

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ В КРУПНЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ КАНАЛАХ С КАСКАДАМИ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ

**Хайдарова Р.Д.¹, Омонов Ғ.², Абдурахманов Р. С.³ Шониёзов Ш.А.⁴, Авезова
М. Б.⁵**

¹Термизский государственный университет, Термиз

^{2,3,4,5}Исследователь

АННОТАЦИЯ

В статье разработаны математических моделей неустановившегося движения воды в крупных магистральных каналах с каскадами насосных станций, учитывающих современные режимы эксплуатации режимы работы насосных станций и других крупных магистральных каналов между насосными станциями каскада Каршинского магистрального канала

Для достижения указанной цели решены задачи определения современных режимов эксплуатации объектов каскада насосных станций Каршинского магистрального канала, разработки математических моделей оптимального управления каналов между насосными станциями, современных режимов работы насосных станций каскада Каршинского магистрального канала, современных режимов эксплуатации каналов между насосных станций каскада Каршинского магистрального канала.

Ключевые слова: *математическая модель, нестационарное течение воды, магистральные каналы, задачи оптимального управления, фундаментальное решение, дифференциальные уравнения, гидротехнические сооружения.*

ABSTRACT

The article develops mathematical models of unsteady water movement in large main canals with cascades of pumping stations, taking into account modern operating modes, operating modes of pumping stations and other large main canals between pumping stations of the Karshi main canal cascade

To achieve this goal, the tasks of determining the modern modes of operation of the facilities of the cascade of pumping stations of the Karshi main canal, developing mathematical models for optimal control of channels between pumping stations, modern modes of operation of pumping stations of the cascade of the Karshi main canal, modern modes of operation of channels between pumping stations of the cascade of the Karshi main canal were solved.

***Keywords:** mathematical model, unsteady flow of water, main canals, optimal control problems, fundamental solution, differential equations, hydraulic structures.*

ВВЕДЕНИЕ

В мире уделяется большое внимание на разработку критериев, математических моделей, методов и алгоритмов оптимального управления водными ресурсами магистральных каналов и других водохозяйственных объектов, с использованием современных информационных систем. В этом направлении также и в других странах мира, где развита водное хозяйство и ирригация, одной из необходимых задач является разработка оптимального управления водными крупными магистральных каналов с каскадами насосных станций, которое осуществлено на примере Каршинского магистрального канала с каскадом насосных станций. Это осуществлено на основе критериев и методов оптимального управления, математических моделей и алгоритмов, обеспечивающих экономию водных ресурсов.

При решении поставленных задач исследований использовались методы теории оптимального управления сложными системами, разработки математических моделей и их моделирования в современных условиях эксплуатации.

Поэтому решение проблемы доставки воды к потребителям в настоящее время является востребованной и ее актуальность заключается в повышении надёжности и точности водообеспеченности за счет оптимального управления распределением воды в каналах ирригационных систем по заданным критериям, что обеспечит уменьшение непроизводительных потерь водных ресурсов в каналах, что имеет большое народнохозяйственное значение для республики.

Развитие компьютеризации во всем мире, а в последние годы в государствах Центральной Азии, дает возможность использования ее для моделирования и управления водными ресурсами во всех водохозяйственных системах и объектах, к которым относятся участки рек, водохранилища и каналы (самотечные и с системами машинного водоподъема). Используя компьютер, можно имитировать поведение отдельных водохозяйственных объектов, их взаимодействие с учетом всех влияющих факторов в условиях близких к реальным, в процессе их функционирования.

Водохозяйственные системы и объекты имеют большую пространственную протяженность, множество технологических и технических

параметров, только методами математического моделирования можно получить количественные и качественные изменения их характеристик.

В настоящее время отсутствует единый системный подход к вопросу моделирования динамики водохозяйственных объектов, только существует широкий класс различных по степени сложности математических моделей отдельных объектов, поэтому выбор математических моделей, которые будут с требуемой степенью точности описывать сложные процессы водоподачи и водораспределения в водохозяйственных системах и объектах является задачей весьма проблематичной.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Результаты исследования современные режимы эксплуатации объектов каскада насосных станций Каршинского магистрального канала; математические модели оптимального управления каналов между насосными станциями; современные режимы работы насосных станций каскада Каршинского магистрального канала и результаты анализа региональных условий эксплуатации основных сооружений насосных станций; математические модели оптимального управления современных режимов эксплуатации каналов между насосных станций каскада Каршинского магистрального канала.

1. Канал от НС-1 начинается с ПК-204+57 и доходит до НС-2 (ПК-411+19) длиной 20,7 км. В правом берегу канала имеется 18 водозаборов, из которых забирается $4,65\text{ m}^3/\text{s}$ воды, в левом берегу имеется 7 водозаборов, из которых забирается $4,8\text{ m}^3/\text{s}$, всего 25 водозаборов на расход $9,45\text{ m}^3/\text{s}$. Схема канала приведена на рис. 1.

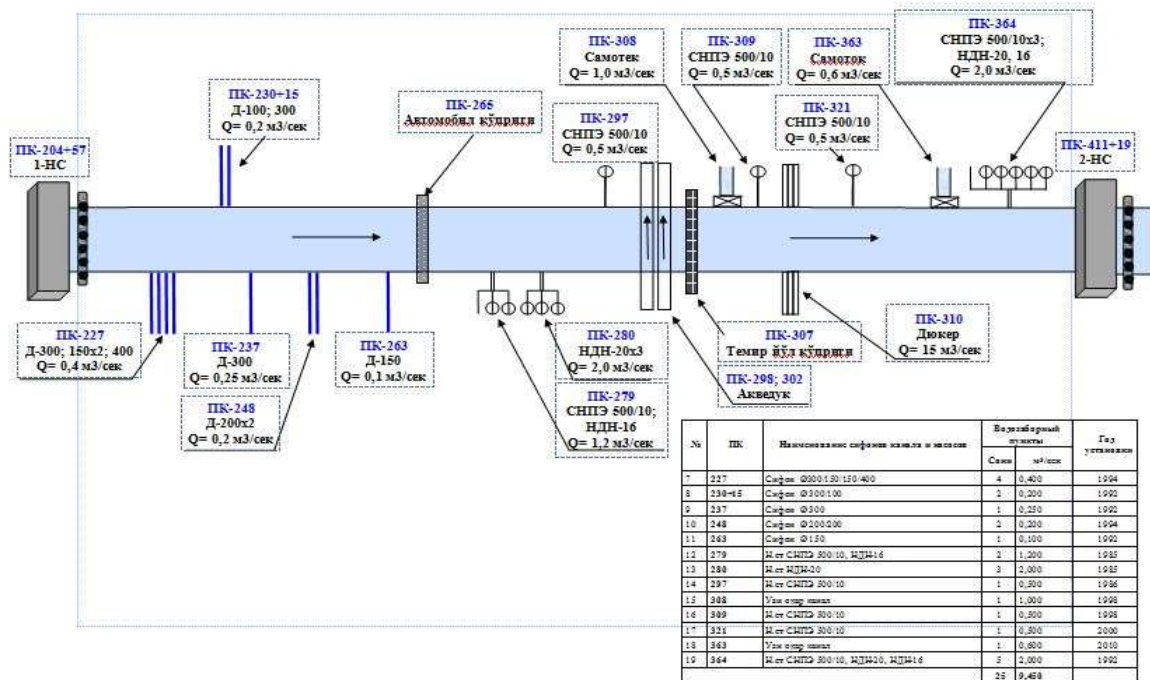


Рис.1. Схема бетонного канала между НС-1 и НС-2

2. Канал от НС-2 начинается с ПК-411+19 и доходит до НС-3 (ПК-424+95) длиной 1,4km. На этом участке канала на правом берегу имеется только один водозабор величиной $7 \text{ m}^3/\text{s}$ в канал Дружба. Схема канала приведена на рис. 2.

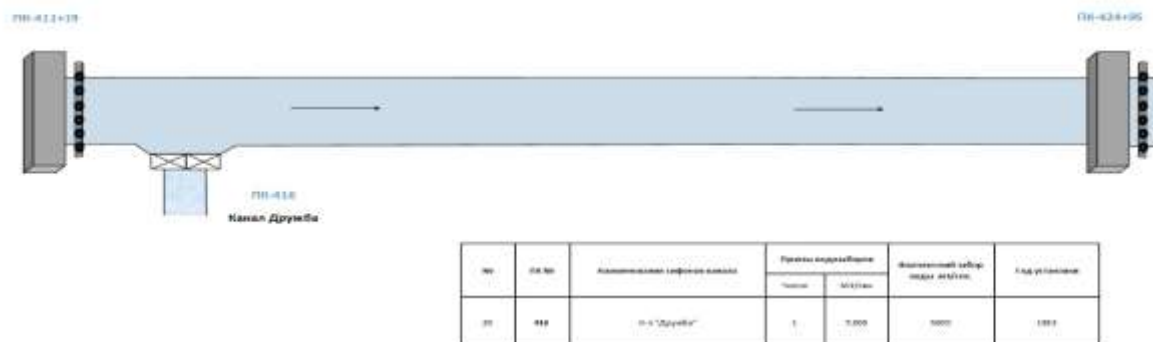


Рис.2. Схема бетонного канала между НС-2 и НС-3.

3. Канал от НС-3 начинается с ПК-424+95 и доходит до НС-4 (ПК-624+95) длиной 20,0km . В правом берегу канала имеется 6 водозаборов, из которых забирается 2,45m³/s воды, в левом берегу имеется 24 водозабора, из которых забирается 6,9m³/s воды, всего 30 водозаборов на расход 9,35m³/s . Схема канала приведена на рис. 3.

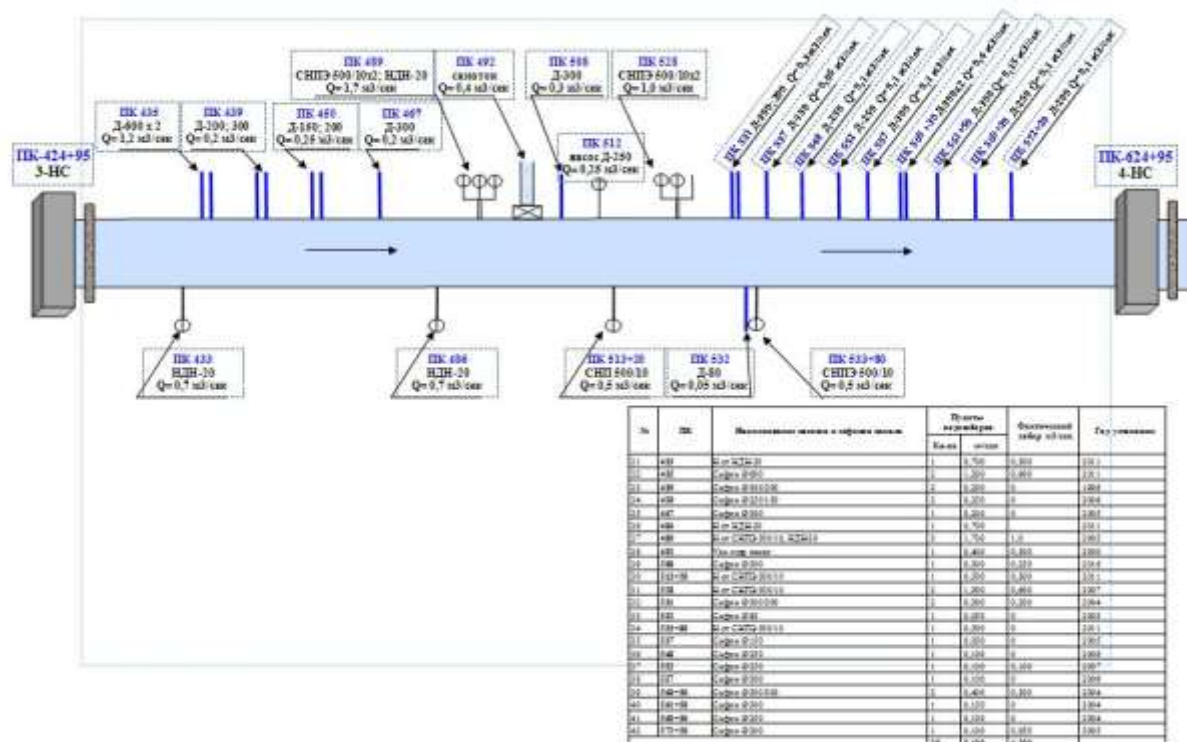


Рис.3. Схема бетонного канала между НС-3 и НС-4

4. Канал от НС-4 начинается с ПК 624+95 и доходит до НС-5 (ПК-677+23) длиной 4,7km . В правом берегу канала имеется 8 водозаборов, из которых забирается 1,1m³/s воды, в левом берегу имеется 9 водозаборов, из которых забирается 1,7m³/s воды, всего 17 водозаборов на расход 2,8m³/s . На этом участке канала расположен водозабор в канал Миришкор с расходом 100m³/s . Схема канала приведена на рис. 4.

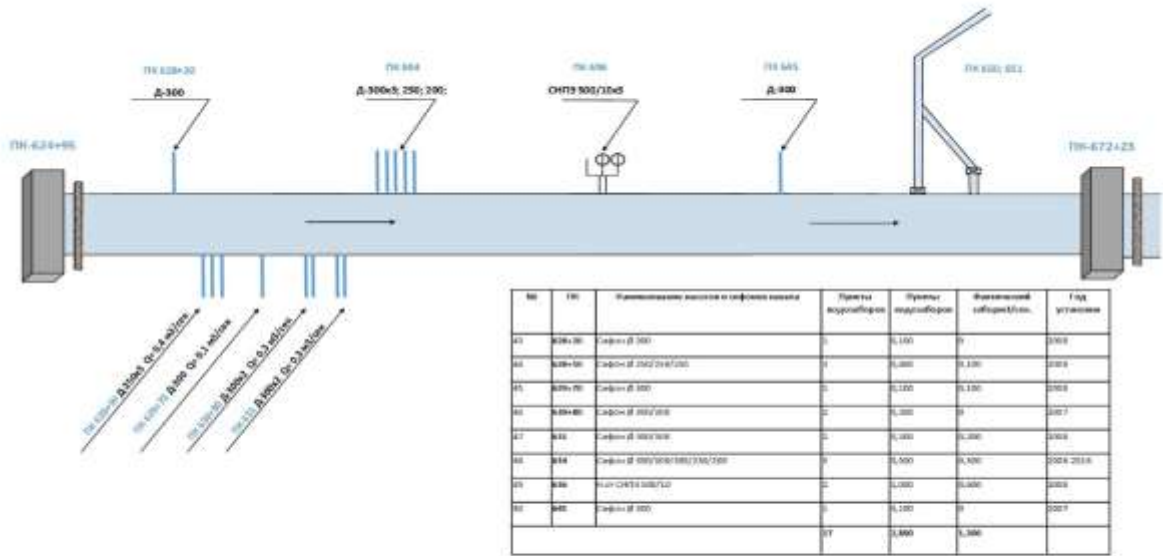


Рис. 4. Схема бетонного канала между НС- 4 и НС – 5.

5. Канал от НС-5 начинается с ПК-672-23 и доходит до НС-6 (ПК-756+23) длиной 8,4km . В правом берегу канала имеется 6 водозаборов, из которых забирается $6,7\text{ m}^3/\text{s}$ воды, в левом берегу имеется 2 водозабора, из которых забирается $1,25\text{ m}^3/\text{s}$ воды, всего 8 водозаборов на расход $7,95\text{ m}^3/\text{s}$. Схема канала приведена на рис. 5.

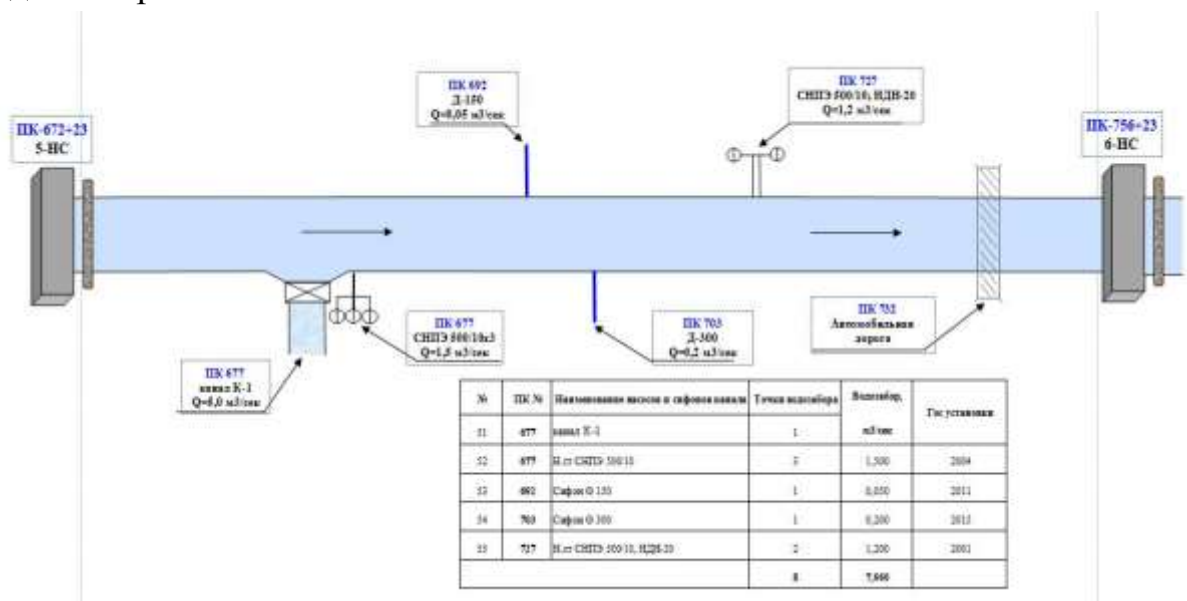


Рис. 5. Схема бетонного канала между НС -5 и НС – 6.

Состояние каналов между НС каскада КМК характеризуется неустановившимся движением воды и описывается системой дифференциальных уравнений Сен-Венана в форме законов сохранения энергии [1,2,3].

$$\begin{aligned}
 B_i \frac{\partial z_i}{\partial t} + \frac{\partial Q_i}{\partial x_i} &= q_i, \\
 \frac{1}{g \omega_i} \left(\frac{\partial Q_i}{\partial t} + 2v \frac{\partial Q_i}{\partial x_i} \right) + \left[1 - \left(\frac{v_i}{c_i} \right)^2 \right] \frac{\partial z_i}{\partial x_i} &= \\
 = \left[i_i + \frac{1}{B_i} \left(\frac{\partial \omega_i}{\partial x_i} \right)_{h_i = \text{const}} \right] \left(\frac{v_i}{c_i} \right)^2 - \frac{Q_i |Q_i|}{K_i^2} & \\
 i = \overline{1,10}, \quad 0 < x_i < l_i, \quad t > t_0 &
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь $v_i = \frac{Q_i}{\omega_i}$, $c_i = \sqrt{\frac{g \omega_i}{B_i}}$; $Q_i = Q_i(x_i, t)$ - расход воды; $z_i = z_i(x_i, t)$ - ордината свободной поверхности; g - гравитационная постоянная; i_i - уклон дна; ω_i - ширина потока по поверхности живого сечения; $\omega_i = \omega_i(z_i)$ - площадь живого сечения потока; $c_i = c_i(z_i)$ - скорость распространения малых волн; $q_i = q_i(x_i, t)$ - боковые оттоки участков канала; $K_i = K_i(z_i)$ - модуль расхода.

Водозаборы на участках каналов являются сосредоточенными оттоками в точках водозабора.

Путевой отток для участков канала записывается следующим образом:

$$\begin{aligned}
 q_i(x_i, t) &= 0 \quad \text{при } i = \overline{1, N} \\
 q_2(x_2, t) &= f_1(z_2(a_1, t), z_d(t), s_1(t)) \delta(x_2 - a_1) \\
 q_3(x_3, t) &= f_2(z_3(a_2, t), z_m(t), s_2(t)) \delta(x_3 - a_2)
 \end{aligned} \tag{2}$$

.....
 где $\delta(x)$ - дельта-функция Дирака; f_1, f_2 - интенсивность водного потока, поступающая в каналы Дустлик и Миришкор; z_d, z_m - ординаты свободной поверхности водного потока нижею бьефа головного сооружения этих каналов; s_1, s_2 - площади открытых отверстий затворов головных сооружений каналов; α_1, α_2 - расстояния от начала участка канала до головных сооружений.

Функции ω_k , B_k и $z_{ок}$ определяются из морфометрических характеристик участков канала и зависят от x и z .

Дифференциальные уравнения в частных производных гиперболического типа в системе (1) есть уравнения сохранения массы и импульса потока и представляют собой математическую модель неустановившегося движения воды каналов между насосными станциями каскада Каршинского магистрального канала

В качестве функций, определяющих течение, потока воды здесь выбраны расход воды $Q_i(x_i, t)$ и ордината свободной поверхности $z_i(x_i, t)$. Независимыми переменными являются продольная координата x_i и время t . Русло канала задаётся ординатой дна $z_{0i}(x_i)$ и шириной его поперечного сечения $B_i(x_i, t)$ на расстоянии z_i (по вертикали) от дна русла.

Тогда:

- глубина потока: $h_i(x_i, t) = z_i(x_i, t) - z_{0i}(x_i)$;

- площадь поперечного сечения потока: $\omega_i(x_i, h_i) = \int_0^{h_i} B_i(x_i, z_i) dz_i$;

- средняя скорость течения: $v_i = \frac{Q_i}{\omega_i}$;

- скорость распространения малых волн: $c_i = \sqrt{\frac{g\omega_i}{B_i}}$;

- уклон дна: $i_i = -\frac{dz_{0i}}{dx_i}$; $i = \overline{1,5}$

Модуль расхода $K_i(x_i, z_i)$ характеризует величину сил трения и определяется по формуле

$$K_i = \omega_i \cdot C_i \sqrt{R_i}, \quad (3)$$

где R_i - гидравлический радиус русла; ω_i - площадь живого сечения русла; C_i - коэффициент Шези.

Для определения коэффициента Шези существует целая серия эмпирических формул. В качестве одной из них может быть принята известная формула Павловского

$$C_i = \frac{1}{n_i} R_i^{y_i}, \quad y_i = 2,5\sqrt{n_i} - 0,13 - 0,75\sqrt{R_i}(\sqrt{n_i} - 0,1), \quad (4)$$

где n - коэффициент шероховатости дна каналов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Расчёты отдельных задач оптимального управления режимами эксплуатации каналов и каскада насосных станций Каршинского магистрального канала проведены с использованием данного разработанного программного комплекса на языке Python.

1. Участок **Каршинского магистрального канала между 1-насосной станций и 2-насосной станций**. Длина канала – 20,7 км, ширина дна – 7 м, коэффициент шероховости – 0,0170, коэффициент откоса - 3, уклон – 0,00015.

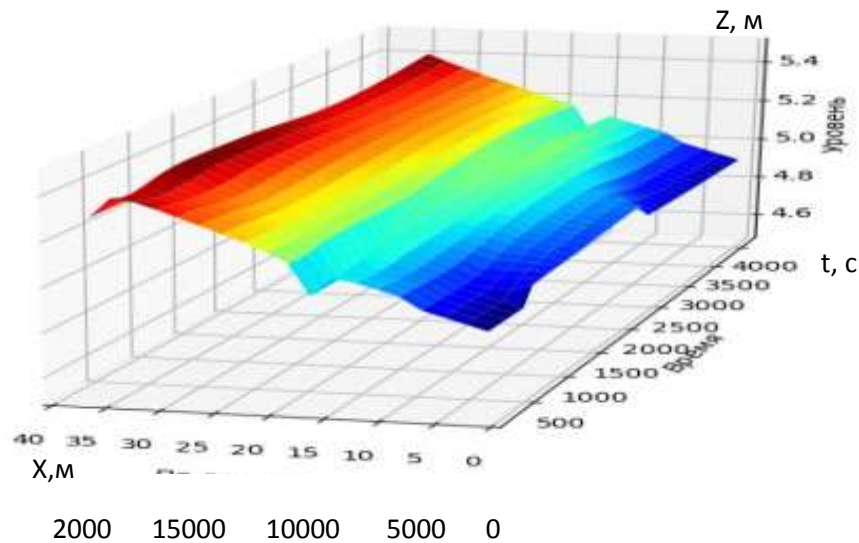


Рис. 6. Изменение уровня воды во времени и по длине участка Каршинского магистрального канала между 1-насосной станций и 2-насосной станций

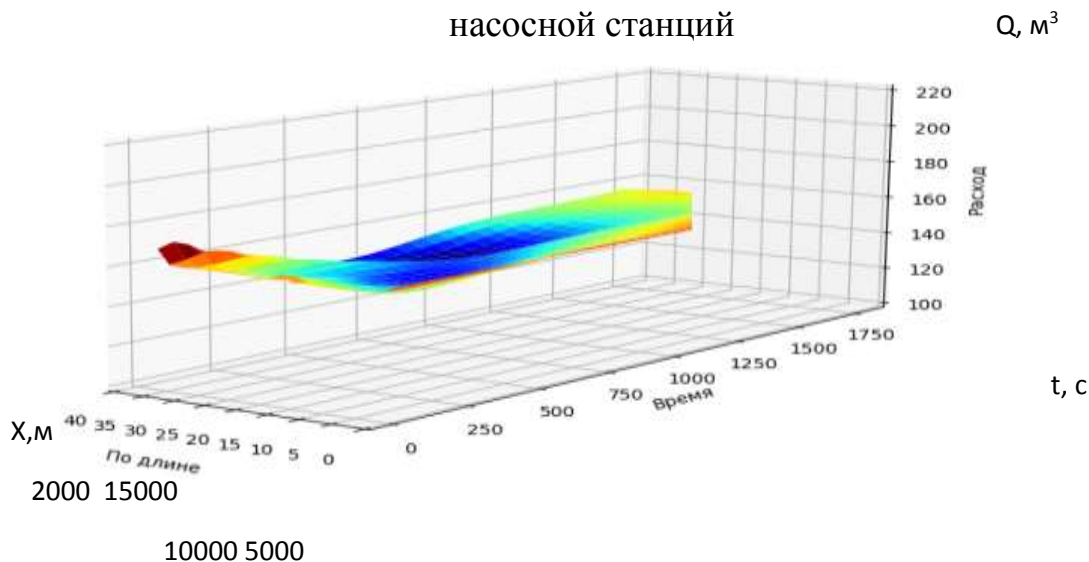


Рис.7. Изменение расхода воды во времени и по длине участка Каршинского магистрального канала между 1-насосной станций и 2-насосной станций.

На рис. 6, 7, приведены результаты численных экспериментов по определению изменения уровня и расхода воды на участке **Каршинского магистрального канала между 1-насосной станций и 2-насосной станций**.

Из рисунков видно, что, после пуска насосных агрегатов 1-насосной станций увеличенный расход в начале участка канала позволяет повысить уровень воды по длине указанного участка канала между 1-насосной станций и 2-насосной станций. В течение $t = 24615s$ ($6,84h$) уровень воды в конце участка канала увеличивается на 1,6 м.

Полученные результаты численных экспериментов показывают, что уровень и расход воды в конце участка канала стабилизируется, что необходимо для находящегося там НС-2.

2. Участок Каршинского магистрального канала между 2-насосной станций и 3-насосной станций. Длина канала – 1,4 км, ширина дна – 7 м, коэффициент шероховости – 0,0170, коэффициент откоса - 3, уклон – 0,00015.

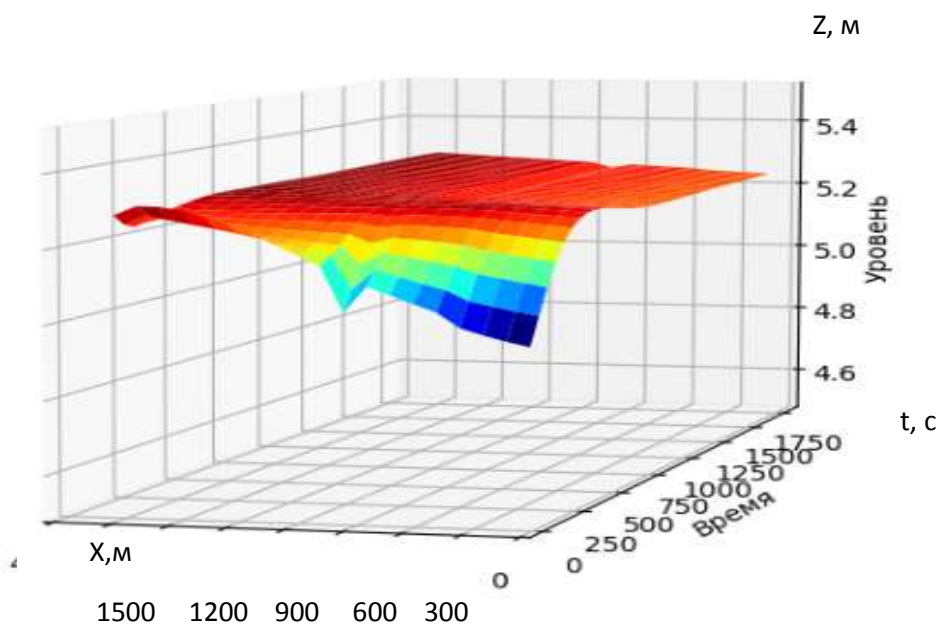


Рис. 8. Изменение уровня воды во времени и по длине участка Каршинского магистрального канала между 2-насосной станций и 3-насосной станций.

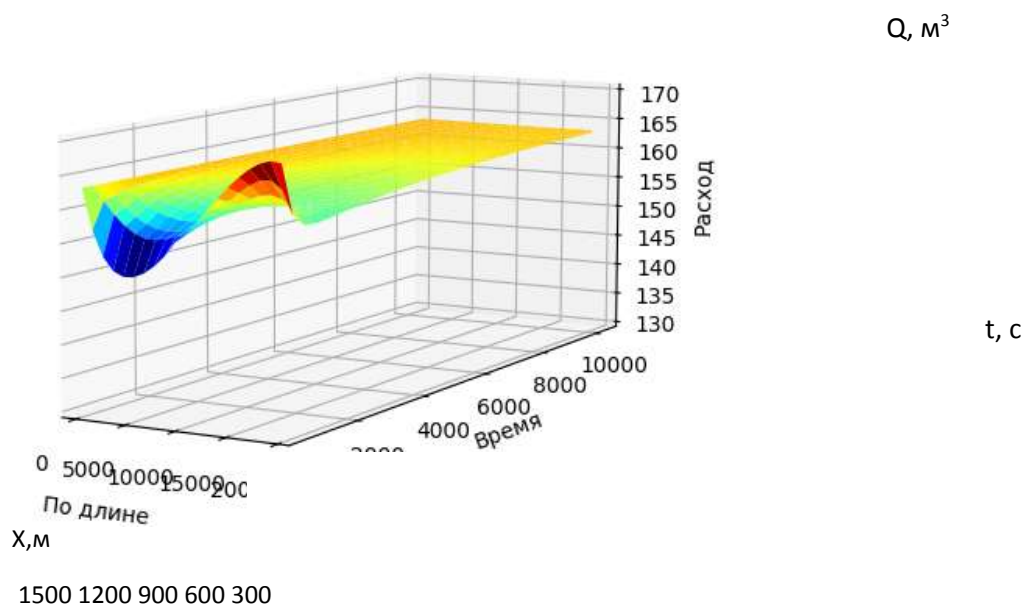


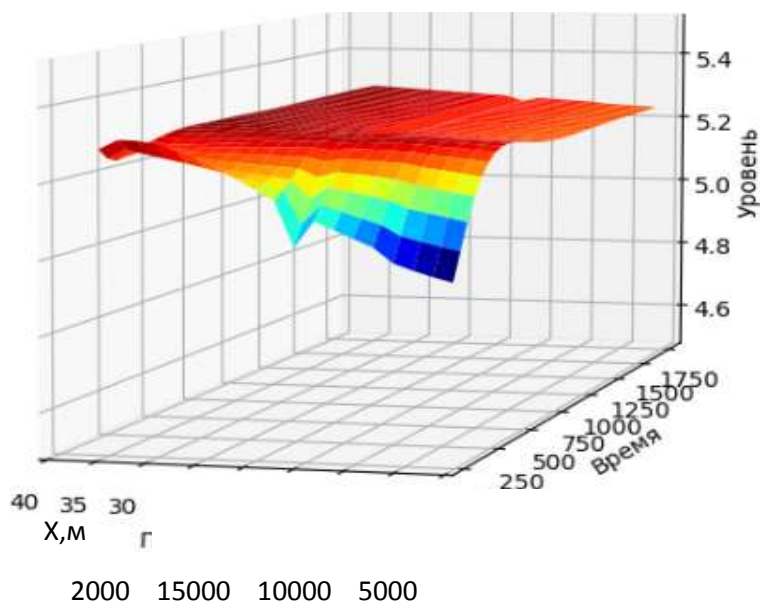
Рис. 9. Изменение расхода воды во времени и по длине участка Каршинского магистрального канала между 2-насосной станций и 3-насосной станций.

На рис. 8, 9 приведены результаты численных экспериментов по определению изменения уровня и расхода воды на участке **Каршинского магистрального канала между 2-насосной станций и 3-насосной станций.**

Из рисунков видно, что после пуска насосных агрегатов 2-насосной станций увеличенный расход в начале участка канала позволяет повысить уровень воды по длине указанного участка канала между 2-насосной станций и 3-насосной станций. В течение $t = 14698s$ ($4,08h$) уровень воды в конце участка канала увеличивается на 1,7 м.

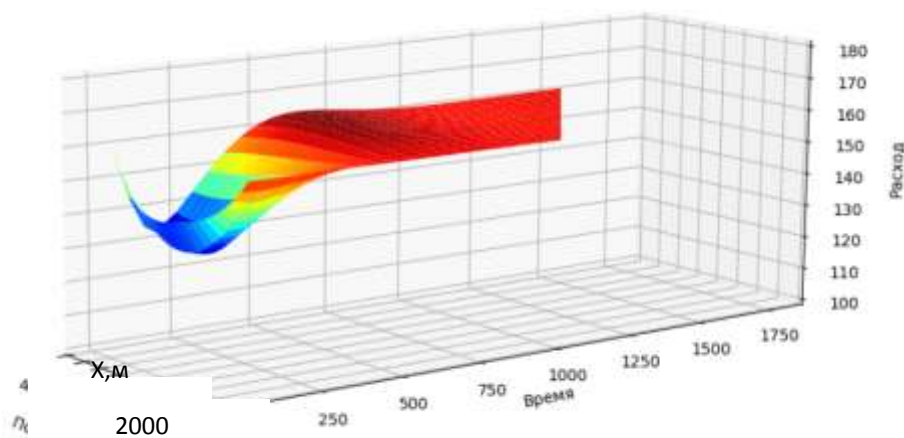
Полученные результаты численных экспериментов показывают, что уровень и расход воды в конце участка канала стабилизируется, что необходимо для находящегося там 3-насосной станций.

3. Участок Каршинского магистрального канала между 3-насосной станций и 4-насосной станций. Длина канала – 20,2 км, ширина дна – 7 м, коэффициент шероховости – 0,017, коэффициент откоса - 3, $\alpha_{\text{клон}} = 0,00015$.



t, c

Рис. 10. Изменение уровня воды во времени и по длине участка Каршинского магистрального канала между 3-насосной станций и 4-насосной станций



t, c

Рис. 11. Изменение расхода воды во времени и по длине участка Каршинского магистрального канала между 3-насосной станций и 4-насосной станций.

На рис. 10, 11 $t = 20823s$ (5,78h) приведены результаты численных экспериментов по определению изменения уровня и расхода воды на участке Каршинского магистрального канала между 3-насосной станций и 3-насосной станций

Из рисунков видно, что после пуска насосных агрегатов 3-насосной станций увеличенный расход в начале участка канала позволяет повысить уровень воды по длине указанного участка канала между 3-насосной станций и

4-насосной станций. В течение $t = 20823s$ ($5,58h$) уровень воды в конце участка канала увеличивается на 1,9 м.

Полученные результаты численных экспериментов показывают, что уровень и расход воды в конце участка канала стабилизируется, что необходимо для находящегося там 4-насосной станций.

4. Участка канала между 4-насосной станций и 5-насосной станций. Длина канала – 4,5 км, ширина дна – 7 м, коэффициент шероховости – 0,0170, коэффициент откоса - 3, уклон – 0,00015.

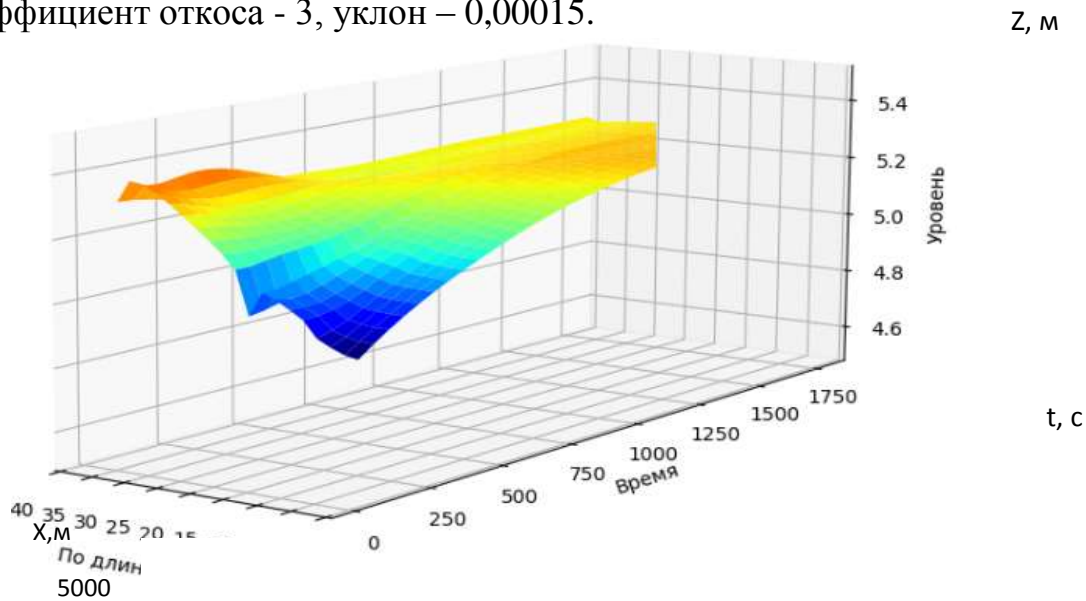


Рис. 12. Изменение уровня воды во времени и по длине участка Каршинского магистрального канала между 4-насосной станций и 5-насосной станций.

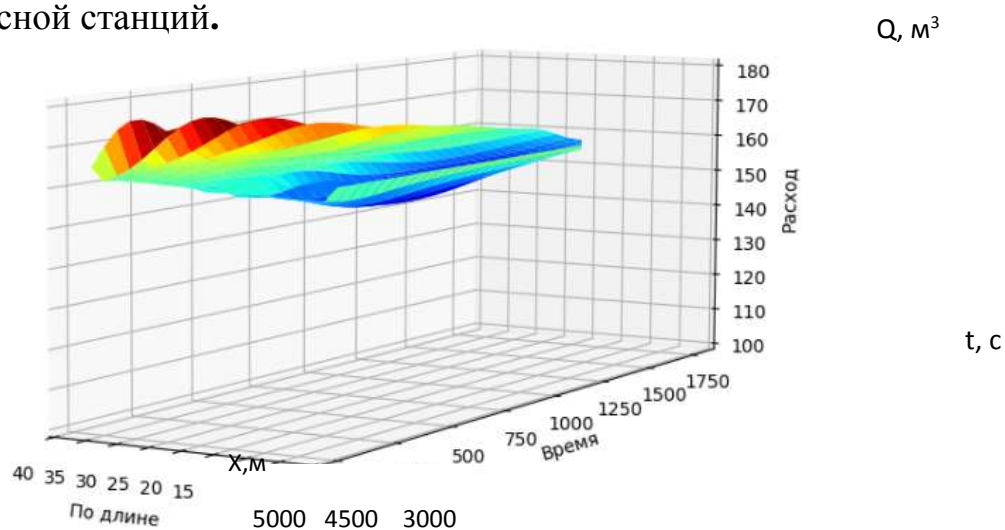


Рис.13. Изменение расхода воды во времени и по длине участка Каршинского магистрального канала между 4-насосной станций и 5-насосной станций.

На рис. 12, 13 приведены результаты численных экспериментов по определению изменения уровня и расхода воды на участке КМК между 4-насосной станций и 5-насосной станций.

Из рисунков видно, что, после пуска насосных агрегатов на 4-насосной станций увеличенный расход в начале участка канала позволяет повысить уровень воды по длине указанного участка Каршинского магистрального канала между 4-насосной станций и 5-насосной станций. В течение $t = 12444s$ ($3,46h$) уровень воды в конце участка канала увеличивается на 1,8 м.

Полученные результаты численных экспериментов показывают, что уровень и расход воды в конце участка канала стабилизируется, что необходимо для находящегося там пятая насосная станция. Сравнение результатов численных экспериментов и натурных исследований, проведённых в этих участках Каршинского магистрального канала показывает, что параметры расхода и уровня воды в них отличаются незначительно, их погрешность составляет не более 3-5%.

Это подтверждает, что разработанные нами модель, алгоритмы и современный программный комплекс на языке Python решения задач оптимального управления водных ресурсов Каршинского магистрального канала с каскадом насосных станций, работоспособен и может быть использован в аналогичных объектах отрасли водного хозяйства республики. [10,11,12].

Область применения результатов исследований в каскадах эксплуатирующийся крупных магистральных каналов с каскадом насосных станций Республики Узбекистан

Практическая значимость: результаты работы в виде математических моделей оптимального управления объектами каскада насосных станций Каршинского магистрального канала обеспечат повышение уровня их эксплуатации за счет компьютеризации, а также улучшение эксплуатации объектов каскада насосных станций за счет уменьшения непроизводительных потерь водных ресурсов в каналах и электроэнергии на водоподъем в насосные станции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведённых исследований можно сделать следующие выводы:

Разработаны математические модели оптимального управления каналов между насосными станциями каскада Каршинского магистрального канала, учитывающие современные их параметры и режимы эксплуатации этих каналов. Разработаны математические модели оптимального управления современных режимов работы насосных станций каскада Каршинского магистрального канала, учитывающие необходимые параметры объектов и оборудования насосных станций. Приведены результаты расчетов задач оптимального управления режимами эксплуатации каналов и насосных станций Каршинского магистрального канала, из которых видно, что полученные изменения изображений переходных процессов потока воды на участке канала, в этом случае уровни или расходы воды, можно рассматривать в динамике их изменения в виде анимации по расстоянию и во времени

Данная статья написана по материалом прикладного проекта ҚХ-А-ҚХ-2018-279 –«Совершенствование режимов эксплуатации каскадов крупных насосных станций использованием современных методов управления и нового оборудования, уменьшающее потери водных и энергетических ресурсов» в 2018-2020 гг. согласно приоритетных направлений развития народного хозяйства республики ПФИ – 5 «Биология, биотехника, почвоведение, водные проблемы, вопросы генетики, селекций растений и животных». При подготовке рукописи к печати авторы учли весьма ценные замечания и пожелания рецензентов – докторов технических наук, профессоров научного исследовательского института ирригации и водных проблем, за которые авторы приносят им свою глубокую признательность.

REFERENCES

1. Kabulov, A., Normatov, I., Seytov, A., & Kудaybergenov, A. (2020, September). Optimal management of water resources in large main canals with cascade pumping stations. In *2020 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS)* (pp. 1-4). IEEE.
2. Rakhimov, S., Seytov, A., Nazarov, B., & Buvabekov, B. (2020, July). Optimal control of unstable water movement in channels of irrigation systems under conditions of discontinuity of water delivery to consumers. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 883, No. 1, p. 012065). IOP Publishing.
3. Kabulov, A. V., Seytov, A. J., & Kудaybergenov, A. A. (2020). 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*, 7(4), 2350-0328.

4. Kabulov, A. V., Seytov, A. J., & Kudaybergenov, A. A. (2020). Mathematical models of the optimal distribution of water in the channels of irrigation systems. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD) ISSN (P)*, 2249-6890.

5. Rakhimov, S. K., Seytov, A. J., Jumamuratov, D. K., & Rakhimova, N. K. Optimal control of water distribution in a typical element of a cascade of structures of a machine canal pump station, hydraulic structure and pump station. India. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD) ISSN (P)*, 2249-6890.

6. Rakhimov, S. K., Seytov, A. J., & Kudaybergenov, A. A. (2020). Optimal control of unsteady water movement in the main canals. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 7(4), 2350-0328.

7. Salaeva, M., Eshkaraev, K., & Seytov, A. Solving mathematical problems in unusual ways with excellent limits. In European Scientific Conference pp. 254-257. (2020).

8. Rakhimov Sh.Kh., Begimov I., Gapparov Kh,Sh., Seytov A.J. Теория оптимального управления распределением воды в каналах ирригационных систем в условиях дискретности водоподачи потребителям. Монография. Изд-во ООО «Белгим», Ташкент, 2017 с. 169.

9. Рахимов Ш.Х., Гаффаров Х.Ш., Сейтов А.Ж. Алгоритмы оптимального управления распределением воды в каналах ирригационных систем в условиях дискретности водоподачи потребителям, //Мелиорация и водное хозяйство РФ, 2016, №6, С. 6-10. (05.00.00; №51)

10. Рахимов Ш.Х., Сейтов А.Ж., Математические модели каскада насосных станций Каршинского магистрального канала. Проблемы информатики и энергетики. Ташкент, 2017 №5, с.13-20. (05.00.00; №5)

11. Рахимов Ш.Х., Сейтов А.Ж., Математические модели водоподачи куюмазарской насосной станции с водохранилищем сезонного регулирования. Проблемы информатики и энергетики. Ташкент, 2017 №6, с.22-28. (05.00.00; №5)

12. Рахимов Ш.Х., Гаффаров Х.Ш., Сейтов А.Ж. Prerequisites for optimal distribution of water in irrigation canal systems// Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, № 9–10, Vienna. 2017. pp. 50-58.