            | 4,07                           | 3,80         | 0,394             | 51,66            | 3,68                           | 3,40         | 0,371             | 51,68            | 3,68                           | 3,99         | 0,405             |
| 28800                | 13                  | 1,40           | 3,10                  | 50,09            | 4,04                           | 3,93         | 0,180             | 50,09            | 3,64                           | 3,53         | 0,170             | 50,09            | 3,64                           | 4,13         | 0,185             |
| 30000                |                     | 0,00           |                       | 50,00            | 4,02                           | 4,00         | 0,091             | 50,00            | 3,62                           | 3,60         | 0,086             | 50,00            | 3,62                           | 4,20         | 0,094             |
| Водосбор             |                     |                |                       | Суммарные потери |                                |              |                   | Суммарные потери |                                |              |                   | Суммарные потери |                                |              |                   |
|                      |                     |                |                       | 21,16            |                                |              |                   | 2,08             |                                |              |                   | 2,15             |                                |              |                   |

Таблица 2

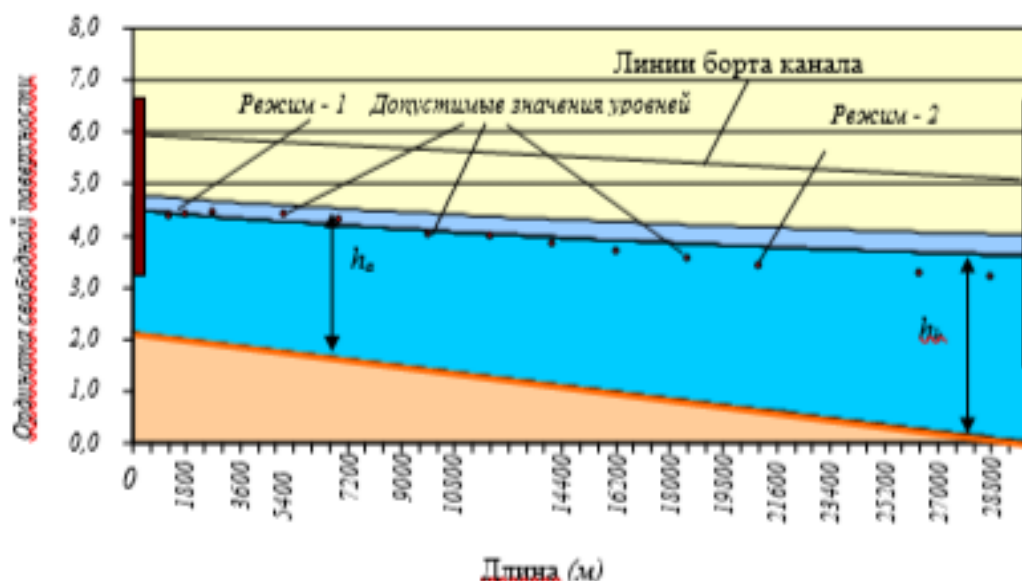


Рис. 2. Кривые свободной поверхности при различных уровневых режимах на участке канала

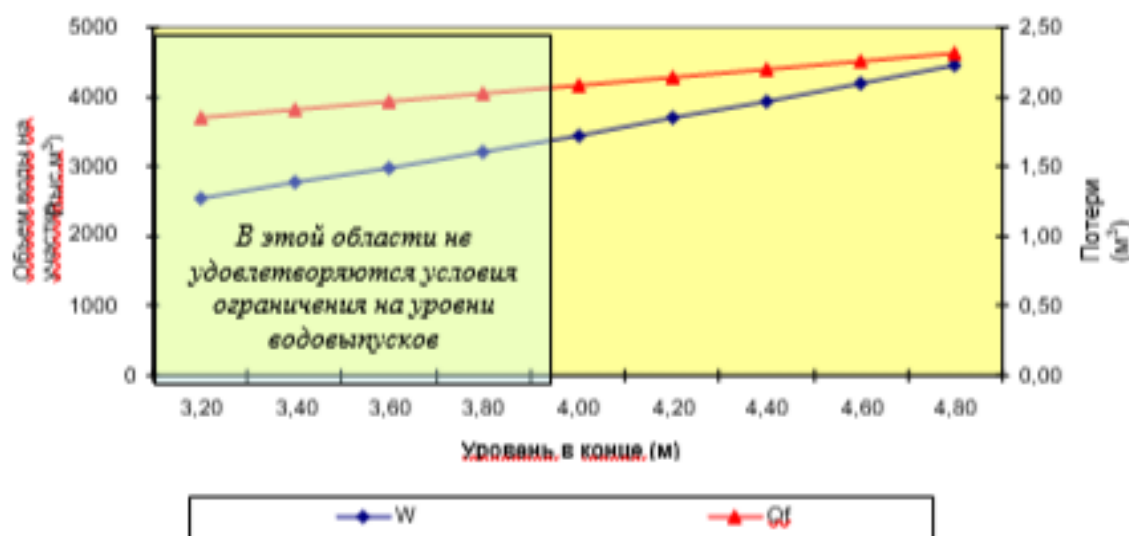


Рис. 3. Расчет объемов и потерь воды на участке канала

Разработанный алгоритм позволяет рассчитать кривую свободной поверхности водного потока на непрямоугольных руслах и имеет очень хорошую сходимость, так как он построен на основе физического смысла движения потока. Точность вычисления зависит от шага по длине  $l_m$ . На основе численного эксперимента по программе расчета свободной поверхности потока по выше указанным формулам при различных шагах  $l_m$  и, исследуя, точность полученных результатов при различных шагах вычисления, для рассмотренного на примере участка канала при длине шага  $l_m = 300$  м получена точность результатов, удовлетворяющая практику расчета гидравлических зависимостей.

На основе решения задачи определения режимов работы участков канала при оперативном планировании водораспределения на магистральном канале рассчитывается, следующая последовательность для всех участков магистрального канала

$$\Omega_M^{B3} = \{m, Q_{mn}^{3H}, Q_{mn}^{3K}, Q_{Bmn}^3, Q_{Пmn}^3, Q_{OBmn}^3, q_{ДПmn}^3, h_{mn}^{k3}, W_{mn}^3, Q_{pmn}^3\} \quad \forall m \in M, \forall n \in N_B. \quad (16)$$

Здесь  $Q_{mn}^{3H}$ ,  $Q_{mn}^{3K}$  – расход воды в начале и конце участка реализующие заявки потребителей участка,  $Q_{Bmn}^3$ ,  $Q_{Пmn}^3$  – суммарные расходы воды по заявкам для водозаборов и притоков,  $h_{mn}^{k3}$ ,  $W_{mn}^3$  и  $Q_{pmn}^3$  – уровень воды установленная на конце участка канала, объем воды на участке канала и потери водных ресурсов на участке канала,  $Q_{OBmn}^3$ ,  $q_{ДПmn}^3$  – суммарные расходы воды по заявкам на орошения и других потребителей на участке  $m$  для декады  $n$  вегетационного периода.

Таким образом, разработанный алгоритм вычисления расходов воды по участкам магистрального канала позволяет определять режимы работы узловых сооружений и водозаборов из условий обеспечения лимитов водозаборов, при этом будут снижены организационные потери водных ресурсов и обеспечена равномерность распределения водных ресурсов по всем водозаборам.

### Использованная литература:

1. Rakhimov, S., Seytov, A., Nazarov, B., Buvabekov, B., Optimal control of unstable water movement in channels of irrigation systems under conditions of discontinuity of water delivery to consumers. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 883 (2020) 012065, Dagestan, 2020, IOP Publishing DOI:10.1088/1757-899X/883/1/012065 (№5, Scopus, IF=4,652)
2. A. Kabulov, I. Normatov, A. Seytov and A. Kudaybergenov, "Optimal Management of Water Resources in Large Main Canals with Cascade Pumping Stations," 2020 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS), Vancouver, BC, Canada, 2020, pp. 1-4, DOI: 10.1109/IEMTRONICS51293.2020.9216402 (№ 5, Scopus, IF= 9.936).
3. A.V. Kabulov, A.J. Seytov, A.A. Kudaybergenov, Classification of mathematical models of unsteady water movement in the main canals of irrigation systems, International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology Vol. 7, Issue 4, April 2020, ISSN: 2350-0328, India, pp. 13392- 13401. (№ 5, Web of science, IF=3,98)
4. Abdullayev, S. A. (2021). Modern technologies of studying mathematics in the higher educational institution as a means of motivation of students' educational activity. International scientific-practical conference THE 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON XXI CENTURY SKILLS IN LANGUAGE TEACHING AND LEARNING April 9, 2021, 1(1), 36-39
5. Abdullayev, S. A., Aktamov, F., & Raupova, M. (2021). "FUNKSIYA XOSILASI" MAVZUSINI O'RGANISHDA KLASSTER MODELIDAN FOYDALANISH METODIKASI. Academic research in educational sciences, 2(CSPI conference 3), 420-424.