

**НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В КАНАЛАХ,  
ОБУСЛОВЛЕННОЕ РЕЖИМОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ**

**МАХМУДОВ ИЛХОМЖОН ЭРНАЗАРОВИЧ  
МУРОДОВ НАВРУЗ КУРБОНОВИЧ  
САДИЕВ УМИДЖОН АБДУСАМАДОВИЧ  
КАЗАКОВ ЭРГАШ АХМАДОВИЧ**

**Махмудов Илхомжон Эрназарович  
Муродов Навруз Курбонович  
Садиев Умиджон Абдусамадович  
Казаков Эргаш Ахмадович**

**НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ  
В КАНАЛАХ, ОБУСЛОВЛЕННОЕ РЕЖИМОМ  
ЭКСПЛУАТАЦИИ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ**

**МОНОГРАФИЯ**

**RS Global  
Warsaw, Poland  
2022**

УДК 628.218

DOI: 10.31435/rsglobal/045

*Монография рекомендована к изданию решением Научного Совета Научно-исследовательского института ирригации и водных проблем Протокол № 20 от 20 декабря 2021 года*

**Рецензенты:**

д.т.н., профессор О.Я. Гловацкий, Заведующий лабораторией “Насосные станции и энергетика” Научно-исследовательского института ирригации и водных проблем.

д.т.н., профессор Д.Т. Палуанов, Ташкентский государственный технический университет, заведующий кафедрой “Гидроэнергетика и гидравлика”.

**И. Э. Махмудов, Н. К. Муродов, У. А. Садиев, Э. А. Казаков**

Неустановившееся движение воды в каналах, обусловленное режимом эксплуатации насосных станций – Warsaw: RS Global Sp. z O.O., 2022. – 40 с.

**ISBN 978-83-962343-7-7 (eBook)**

*Монография посвящена гидравлическому описанию неустановившегося движения воды в ирригационном канале, обусловленному случайным режимом и эксплуатацией насосной станции, в форме моментных уравнений. Материал, изложенный в монографии, представляет большой интерес для сектора водного, коммунального хозяйства и позволит решить большое количество практических задач в условиях водного дефицита. Книга может служить пособием для научных работников и студентов старших курсов.*

*The monograph is devoted to the hydraulic description in the form of moment equations of the unsteady movement of water in the irrigation canals, due to the random operation of the pumping stations. The materials presented in the monograph are of great interest for the water sector and communal services and will allow solving a large number of practical problems in water scarcity conditions. The book can serve as a manual for scientists, master degree students.*

© И. Э. Махмудов, 2022

© Н. К. Муродов, 2022

© У. А. Садиев, 2022

© Э. А. Казаков, 2022

© RS Global Sp. z O.O., 2022

**ISBN 978-83-962343-7-7 (eBook)**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>Глава 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ</b> .....	5
1.1. Движение воды в каналах, обусловленное работой насосных станций .....	5
1.2. Моделирование неустановившегося движения воды в открытых каналах .....	6
1.3. Методы решения неустановившегося движения воды в открытых каналах .....	7
1.4. Случайные процессы и использование их в описании гидравлических явления .....	10
<b>Глава 2. НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В КАНАЛАХ, ОБУСЛОВЛЕННОЕ РАБОТОЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ</b> .....	13
2.1. Уравнения неустановившегося движения .....	13
2.2. Численное решение уравнения неустановившегося движения .....	17
2.3. Установление начальных условий для решения уравнения неустановившегося движения воды .....	18
<b>Глава 3. ИЗМЕНЕНИЕ РАСХОДА И ГЛУБИН ПОТОКА В КАНАЛЕ С МАШИНЫМ ВОДОПОДЪЕМОМ ПРИ СЛУЧАЙНОМ ИЗМЕНЕНИИ РЕЖИМА ЭКСПЛУАТАЦИИ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ</b> .....	20
3.1. Вывод основного уравнения изменения расхода и глубины, обусловленное случайным режимом эксплуатации насосной станции .....	20
3.2. Численное решение моментных уравнений .....	22
3.3. Сопоставление результатов численного решения с данными натуральных опытов .....	29
<b>Глава 4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ В КАНАЛЕ</b> .....	32
4.1. Постановка вопроса и задачи исследований .....	32
4.2. Описание модельной установки .....	32
4.3. Методика проведения исследований и состав выполненных опытов .....	33
4.4. Решение тестовой задачи .....	35
<b>ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ</b> .....	38
<b>ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ</b> .....	39

## ВВЕДЕНИЕ

На территории бассейна реки Амударья эксплуатируются крупные каналы как: Каршинский, Аму-Бухарский, Аму-Зангский и другие, подача воды в которые осуществляется крупными насосными станциями. Расходы воды, подаваемые этими машинными каналами, и мощность насосных станций – уникальны. Эксплуатация этих сооружений вызывает необходимость постановки и решения сложных научно-технических задач. Одна из них относится к гидравлическому расчету неустановившегося движения воды в каналах, обусловленной случайной остановкой насосных агрегатов. Остановки, связанные со случайными ситуациями на каскадах, вызывают порой катастрофические последствия, при этом особое место занимают ситуации, связанные со случайным отключением электроэнергии на отдельных насосных станциях. Они не продолжительны, поэтому остановка из-за этого всего каскада экономически не целесообразна. Тем не менее, за короткий срок, при котором производится повторное включение, в канале происходит резкое изменение горизонта воды, что естественно, вызывает переполнение, затопление и разрушение гидротехнических сооружений. Для предотвращения отрицательных воздействий по переполнения возникает необходимость предусматривать запасы в сооружениях или на основе научных рекомендаций вводить соответствующие регуляторы на водосбросах. Для формирования программного управления регуляторами необходимо изучение динамики изменения глубины и расхода воды вдоль канала. Описание динамики изменения расхода и глубины воды в каналах основано на использовании гипотез Сен-Венана. Разработано множество методов решения уравнения неустановившегося движения, а также проведены соответствующие экспериментальные исследования влияния нестационарной работы насосных агрегатов и другого гидротехнического оборудования на уровеньный режим в каналах. Описанию же и решению уравнения движения воды в канале, возникающего вследствие случайного изменения режима работы насосных станций, уделено недостаточно внимания.

В создании данной монографии приняли участие сотрудники Научно-исследовательского института ирригации и водных проблем: введение, главы 1 и 2 монографии написаны И.Э. Махмудовым, глава 4 - Н.К. Муродовым, глава 5 - У.А. Садиевым, глава 4 - Э.А. Казаковым.

Первая часть предлагаемой монографии посвящена гидравлическому описанию неустановившегося движения воды в канале, обусловленному случайным режимом и эксплуатацией насосной станции, в форме моментных уравнений. Разработана программа реализации этих уравнений, а их корректность исследована на физической модели. Результаты вычислений сопоставлены с данными натурных экспериментов.

## Глава 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

### 1.1. Движение воды в каналах, обусловленное работой насосных станций.

Изменения режима работы насосных станций вызывает неустойчившееся движение воды в канале, что в свою очередь приводит к возникновению на свободной поверхности потока воды гравитационных волн особого типа, которые принято называть волнами перемещения [8].

Волны перемещения, в отличие от известных, вызывают по всей длине канала не только колебательное, но и поступательное движения воды. При этом по длине всего канала происходит перемещение определенного объема воды, называемого волновым расходом. Естественно, энергия, переносимая этими волнами намного выше энергии установившегося движения воды. В волнах перемещения продольные размеры, т.е. длина намного превышает глубину невозмущенного потока, поэтому их относят к классу волн мелкой воды. Как и другие типы волн перемещения разбирают на две части: лоб и тело волны (рис.1.1). В пределах лобовой части волн движение воды быстро или резко изменяется, а в теле волны движение воды изменяется медленно и плавно. В связи с этим при определении значений глубины потока  $h$  и средней скорости  $v$  волны применима одномерная модель неустойчившегося движения воды.

Используя общепринятую терминологию волны перемещения, можно классифицировать следующим образом (рис 1.2). Особенность каждого типа волны перемещения достаточно хорошо изложены в [8, 9].

В настоящей работе рассматриваются два случая возникновения волн перемещения. В первом случае по различным непредвиденным обстоятельствам произошли остановки насосной станции, при этом остальные насосные станции каскада работают. В начальный период остановки насосной станции рабочее колесо насосов продолжает по инерции вращаться в течении некоторого момента времени, а при опорожнении напорного трубопровода под давлением оставшейся там воды, рабочие колеса насосов начинают вращаться в обратную сторону, этот процесс продолжается до полного опорожнения трубопроводов. Вследствие чего, в подводящий канал поступает дополнительное количество воды, равное объему напорных трубопроводов. В результате отключения упомянутой насосной станции, при работающих других, уровень воды в подводящем канале к нему быстро поднимается, что приводит к образованию положительной восходящей волны перемещения. А в отводящем канале уровень воды снижается, вследствие чего возникает отрицательная нисходящая волна [30, 56].

После устранения причин, приводящих к остановке насосной станции, она приводится в действие, при этом в течении времени производят заполнение напорных трубопроводов и зарядку сифонных водовыпусков. За этот период из подводящего канала постепенно до достижения полной производительности насосных агрегатов забирается вода.

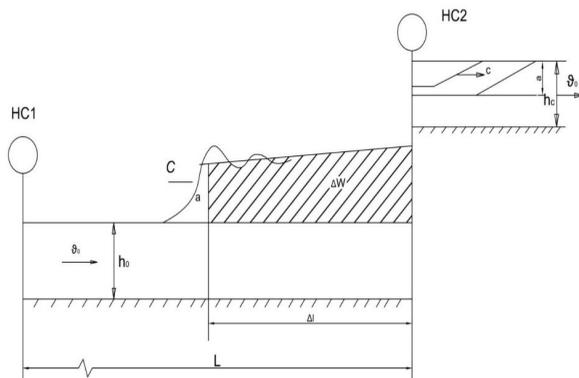


Рисунок 1.1. Возмущения волн перемещения в подводящем и отводящем каналах при отключении НС-2

Вследствие этого в подводящем канале образуется пологая отрицательная волна перемещения, она может приводить к образованию воздушных воронок в аванкамере. А в верхнем отводящем канале образуется достаточно крутая положительная волна, нисходящая вверх по течению.

В [9] приведена картина возникновения волн перемещения полной остановки агрегатов насосной станции № 2, (рис.1.1), где  $h$  и  $v$  – глубина и средняя скорость воды, отвечающая установившемуся равномерному движению,  $h_c$ ,  $c$  – средняя высота и скорость распространения волны в момент времени  $\Delta t$ ,  $\Delta W$  – объем воды в теле волны, накопившейся за время  $\Delta t$ .

На рисунке 1.2. приведена иллюстрация изменения глубины потока в машинном канале после пуска насосной станции № 2, где 1 – горизонт воды при установившемся режиме работы насосной станции, 2, 6 – горизонт воды перед повторным пуском насосной станции, 2, 3, 7 – волна пополнения, 4 – волна отлива, 5 – волна излива.  $h_0$  – горизонт воды в подводящем канале перед пуском насосной станции №2.

Изучению вышеприведенных волн, характера их возникновения, установления параметров и методов гашения энергии посвящены теоретические [8] и экспериментальные исследования.

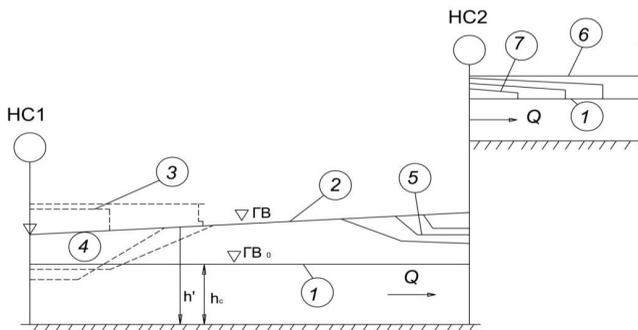


Рисунок 1.2. Изменение глубины потока в машинном канале при полной остановке и пуске НС-2.

На наш взгляд наибольшую опасность для работы каскада насосных станций представляет переполнение канала и вследствие этого затопление, разрушение откосов и гидротехнических сооружений всей системы. Для локализации и устранения причин таких последствий необходимо внедрение программного управления водосбросами на основе явлений динамики изменения  $h$  и  $Q$  вдоль канала, чему и посвящена настоящая монография.

## 1.2. Моделирование неустановившегося движения воды в открытых каналах.

Модели неустановившегося движения воды в открытых потоках основаны на использовании гипотез Сен-Венана, которые представляют:

1. Течение одномерное.
2. Движение воды плаввно-изменяющее, давление гидростатическое.
3. Гидростатические сопротивления в пределах рассматриваемого участка, подчиняющиеся квадратичной области сопротивления.

Уклон дна русла незначительный, т.е. близко к горизонтальному.

При составлении математической модели изменения двух взаимосвязанных переменных потока скорости и глубины, возможно использование трех законов механики: сохранение массы, количества движения и энергии жидкости. Впервые уравнения изменения гидравлических параметров потока в одномерной постановке в дифференциальной форме получены в 1871 году Сен-Венаном [8].

$$t_0 - \frac{v^2}{C^2 R} = \frac{\partial h}{\partial S} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial S} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t}$$

$$\omega \frac{\partial v}{\partial S} + v \frac{\partial \omega}{\partial S} = \frac{\partial \omega}{\partial t} \tag{1.1}$$

где  $v$  – средняя скорость потока,  
 $\omega$  – площадь живого сечения,

$i_0$  – уклон дна русла,  
 $dt$  – время,  
 $ds$  – расстояние,  
 $h$  – глубина потока.

Неравномерность распределения скоростей по живому сечению, которые не учитываются в системе уравнений (1.1) привели к определенным неточностям при их реализации. Учитывая влияние неравномерности распределения скоростей из изменения динамики и энергии потока, Буссенеска, пересмотрев уравнения (1.1), предложил введение корректирующих коэффициентов

$$i_0 - \frac{v^2}{C^2 R} = \frac{\partial h}{\partial S} + \frac{a}{g} v \frac{\partial v}{\partial S} + \frac{\beta}{g} \frac{\partial v}{\partial t}$$

$$\omega \frac{\partial v}{\partial S} + v \frac{\partial \omega}{\partial S} = \frac{\partial \omega}{\partial t} \quad (1.2)$$

где  $a, \beta$  - корректирующие коэффициенты, характеризующие неравномерность распределения скоростей по живому сечению.

Уравнения (1.1) и (1.2) можно также получить из уравнения движения вязкой жидкости.

Известна также интегральная форма уравнения неустановившегося движения воды в открытых каналах [8].

$$\int_{s_1}^{s_2} [(U\omega)_{t_2} - (U\omega)_{t_1}] ds =$$

$$= \int_{t_1}^{t_2} [(U^2\omega)_{s_1} - (U^2\omega)_{s_2}] dt + g \int_{t_1}^{t_2} [(M_1^1)_{s_1} + (M_2^1)_{s_2}] dt$$

$$- g \int_{t_1}^{t_2} \int_{s_1}^{s_2} \rho M_2^1 ds dt + g \int_{t_1}^{t_2} \int_{s_1}^{s_2} \omega(i_0 - i_f) ds dt \quad (1.3)$$

где  $\rho$  – плотность воды;  
 $U = U(s, t)$  – скорость, равномерная по поперечному сечению;  
 $\omega = \omega(s, t)$  – площадь живого сечения;  
 $i_0$  – уклон дна русла;  
 $i_f$  – уклон трения;

и интегралы  $M_1^1, M_2^1$  определяются соответственно уравнениями:

$$M_1^1 = \int_0^{h(s)} [h(s) - \eta] \sigma(s, \eta) d\eta$$

$$M_2^1 = \int_0^{h(s)} (h - \eta) \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial s} \right]_{h=h_0} d\eta \quad (1.4)$$

где  $h(s, t)$  – глубина воды  
 $\sigma(s, \eta)$  – ширина поперечного сечения  
 $\eta$  – переменное интегрирование по глубине  $h$ .

Предполагается, что зависимые переменные  $h$  и  $\eta$  непрерывные и дифференцируемая функция для медленно изменяющегося движения из уравнения (1.3) можно получить дифференциальное уравнение (1.1). Независимо от вида уравнения главным вопросом их исследования является нахождение значения переменных, характеризующих основные гидравлические показатели русла: глубина  $h$  и расход воды  $Q$ . Далее приведем методы решения неустановившегося движения воды в открытых каналах.

### 1.3. Методы решения неустановившегося движения воды в открытых каналах.

Первая попытка решения уравнений (1.1) и (1.2) была предпринята Массая, а Христианович С.А. установил, что система дифференциальных уравнений не может быть решена в конечном виде, а возможны решения методом последовательного приближения. Предпринято много попыток решения уравнений Сен-Венана, тем не менее, практическое приложение дифференциального уравнения для решения инженерных задач стало возможным после появления ЭВМ.

Основным принципом решения дифференциального уравнения неуставившегося движения является представление их в дискретном виде, чтобы создать условия для численного решения относительно глубины потока  $h$  и расхода  $Q$ . Известны следующие численные методы: конечных элементов, характеристик и конечных разностей. При численном исследовании уравнений движения воды разностными методами возникают принципиальные затруднения, связанные с неэквивалентностью системы дифференциальных уравнений, с их разностной аппроксимацией. Эти затруднения преодолевали различными способами [17, 18, 19, 20, 21]. От удачного выбора порядка решения системы разностных уравнений зависит точность и трудоемкость расчета.

При использовании метода сеток более эффективными по сравнению с явными схемами оказались неявные разностные схемы, которые применяли в работах по динамике жидкости.

Для устойчивости разностных методов необходимо соблюдать ограничения на величины шагов интегрирования.

Уравнения движения Сен-Венана можно также исследовать методом характеристик, применением прямого вариационного метода Бубнова-Галеркина. Одним из методов недопущения неустойчивости численных решений является введение диффузионных членов в уравнения движения, предложенные в 1951 г. Хайями. Этот метод аналогичен методу Маскинга-Кюнже и исследован здесь нами при численном интегрировании уравнений Сен-Венана.

Существуют также методы расчета неуставившегося движения воды, основанные на уравнениях Сен-Венана. В [8] изложены методы Томаса, Баркерона, Калинина-Милокова, Мак-Картли, метод передаточной функции, метод промежуточного значения, метод Пульса, Маскинган-Кюнжа. В работах [9, 13] дан подробный обзор вычислительных и приближенных методов исследования неуставившегося движения воды.

В наших исследованиях предполагается использовать метод численного решения дифференциального уравнения неуставившегося движения воды, основанного на конечных разностях, поэтому считаем необходимым дать обзор и оценку этого способа.

Решения дифференциальных уравнений в частных производных методами конечных разностей характеризуется способом, с помощью которого частные производные заменяются конечными разностями, определяются коэффициенты и другие величины.

Известны различные способы замены производной конечными разностями, выбирая различные соседние точки, в частности, производную по координате можно приближать следующими способами:

$$\frac{\partial Q}{\partial s} \approx \frac{Q_i^k - Q_{i-1}^k}{\delta s} \approx \frac{Q_{i+1}^k - Q_i^k}{\delta s} \approx \frac{Q_{i+1}^k - Q_{i-1}^k}{2\delta s} \approx \frac{Q_{i+1}^{k+1} - Q_{i-1}^{k+1}}{2\delta s} \quad (1.5)$$

а производную по времени:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \approx \frac{Q_i^{k+1} - Q_i^k}{\delta t} \approx \frac{Q_i^{k+1} - Q_i^{k-1}}{2\delta t} \quad (1.6)$$

и коэффициенты:

$$T' \approx T'(h_i^k) \approx T'(h_i^{k+1}) \approx \frac{T'(h_i^{k+1}) + T'(h_i^k)}{2} \quad (1.7)$$

Все эти приближения стремятся к одному и тому же значению при  $\delta t \rightarrow 0$  и  $\delta s \rightarrow 0$ , так как все функции непрерывны. Однако, как показывает практика вычислений, принципиальное значение имеет вопрос: какое приближение использовать, этим определяется: будет ли схема условно устойчивой, безусловно, устойчивой или всегда неустойчива. Этот вопрос стоит отдельно от всех других вопросов точности, таких как мотивация «ошибки усечения». Так как неустойчивая схема может привести к большому результирующим ошибкам, устойчивость является важнейшим условием, более важным, чем точность.

Прямое преобразование уравнений Сен-Венана к конечным разностям состоит в выражении каждой производной по координате и каждого коэффициента через известные значения, неизвестные значения зависимых переменных появляются только в аппроксимациях производных по времени. В результате получается следующая схема:

$$\frac{Q_{i+1}^k - Q_{i-1}^k}{2\delta s} + T_i'^k \frac{h_i^{k+1} - h_i^k}{\delta t} + Q_i^k = 01.8$$

$$\frac{v_i^{k+1} - v_i^k}{\delta t} + v_i^k \frac{u_{i+1}^k - v_{i-1}^k}{2\delta s} + g \left( -i_0 + h_i^k + \frac{h_{i+1}^k - h_{i-1}^k}{2\delta s} - D_{li}^k \right) = 0$$

Если известны условия для всех  $S$  и  $t$ , эти уравнения можно решать для  $u_i^{k+1}$  и  $h_i^{k+1}$ .

Рассмотрим схему численного решения, которая устойчива независимо от значений  $\delta t$  и  $\delta S$ .

Рассмотренные ранее схемы сводились к замене частных производных на отношение приращений аргументов в уравнениях потока, известных на линии  $t_k$ , на которой вообще то все известно: Коэффициенты и другие, входящие в уравнения величины также определялись на линии  $t_k$ .

В результате в каждой точке  $i$  получалась пара линейных алгебраических уравнений с двумя неизвестными. В рассматриваемой схеме производные по  $S$  определяются на линии  $t_{k+1}$ , так что получающаяся в результате пара алгебраических уравнений в каждой точке  $i$  содержит 6 неизвестных, однако две пары уравнений, относящиеся к соседним точкам  $i$ , содержат всего 8 неизвестных и т.д.

$N/2$  пары уравнений для внутренних точек содержат  $2N$  неизвестных. Для получения остальных уравнений используется записанное в конечных разностях характеристическое уравнение на левой границе  $i=1$ , и другое характеристическое уравнение при  $i=N$ . Систему дополняют два известных граничных условия по одному на каждом конце. Одновременное решение всей системы этих уравнений определяет профиль к моменту  $t_{k+1}$ .

Система алгебраических уравнений будет линейной, если коэффициенты в исходящих уравнениях определялись на линии  $t_k$ : это не портит устойчивости схемы, которая остается устойчивой для произвольного  $\delta t$ . Требуется, однако, чтобы гидравлический уклон  $i_f$  определялось  $t_{k+1}$  линии. Эта величина квадратично по  $Q$  и  $K$  и выражается как

$$i_f = \frac{Q|Q|}{K^2} \quad (1.9)$$

где  $K$  обычно выражается через:

$$K(h) = \frac{1.986 AR^{2/3}}{n} \quad (1.10)$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости по Маннингу.

Линеаризация выражения (1.9) в точке дает подходящее выражение для  $i_{fi}^{k+1}$  с точностью до величин порядка  $(\delta t)^2$ .

Таким образом,

$$i_{fi}^{k+1} \approx i_{fi}^k + \frac{\partial i_f}{\partial Q} |Q_i^k| (Q_i^{k+1} - Q_i^k) + \frac{\partial i_f}{\partial K} |Q_i^k| K_h |Q_i^k| (h_i^{k+1} - h_i^k) \quad (1.11)$$

Здесь, как это следует из уравнений (1.9) и (1.10)

$$\frac{\partial i_f}{\partial Q} = \frac{2i_f}{Q} \quad (1.12)$$

$$\frac{\partial i_f}{\partial K} = -\frac{2i_f}{K} \quad (1.13)$$

$$K_h = -\frac{dK}{dh} = \frac{K}{A} \left( \frac{5T'}{3} - \frac{2K}{3} \frac{dX}{dn} \right) \quad (1.14)$$

Пределы изменения смоченного периметра  $\chi$  для трапецидального русла с коэффициентом откоса  $m$ :

$$\frac{d\chi}{dh} = 2\sqrt{1+m^2} \quad (1.15)$$

Как пример устойчивой схемы в конечноразностной форме можно выражать уравнениями вида:

$$A_i Q_{i+1} - A_i Q_{i-1} + B_i h_i = C_i \quad (1.16)$$

$$D_i Q_{i+1} + E_i Q_i - D_i Q_{i-1} + G_i h_{i+1} + G_i h_{i-1} = J_i \quad (1.17)$$

Под  $Q$  и  $h$  понимаются их неизвестные значения на линии  $t_{k+1}$ . Коэффициенты от  $A_i$  до  $J_i$  определяются через известные значения как:

$$A_i = \frac{1}{2\delta S} \quad (1.18)$$

$$B_i = \frac{\tau_i^k}{\delta t} \quad (1.19)$$

$$C_i = \frac{(T_i h_i)^k}{\delta t} - q_i^{k+1} \quad (1.20)$$

$$D_i = \frac{v_i^k}{\delta S} \quad (1.21)$$

$$E_i = \frac{1}{\delta t} + 2q \left( \frac{A_i f}{Q} \right)_i^k \quad (1.22)$$

$$Q_i = \frac{[(c^2 - v^2)T]_i^k}{2\delta S} \quad (1.23)$$

$$H_i = -2q \left( A_{if} \frac{K_h}{K} \right)_i^k \quad (1.24)$$

$$J_i = g \left\{ A \left[ i_0 + i_j \left( 1 - 2 \frac{K_h}{K} h \right) \right] + \frac{v^2}{g} A_f^k \right\}_i^k + \frac{Q_i^k}{\delta t} - v_i^k q_i^{k+1} + q A_i^k D_{i_1}^{k_1 k+1} \quad (1.25)$$

В выражении (1.25)  $D_{i_1}^{k_1 k+1}$  означает  $D_{i_1}$ , вычисленное в соответствии со значениями  $q$  и  $U_i$ , взятыми в момент  $t_{k+1}$  и  $uA$ , взятыми в момент  $t_k$ . Заметим, что при втекающем потоке под прямым углом к основному, два последних слагаемых в выражении (1.25) взаимно сокращаются и:

$$\begin{aligned} \left[ \frac{\partial Q}{\partial t} + (v \pm C) \frac{\partial Q}{\partial S} - T'(v \pm C) \left[ \frac{\partial h}{\partial t} + (v \pm C) \frac{\partial h}{V \partial t} \right] \right] = \\ = Ag(i_0 - i_j + D_i) + \gamma^2 A_s^h \pm gC \end{aligned} \quad (1.26)$$

В уравнении (1.26) для левой границы  $i=1$  записывается выражение в виде:

$$E_1 Q_1 + D_1 Q_2 + H_1 h_1 + G_1 h_2 = J_1 \quad (1.27)$$

где  $E_1$  и  $D_1$  снова берутся в конце интервала времени, в то время как:

$$E_1 = \frac{1}{\delta t} + 2g \left( \frac{A_{if}}{Q} \right)_i^k \quad (1.28)$$

$$D_1 = \frac{(v - c_i^k)}{\delta S} \quad (1.29)$$

$$H_1 = -\frac{[(v+C)T]_i^k}{\delta t} + \frac{[(v^2 - C^2)T]_i^k}{\delta S} - 2g \left( A_{if} \frac{K_h}{K_1} \right)_i^k \quad (1.30)$$

$$G_1 = -\frac{[(v^2 - C^2)T]_i^k}{\delta S} \quad (1.31)$$

$$\begin{aligned} J_1 = g \left\{ A \left[ i_0 + i_f \left( 1 - 2 \frac{K_h}{K} h \right) \right] + \frac{v^2}{g} A_s^h \right\} + \frac{Q_i^k}{\delta t} + C_1^k q_i^{k+1} \\ + g A_1^k D_{i_1}^{k_1 k+1} - \frac{[(v+C)Th]_i^k}{\delta t} \end{aligned} \quad (1.32)$$

где  $D_{i_1}^{k_1 k+1}$  определяется также как и в выражении 1.25.

Для области граничные условия слева в момент  $t_{k+1}$  записываются так:

$$F_1 Q_1 + B_1 h = 1 \quad (1.33)$$

но обычно  $F_1$  либо  $B_1$  равны нулю, а другой коэффициент равен единице.

Уравнение 1.27 для правой границы  $k=N$  имеет вид:

$$D_N Q_{N-1} + E_N Q_N + C_N h_{N-1} + H_N h_N = J_N \quad (1.34)$$

$$D_N = -\frac{(v+C)K_N^k}{\delta S} \quad (1.35)$$

$$G_N = \frac{[(v^2 - C^2)T]_N^k}{\delta S} \quad (1.36)$$

$$H_N = -\frac{[(v-C)T]_N^k}{\delta t} - \frac{[(v^2 - C^2)T]_N^k}{\delta S} - 2g \left( A_{ij} \frac{K_h}{K} \right)_N^k \quad (1.37)$$

$$\begin{aligned} J_N = g \left\{ A \left[ i_0 + i_f \left( 1 - \frac{2K_h}{K} h \right) \right] + \frac{v^2}{g} A_s^h \right\}_N^k + \frac{Q_N^k}{\delta t} - \\ - C_N^k g_N^{k+1} + g A_N^k D_{iN}^{k_1 k+1} - \frac{[(v-C)Th]_N^k}{\delta t} \end{aligned} \quad (1.38)$$

Значение  $D_{i_1}^{k_1 k+1}$  определяется, как и раньше.

#### 1.4. Случайные процессы и использование их в описании гидравлических явления.

По форме проявления причинных связей законы окружающего мира не поддаются точному предсказанию, хотя уровень знания о нем непрерывно совершенствуется. К числу одного из объектов окружающего нас мира относятся, к примеру, насосные станции. Так, одновременно нельзя

прогнозировать безотказность работы источников питания: линии электропередач подстанций, автоматических регуляторов подачи энергии, исправное состояние насосных агрегатов, узлов и систем обслуживания комплекса гидротехнических станций. Поэтому вероятность безотказной работы насосных станций никогда не равна 1. При вероятном отказе, т.е. нарушении работоспособного состояния насосной станции в каналах создаются экстремальные ситуации, обусловленные возникновением неустановившегося движения воды. Вдобавок к этому, гидравлические параметры водохозяйственных систем: ирригационных каналов, гидротехнических сооружений и насосных систем изменяются в зависимости от времени нестационарным образом. При этом использование стационарных случайных процессов при исследовании вероятностных характеристик работы таких систем оказывается недостаточным.

Предполагая состояние регуляторов гидротехнических сооружений работы насосных станций как последовательность независимых испытаний.

В случае первого испытания система находится в рабочем, а во втором испытании система находится в нерабочем состоянии, т.е. система - объект принимает два конечных состояния случайным образом. В этом случае для моделирования вышеприведённых процессов использование конечных значений Марковских процессов введённых А.М. Колмогоровым может дать хорошие результаты. В работах [10, 11] приведены результаты численного моделирования Марковских случайных процессов и применение их для исследования задач о вероятностных характеристиках режимов работы гидротехнических сооружений. Рассмотрено [9] линейное дифференциальное уравнение первого порядка

$$\frac{dx(t)}{dt} = a(\xi(t)) X(t) \quad (1.39)$$

где, коэффициент  $a$  зависит от случайного марковского процесса  $\xi(t)$ , принимавшего два состояния  $\xi_1, \xi_2$  с вероятностями  $P_1(t), P_2(t)$  удовлетворяющим системе линейных дифференциальных уравнений [55, 56]

$$\begin{aligned} \frac{dP_1(t)}{dt} &= -\lambda P_1(t) + \nu P_2(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda P_1(t) - \nu P_2(t). (\lambda, \nu \geq 0) \end{aligned} \quad (1.40)$$

При этом  $a(\xi_1) = a_1$ ,  $a(\xi_2) = a_2$

Переходим от дифференциальных уравнений к разностным положив  $t_n = nh$  ( $h > 0, n = 0, 1 \dots$ )

$$\begin{aligned} X(t_{n+1}) &= (1 + ha(\xi(t_n)))X(t_n) \\ P_1(t_{n+1}) &= (1 - h\lambda) P_1(t_n) + h\nu P_2(t_n) \\ P_2(t_{n+1}) &= h\lambda P_1(t_n) + (1 - h\nu)P_2(t_n) \end{aligned} \quad (1.41)$$

В общем случае для марковского процесса, описываемого системой линейных дифференциальных уравнений (1.41), среднее время пребывания случайного процесса  $\xi(t_n)$  в состоянии  $\xi_k$  до перехода в другое состояние равно -  $\frac{1}{a_{kk}}$

Рассматривая систему уравнений Сен-Венана для канала прямоугольной формы поперечного сечения получен следующий вид моментных уравнений.

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_k(t, z)}{\partial t} &= \left( -\frac{2Q_k}{Bh_k} \frac{n^2 g}{R_k^{4-3}} - 2 \frac{\partial Q_k}{\partial S} \frac{1}{Bh_k} + \frac{2Q_k}{Bh_k^2} \frac{\partial h_k}{\partial S} - \frac{2q_k(S)}{Bh_k} \right) (Q_k - P_{ko} Q_k) - \\ &- 2 \frac{Q_k}{Bh_k} \frac{\partial h_k}{\partial S} (Q_k - P_{ko} Q_k) + A \Delta L \sqrt{gB} \frac{\partial^2}{\partial S^2} (Q_k - P_{ko} Q_k) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + (Bgi_0 + \frac{Q_k^2}{Bh_k^2} \frac{n^2 g}{R_k^{4/3}} + \frac{4}{3} \frac{Q_k^2}{Bh_k^2} \frac{n^2 g}{R_k^{7/3}} \frac{B^2}{(B+2h_k)^2}) + \frac{2Q_k}{Bh_k^2} \frac{\partial Q_k}{\partial S} - Bg \frac{\partial h_k}{\partial S} - \\
 & - \frac{2}{B} \frac{Q_k^2}{h_k^3} \frac{\partial h_k}{\partial S} + \frac{2Q_k}{Bh_k} q(S) (h'_k - P_{ko} h_k) - Bgh_k (1 - \frac{Q_k^2}{B^2 gh_k^2}) \frac{\partial}{\partial S} (h'_k - P_{ko} h_k) + \\
 & + \sum_{S=1}^n a_{ks} Q'_s \frac{\partial h'_k}{\partial t} = -\frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial S} (Q'_k - P_{ko} Q_k) + A\Delta L \sqrt{gB} \frac{\partial^2}{\partial S^2} (h'_k - P_{ko} h_k) + \\
 & + \sum_{S=1}^n a_{ks} h'_s \quad k = \overline{1, n}
 \end{aligned} \tag{1.42}$$

Полученные уравнения (1.42) определяют случайные изменения расхода и глубины воды при случайном характере работы водопользователя, расположенных вдоль канала с прямоугольной формой поперечного сечения. Работа насосных станций, как вдоль канала, так и в случае работы каскада этими уравнениями не учитываются.

Из приведённого литературного обзора можно сделать следующие выводы:

Экспериментальными исследованиями установлено, что при внезапном отключении или включении насосных станций в канале возникают волны перемещения, имеется ряд рекомендаций по определению времени распространения, а также других параметров.

С использованием гипотез Сен-Венана даны теоретические описания волн перемещения, возникающих в каналах при установившемся режиме движения воды.

Установлен случайный характер изменения гидравлических величин при случайном воздействии на поток воды в канале прямоугольной формы поперечного сечения.

Тем не менее, вопросы регулирования уровня воды в канале при неустойчивом движении, обусловленное случайной остановкой и пуском насосной станции недостаточно изучены. При этом наиболее актуальной можно считать задачу по имитации таких ситуаций с использованием ЭВМ.

#### В свете вышеизложенного вытекают следующие задачи:

1. Переосмысление гипотез Сен-Венана для описания неустойчивого движения воды в канале трапецидальной, прямоугольной и треугольной формы сечения в случае изменения режима эксплуатации насосных станций.

2. Создание имитационной модели с целью их использования в качестве входного параметра для автоматических регуляторов по управлению глубиной потока в канале при случайном возникновении неустойчивого движения.

3. Установить динамику изменения глубины потока в зоне формирования волны перемещения, вызванное случайным режимом эксплуатации насосной станции.

4. Для установления корректности имитационной модели проверка результатов численной имитации на конкретном объекте с использованием данных натурных опытов.

5. Решение тестовой задачи с использованием результатов физического моделирования неустойчивого движения воды в канале прямоугольного поперечного сечения.

## Глава 2. НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В КАНАЛАХ, ОБУСЛОВЛЕННОЕ РАБОТОЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ

### 2.1. Уравнения неустановившегося движения.

Принимая гипотезы Сен-Венана [3, 4], предполагая, что распределение скорости в поперечном сечении близко к равномерному  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 1$  составляем уравнения баланса расхода воды и изменения количества движения.

Рассмотрим участок канала между двумя насосными станциями, характер движения воды характеризуется полностью режимом эксплуатации насосных агрегатов. Обозначая продольную ось  $S$  для одномерного случая при  $S$ ,  $S + \Delta S$  составили баланс расхода воды между этими сечениями для моментов времени  $t$ ,  $t + \Delta t$

$$Q(t, S)\Delta t - Q(t, S + \Delta S)\Delta t - q\Delta S\Delta t = \Delta\omega\Delta S \quad (2.1)$$

где  $Q(t, S)\Delta t$  – количество воды протекающее через сечение I-I в момент времени  $\Delta t$ ;

$Q(t, S + \Delta S)\Delta t$  – количество воды протекающее через сечение II-II в момент времени  $\Delta t$ ;

$q\Delta S\Delta t$  – объем воды, забираемой насосными установками

$\Delta\omega\Delta S$  – объём воды в отсеке между I-I и II-II

При  $\Delta t \rightarrow 0$ ,  $\Delta S \rightarrow 0$  из уравнения (2.1) получим

$$\frac{\partial\omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial S} = q, \quad q = \frac{Q}{L} \left[ \frac{m^2}{c} \right] \quad (2.2)$$

Применяем уравнение количества движения для принятой расчётной схемы

$$\omega\Delta S\rho(v_1 - v_2) = F\Delta t - q\rho\Delta S\Delta t(v - v_s) \quad (2.3)$$

и обозначая  $\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_2 = \Delta\mathcal{G}$  получим уравнение изменения средней скорости потока

$$\frac{\Delta\mathcal{G}}{\Delta t} = \frac{F}{\omega\rho\Delta S} - q \frac{(\mathcal{G} - \mathcal{G}_s)}{\omega} \quad (2.4)$$

где  $\mathcal{G}_1$  – средняя скорость потока в сечении I-I

$\mathcal{G}_2$  – средняя скорость потока в сечении II-II

$\rho$  – плотность воды

$\omega$  – площадь живого сечения

$F$  – результирующая сила, участвующая в изменении количества движения потока.

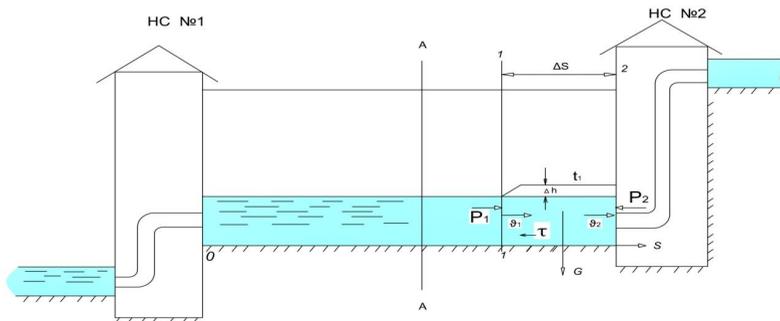


Рисунок 2.1. Гидравлическая схема возникновения неустановившегося движения воды в канале, вызванное остановкой HC-2.

Следует отметить, что в классическом уравнении Сен-Венана предполагали, что приток или отток имеет нулевую продольную составляющую скорость фактически для придания водозабору продольной скорости  $v$ , требовалось изменение количества движения, что приводило замедления или ускорению потока. В таком случае для оттока воды при водозаборе через  $v$ , обозначим продольную составляющую скорости относительно скорости воды в открытом канале.

Исследуем отдельно слагаемые в уравнении (2.4) определяющие отток воды, общий объём  $\Delta\omega\Delta S$ , а также силы  $F$  действующие на эти объёмы (рис. 2.1). Сила  $F$  состоит из:

$$F = \rho g \Delta S \omega \sin \gamma - \frac{\Delta p}{\Delta S} \Delta S \Delta \omega - \rho \Delta S \omega \frac{\Delta v}{\Delta t} - \tau \chi \Delta S \quad (2.5)$$

разность проекций сил гидродинамического давления  $P_1 = p \omega$   $P_2 = (\rho + \frac{\partial \rho}{\partial S} dS) \omega$  равны:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \rho \omega - (\rho + \frac{\partial \rho}{\partial S} dS) \omega = - \frac{\partial P}{\partial S} dS \omega;$$

Изменение давления  $P$  по длине очень мало поэтому приобретаем членом  $\Delta P$

$$v \frac{\Delta v}{\Delta S} = \frac{\Delta S}{\Delta t} \frac{\Delta v}{\Delta S} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$\chi = \frac{\omega}{R} \quad \sin \gamma = - \frac{dz}{dS} = (i_0 - \frac{\Delta h}{\Delta S})$$

В общем виде силы сопротивления, проявляющиеся в потоке жидкости, выражается как:

$$T = \tau \chi S = \rho g R S_f \chi S = \rho g \omega S S_f$$

где:  $\tau$  - касательное напряжение на стенке

$\chi$  - смоченный периметр

$i_f = S_f$  - гидравлический уклон

На основе принятой гипотезы

$$i_f = \frac{v^2}{c^2 R} = \frac{v^2 \lambda}{8 g R}$$

Тогда учитывая все обозначения

$$F = \rho g \Delta S \omega (i_0 - \frac{\Delta h}{\Delta S}) - \rho \Delta S \omega v \frac{\Delta v}{\Delta S} - \rho g \omega \Delta S \frac{v^2}{c^2 R} \quad (2.6)$$

где  $J_n$  - уклон свободной поверхности,

$i_f$  - уклон трения,

$n$  - коэффициент шероховатости,

$\lambda$  - коэффициент трения.

Из уравнения (2.4) получим

$$\frac{\partial v}{\partial t} = (i_0 - \frac{\partial h}{\partial S}) g - v \frac{\partial v}{\partial S} - g \frac{v |v|}{c^2 R} - q \frac{(v - v_s)}{\omega} \quad (2.7)$$

Таким образом, уравнения, описывавшие неустойчившееся движение воды в открытом канале имеет следующий вид:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = (i_0 - \frac{\partial h}{\partial S}) g - v \frac{\partial v}{\partial S} - g \frac{v |v|}{c^2 R} - q \frac{(v - v_s)}{\omega} \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial S} = -q$$

Известно, самыми распространенными формами сечения оросительных каналов являются трапецидальное, прямоугольное.

Трапецидальная форма сечения определяется шириной по низу  $b$ , глубиной наполнения  $h$ , коэффициентом откоса и шириной по урезу воды  $B$ . При  $b=0$  трапецидальная форма сечения переходит в треугольное, а при  $m=0$  в прямоугольную форму сечения. Имея виду  $v = \frac{Q}{\omega}$ , учитывая

$$\frac{\partial}{\partial S} \left( \frac{Q}{\omega} \right) = \frac{1}{\omega} \frac{\partial Q}{\partial S} - \frac{Q}{\omega^2} \frac{\partial \omega}{\partial S} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial S} \left( \frac{Q}{\omega} \right) = \frac{1}{\omega} \frac{\partial Q}{\partial S} - \frac{Q}{\omega^2} \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

из системы уравнений (2.8) имеем

$$\begin{aligned} i_0 - \frac{\partial h}{\partial S} &= \frac{1}{g} \frac{Q}{\omega} \left[ \frac{1}{\omega} \frac{\partial Q}{\partial S} - \frac{Q}{\omega^2} \frac{\partial \omega}{\partial S} \right] + \frac{1}{g} \left[ \frac{1}{\omega} \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{Q}{\omega^2} \frac{\partial Q}{\partial t} \right] + \frac{Q|Q|}{c^2 \omega^2 R} + \\ &+ q \frac{Q}{g \omega^2} - q \frac{Q_3}{\omega g}, \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial S} = -q \end{aligned} \quad (2.10)$$

При этом

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial S} &= \frac{\partial}{\partial S} (bh + mh^2) = (b + 2mh) \frac{\partial h}{\partial S} \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} &= (b + 2mh) \frac{\partial h}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Тогда (2.10) примет следующий вид

$$\begin{aligned} i_0 - \frac{\partial h}{\partial S} &= \frac{1}{g} \frac{Q}{(b + mh)h} \left[ \frac{1}{(b + mh)h} \frac{\partial Q}{\partial S} - \frac{Q(b + 2mh)h}{(b + mh)^2 h^2} \frac{\partial h}{\partial S} \right] + \\ &\frac{1}{g} \left[ \frac{1}{(b + mh)h} \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{Q(b + 2mh)h}{(b + mh)^2 h^2} \frac{\partial h}{\partial t} \right] + \frac{Q|Q|}{c^2 (b + mh)^2 h^2 R} + \frac{qQ}{g \omega^2} - \\ &- q \frac{Q_3}{g (b + mh)^2 h^2}, \frac{\Delta h}{\Delta t} = - \frac{1}{b + 2mh} \left[ q + \frac{\Delta Q}{\Delta S} \right] \end{aligned} \quad (2.12)$$

Система уравнений (2.12) описывается в дифференциальной форме неустойчившегося движения воды в трапецидальном канале, обусловленное режимом работы насосных станций (рис.2.1), или насосной установки (рис. 2.3).

Для работы насосной установки, работающей вдоль канала, влияние скорости бокового водозабора из общего движения незначительно, поэтому пренебрегая  $v_s = \frac{Q_s}{\omega} = 0$  из систем (2.12) получим

$$\begin{aligned} i_0 - \frac{\partial h}{\partial S} &= \frac{1}{g} \frac{Q}{(b + mh)h} \left[ \frac{1}{(b + mh)h} \frac{\partial Q}{\partial S} - \frac{Q(b + 2mh)h}{(b + mh)^2 h^2} \frac{\partial h}{\partial S} \right] + \\ &\frac{1}{g} \left[ \frac{1}{(b + mh)h} \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{Q(b + 2mh)h}{(b + mh)^2 h^2} \frac{\partial h}{\partial t} \right] + \frac{Q|Q|}{c^2 (b + mh)^2 h^2 R} + \frac{qQ}{g (b + mh)^2 h^2}, \\ \frac{\Delta h}{\Delta t} &= - \frac{1}{b + 2mh} \left[ q + \frac{\Delta Q}{\Delta S} \right] \end{aligned} \quad (2.13)$$

Принимая  $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$  по формуле Манинга

$$C^2 R = \frac{1}{n^2} \sqrt{\frac{(b + mh)^4 h^4}{(b + 2h\sqrt{1 + m^2})^4}}$$

Систему уравнений (2.13) преобразуем относительно зависимых переменных расхода воды  $Q$  и глубины потока  $h$ , тогда

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} = gh(b+mh)i_0 - \frac{Q^2 n^2 g}{(b+mh)h^3 \sqrt{\frac{(b+mh)^4 h^4}{(b+2h\sqrt{1+m^2})^4}}} - \frac{2Q}{(b+mh)h} \frac{\partial Q}{\partial S} - \\ - gh(b+mh) \left[ 1 - \frac{(b+2mh)Q^2}{g(b+mh)^3 h^3} \right] \frac{\partial h}{\partial S} - \frac{2qQ}{(b+mh)}, \\ \frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{1}{(b+2mh)} \left[ q + \frac{\partial Q}{\partial S} \right] \end{aligned} \quad (2.14)$$

Система уравнений (2.14) характеризуется динамикой изменения  $Q$  и  $h$  в канале трапецидальной формы сечения при изменении режима эксплуатации насосных станций рис. 2.1 и насосной установки 2.3.

Принимая  $m=0$  для прямоугольной формы сечения канала имеем следующую динамику изменения для  $Q$  и  $h$ , аналогичную зависимость, которая приведена ниже

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} = ghbi_0 - \frac{2Q}{bh} \frac{\partial Q}{\partial S} - \frac{Q^2 n^2 g}{hb^3 \sqrt{\frac{b^4 h^4}{(b+2h)^4}}} - bgh \left( 1 - \frac{Q^2}{gb^2 h^3} \right) \frac{\partial h}{\partial S} - 2q \frac{Q}{bh}, \\ \frac{\partial h}{\partial S} = -\frac{1}{b} \left( q + \frac{\partial Q}{\partial S} \right) \end{aligned} \quad (2.15)$$

и для случая  $b=0$  треугольной формы сечения канала имеем

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = gmh^2 i_0 - \frac{Q^2 n^2 g}{mh^3 \sqrt{\frac{m^4 h^4}{16(\sqrt{1+m^2})^4}}} - \frac{2Q}{mh^2} \frac{\partial Q}{\partial S} - gmh^2 \left[ 1 - \frac{2Q^2}{gm^2 h^5} \right] \frac{\partial h}{\partial S} - \frac{2qQ}{mh^2},$$

по А-А

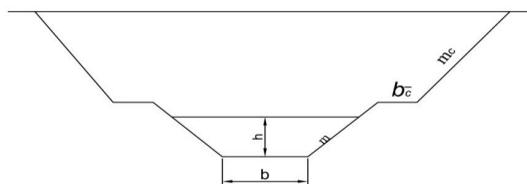


Рисунок 2.2. Поперечное сечение канала

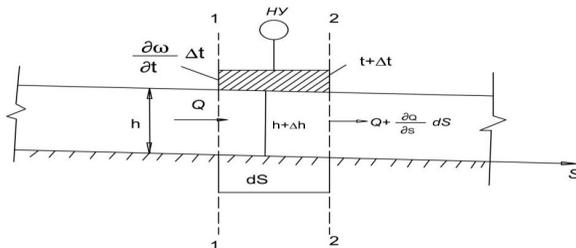


Рисунок 2.3. Гидравлическая схема возникновения неустановившегося движения воды в канале, вызванное режимом работы насосной установки расположенной вдоль канала

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{1}{2mh} \left[ q + \frac{\partial Q}{\partial S} \right] \quad (2.16)$$

Дифференциальные уравнения (2.14), (2.15), (2.16) являются математическими моделями неустойчившегося движения воды в канале с машинным водоподъёмом. Эти уравнения слишком сложны для решения аналитическими способами. Для численного решения уравнений (2.16), (2.17), (2.18) выражаемые через дискретные зависимости [2,5].

## 2.2. Численное решение уравнения неустойчившегося движения.

Для замены системы дифференциальных уравнений (2.14), (2.15), (2.16) алгебраическими зависимостями в форме конечных разностей выражение производных описываем с помощью дискретных функций.

Принимая расчётную сетку с шагами  $\Delta L = \frac{L}{N}$ ,  $\tau = \frac{T}{M}$  соответственно по координатам  $S$  и  $t$ , имеем функцию  $Q_{i,k}$  и  $h_{i,k}$ , определенную в узлах  $(i,k)$  сетки

$\bar{\Delta}_{Li,\tau} = \{(i\Delta L, k\tau), 0 \leq k \leq M, 1 \leq i \leq N\}$ , которая является приближенными функциями

$Q$  и  $h$   $\bar{\Delta}_{Li,\tau}$ . Заменяем производные разностями отношениями

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \approx \frac{Q_{ik+1} - Q_{ik}}{\tau}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} \approx \frac{h_{ik+1} - h_{ik}}{\tau}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial S} \approx \frac{Q_{i+1,k} - Q_{i-1,k}}{2\Delta L}$$

$$\frac{\partial h}{\partial S} \approx \frac{h_{i+1,k} - h_{i-1,k}}{2\Delta L}$$

Подставляя эти соотношения вместо соответствующих производных в (2.14), (2.15), (2.16) получим явную схему:

$$\begin{aligned} Q_{i,k+1} - Q_{ik} &= \tau [g i_0 (b + mh_{ik}) h_{ik} - \frac{Q_{ik} / Q_{ik} / n^2 g}{(b + mh_{ik}) h_{ik} \sqrt{\frac{(b + mh_{ik})^4 h_{ik}^4}{(b + 2h_{ik} \sqrt{1 + m^2})^4}}} - \\ &- \frac{2Q_{ik}}{(b + mh_{ik}) h_{ik}} \frac{Q_{i+1,k} - Q_{i-1,k}}{2\Delta L} - gh_{ik} ((b + mh_{ik}) [1 - \frac{(b + 2mh_{ik}) Q_{ik} | Q_{ik} |}{gh_{ik}^3 (b + mh_{ik})^3}] \times \\ &\times \frac{h_{i+1,k} - h_{i-1,k}}{2\Delta L} - \frac{2qQ_{ik}}{(b + mh_{ik}) h_{ik}}], \\ h_{ik+1} - h_{ik} &= \tau \left[ -\frac{1}{(b + 2mh_{ik})} \left( q + \frac{Q_{i+1,k} - Q_{i-1,k}}{2\Delta L} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.17)$$

При  $m=0$ , получим

$$\begin{aligned} Q_{i,k+1} - Q_{ik} &= \tau [gbh_{ik} i_0 - \frac{Q_{ik} / Q_{ik} / gn^2}{h_{ik} 6R^{4/3}} - 2 \frac{Q_{ik}}{bh_{ik}} \frac{Q_{i+1,k} - Q_{i-1,k}}{2\Delta L} - \frac{2Q_{ik}}{bh_{ik}} q - \\ &- gbh_{ik} (1 - \frac{Q_{ik} | Q_{ik} |}{bh_{ik}^3 g}) \frac{h_{i+1,k} - h_{i-1,k}}{2\Delta L}], \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$h_{i,k+1} - h_{ik} = -\tau \frac{1}{b} \left[ q + \frac{Q_{i+1,k} - Q_{i-1,k}}{2\Delta L} \right]$$

При  $b = 0$ , получим

$$\begin{aligned} Q_{ik+1} - Q_{ik} &= \tau \left[ gmh_{ik}^2 i_0 - \frac{Q_{ik} |Q_{ik}| n^2 g}{mh_{ik}^2 \sqrt{\frac{m^4 h_{ik}^4}{16(1+m^2)^2}}} - \frac{2Q_{ik} Q_{i+1,k} - Q_{i-1,k}}{2\Delta L} \right] \\ &- gmh_{ik}^2 \left[ 1 - \frac{2Q_{ik}^2}{gm^2 h_{ik}^3} \right] \times \frac{h_{i+1,k} - h_{ik}}{2\Delta L} - \frac{2q}{mh_{ik}^2} Q_{ik}, \\ h_{ik} - h_{ik} &= -\tau \frac{1}{2mh_{ik}} \left[ q + \frac{Q_{i+1,k} - Q_{i-1,k}}{2\Delta L} \right] \end{aligned} \quad (2.19)$$

где  $i = 1, 2, 3 \dots$  - номер точки по длине  $S$  участка канала,  
 $k = 0, 1, \dots$  - дискретный момент времени,  
 $Q_{n,k}$  - значение расхода в  $n$ -ой точке в момент  $k$ ,  
 $h_{nk}$  - значение глубины воды в  $n$ -ой точке в момент  $k$ ,  
 $\tau$  - шаг дискретизации по времени,  
 $i_0$  - уклон дна русла,  
 $q$  - интенсивного бокового водозабора.

В месте сопряжения  $i, (i+1)$ , т.е. расположения насосной установки используются условия сопряжения в виде равенства уровней и баланса расхода воды.

$$h_1(i+1, k) = hN(i, k), Q_1(i+1, k) = Q_n(i, k) \quad (2.20)$$

Во избежание накопления ошибок, глубину вдоль канала корректировали таким образом, чтобы сохранился баланс объёма воды в канале. При этом использовано

$$\frac{\partial V}{\partial t} = Q_{1,k+1} - (Q_{N,k+1} - q_{k+1}) \quad (2.21)$$

или

$$\sum_{i=1}^N \frac{[b + m(h_{i,k+1} - h_{ik})](h_{i+1,k} - h_{ik})}{\tau} \Delta L = Q_{1,k+1} - (Q_{N,k+1} + q_{k+1}) \quad (2.22)$$

где  $\Delta L$  - значение шага по пространственной координате,  
 $q_{k+1}$  - погонный расход насосной установки на 1 м длины канала, м<sup>3</sup>/с.  
 Граничные условия задаются на концах канала:

$$Q_{1,k} = Q_{НС.N2,k}, Q_{N,k} = Q_{НС.N2,k} - q \quad (2.23)$$

Начальные состояния определяются исходя неустойчившегося движения воды в канале.

### 2.3. Установление начальных условий для решения уравнения неустойчившегося движения воды.

Установившейся режим движения воды в канале с машинным водоподъёмом можно найти с помощью систем уравнений (2.14), (2.15), (2.16), которые могут быть записаны для  $h(S)$ ,  $Q(S)$  в виде:

$$\frac{\partial Q}{\partial S} = -q \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial S} &= \left[ gh(b+mh)i_0 - \frac{Q^2 n^2 g}{(b+mh)h_3 \sqrt{\frac{(b+mh)^4 h^4}{(b+2h\sqrt{1+m^2})^4}}} \right] \times \\ &\times \left[ gh(b+mh) \left( 1 - \frac{(b+2mh)Q^2}{g(b+mh)^3 h^3} \right) \right]^{-1} \end{aligned}$$

при  $m=0$  - прямоугольная форма сечения канала

$$\frac{\partial Q}{\partial S} = -q$$

$$\frac{\partial h}{\partial S} = \left[ gbh_{,0} - \frac{Q^2 n^2 g}{bh_3 \sqrt{\frac{b^4 h^4}{(b+2h)^4}}} \right] \left[ gbh(1 - \frac{Q^2}{gb^2 h^3}) \right]^{-1} \quad (2.25)$$

при  $b=0$  - треугольная форма сечения канала

$$\frac{\partial Q}{\partial S} = -q$$

$$\frac{\partial h}{\partial S} = \left[ gmh^2_{,0} - \frac{Q^2 n^2 g}{mh2_3 \sqrt{\frac{m^4 h^4}{16(1+m^2)^2}}} \right] \left[ gmh^3(1 - 2\frac{Q^2}{gm^2 h^2}) \right]^{-1} \quad (2.26)$$

Установившее значение  $Q(S)$ ,  $h(S)$  не представляют трудности для их определения задаются граничные условия  $Q(O)$ ,  $h(O)$  и по ним легко вычисляются остальные значения  $Q$  и  $h$  также легко вычисляются из систем уравнений (2.14), (2.15), (2.16) таблица 2.2. Полученные уравнения неустановившегося движения воды в канале с машинным водоподъёмом, а также способ численной реализации используются в дальнейшем для составления и решения линейного уравнения, описавшего случайные изменения взаимосвязанных величин  $Q$ /расход воды/ и  $h$ /глубины потока/.

Таблица 2.1. Параметры участка канала между насосными станциями № 1 и № 2 каскада Каршинского магистрального канала [24, 31, 32, 33, 34, 35]

Длина участка, м	Тип обливовки канала	Форма поперечного сечения	Уклон	Расход м <sup>3</sup> /с	Коэффициент шероховатости	Ширина канала по дну	Глубина наполнения	Коэффициент откоса
18900	Бетонированный	Трапецидальный	0,00015	114,3	0,017	7,0	6,0	2,5

Таблица 2.2. Переходный процесс из участка машинного канала между насосными станциями № 1 и № 2

$t$ $L$	0		42		63		84		105		126	
	$Q$	$h$										
0	114,30	6,000	114,30	5,971	114,30	5,980	114,30	5,970	114,30	5,978	114,30	5,979
2100	114,30	6,000	113,70	5,968	114,37	5,993	114,30	5,974	114,32	5,980	114,30	5,981
4200	114,30	6,000	113,65	5,975	114,48	6,004	114,31	5,981	114,37	5,982	114,30	5,985
6300	114,30	6,000	113,59	5,993	114,52	6,001	114,10	5,985	114,35	5,992	114,31	5,991
8400	114,30	6,000	113,30	5,999	114,60	6,017	113,92	5,992	114,39	5,999	114,30	5,997
10500	114,30	6,000	112,96	6,030	114,73	6,022	113,86	5,999	114,40	6,001	114,30	6,004
12600	114,30	6,000	112,50	6,010	114,59	6,025	113,74	6,004	114,37	6,009	114,30	6,006
14700	114,30	6,000	112,97	6,008	114,45	6,041	113,52	6,008	114,34	6,012	114,30	6,009
16800	114,30	6,000	113,5	6,012	114,28	6,023	113,93	6,014	114,31	6,007	114,30	6,011
18900	114,30	6,000	114,30	6,006	114,30	6,010	114,30	6,019	114,30	6,005	114,30	6,007

### Глава 3. ИЗМЕНЕНИЕ РАСХОДА И ГЛУБИНЫ ПОТОКА В КАНАЛЕ С МАШИНЫМ ВОДОПОДЪЕМОМ ПРИ СЛУЧАЙНОМ ИЗМЕНЕНИИ РЕЖИМА ЭКСПЛУАТАЦИИ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

#### 3.1. Вывод основного уравнения изменения расхода и глубины, обусловленное случайным режимом эксплуатации насосной станции.

Задача установления взаимосвязанных величин расхода воды  $Q$  и глубины потока  $h$  при случайно изменяющихся условиях многообразна, для условия машинного водоподъема рассмотрим одну из задач, когда режим эксплуатации насосных станций изменится как некоторый марковский процесс. Пусть насосная станция с производительностью  $Q(t)$  определяется состоянием  $Y(t)$  и принимает значение  $Y(t) k=0,1$ . Вероятность нахождения насосных агрегатов в одном из состояний обозначим

$P_1(t)=P\{Y(t)=0\}$  насосная станция не работает

$P_2(t)=P\{Y(t)=1\}$  насосная станция работает.

Принятые вероятности можно описать следующей системой линейных дифференциальных уравнений [8].

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = -aP_1(t) + \epsilon P_2(t) \quad (3.1)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = aP_1(t) - \epsilon P_2(t)$$

Коэффициенты  $a^{-1} = \langle T_1 \rangle$  и  $\epsilon^{-1} = \langle T_2 \rangle$  выражают время нахождения насосной станции в одном из состояний. Используя зависимости (1.5), (1.6), рассмотрим системы уравнений (2.14), (2.15), (2.16) при этом случайность выражается величиной  $Q_k^{nc}$  – производительностью насосных станций.

Насосная станция может находиться в начале, вдоль или в конце канала. Исследуем случай, когда имеется два различных состояния работы насосных станций и вероятность каждого состояния определяется системой уравнений (3.1), тогда  $Q_k^{nc}$ ,  $q_k$  принимают два решения  $Q_k^{nc}=1$ ,  $q_k=1$  и  $Q_k^{nc}=0$ ,  $q_k=0$ . Для установления влияния  $Q_k^{nc}$ ,  $q_k$  на значение  $Q$  и  $h$  решается система уравнений (2.14), (2.15), (2.16) при различных значениях  $Q_k^{nc}$ ,  $q_k$ .

Установившееся решение системы уравнений (2.14), (2.15) и (2.16) можно определить непосредственно из этих систем или же из уравнений (2.23), (2.24), (2.25). Возникает вопрос об определении явного вида оператора

$\frac{dF(X_k, Q_k)}{dx}$  из системы моментных уравнений

$$\frac{dM_k}{dt} = \frac{dF(X_k, Y_k)}{dx} M_k + P_k(t)(F(X_k, Y_k) - \frac{dF(X_k, Y_k)X_k}{dx}) + \sum_{s=1}^n a_{ks} M_s \quad (3.2)$$

$k = 0, 1$

где  $Y(t) = 0$  или  $Y(t) = 1$  для чего необходимо линеаризовать системы (2.14), (2.15), (2.16) и найти систему уравнений в вариациях.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \delta Q}{\partial t} = & \left[ -\frac{2n^2 g Q}{(b+mh)h^3 \sqrt{\frac{(b+mh)^4 h^4}{(b+2h\sqrt{1+m^2})^4}}} - \frac{2}{(b+mh)h} \frac{\partial Q}{\partial S} + 2 \frac{(b+2mh)Q}{(b+mh)^2 h^2} \frac{\partial h}{\partial S} - \right. \\
 & \left. - \frac{2q}{(b+mh)h} \right] \\
 (SQ - PQ) - & \frac{2Q}{(b+mh)h} \frac{\partial(SQ - PQ)}{\partial S} + [g i_0 (b+2mh) - Q^2 n^2 g^2 \\
 & \left[ \frac{(7b+14mh)(b+2h\sqrt{1+m^2}) - 8h\sqrt{1+m^2}(b+mh)}{3h^{10/3}(b+mh)^{10/3}} \right] \sqrt{b+2h\sqrt{1+m^2}} \\
 & + 2 \frac{(b+2mh)Q}{h^2 (b+mh)^2} \frac{\partial Q}{\partial S} - gb(1 - 2 \frac{mh}{b}) \frac{\partial h}{\partial S} + \frac{2Q^2 [(b+mh)mh - (b+2mh)^2]}{(b+mh)^3 h^3} \frac{\partial h}{\partial S} + \\
 & + 2qQ \frac{b+2mh}{(b+mh)^2 h^2} ] \times (\delta h - Ph) + \frac{(b+2mh)Q^2}{(b+mh)^2 h^2} \frac{\partial}{\partial S} (\delta h - Ph) - \\
 & - gh[b+mh] \frac{\partial}{\partial S} (\delta h - Ph), \\
 \frac{\partial \delta h}{\partial t} = & -\frac{1}{b+2mh} \frac{\partial}{\partial S} (\delta Q - PQ) + \frac{2m}{(b+2mh)^2} \left[ q + \frac{\partial Q}{\partial S} \right] (\delta h - Ph) \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

Обозначив  $\langle \delta Q \rangle = Q'$ ,  $\langle \delta h \rangle = h'$ , а также с учётом  $m' = \sqrt{1+m^2}$  получим:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial Q'}{\partial t} = & \left[ -\frac{2n^2 g Q}{(b+mh)h^3 \sqrt{\frac{(b+mh)^4 h^4}{(b+2m'h)^4}}} - \frac{2}{(b+mh)h} \frac{\partial Q}{\partial S} + 2 \frac{(b+2mh)Q}{(b+mh)^2 h^2} \frac{\partial h}{\partial S} - \right. \\
 & \left. - \frac{2q}{(b+mh)h} \right] \\
 (Q' - PQ) - & \frac{2Q}{(b+mh)h} \frac{\partial(Q' - PQ)}{\partial S} + [g i_0 ((b+2mh) - Q^2 n^2 g \times \\
 & \times \left[ \frac{(7b+14mh)(b+2m'h) - 8hm'(b+mh)}{3h^{10/3}(b+mh)^{10/3}} \right] \sqrt{(b+2m'h)}] + 2 \frac{(b+2mh)Q}{h^2 (b+mh)^2} \frac{\partial Q}{\partial S} - \\
 & - gb(1 + 2 \frac{mh}{b}) \frac{\partial h}{\partial S} + \frac{2Q^2 [(b+mh)mh - (b+mh)^2]}{(b+mh)^3 h^3} \frac{\partial h}{\partial S} + 2qQ \frac{b+2mh}{(b+mh)^2 h^2} ] \\
 & (h' - Ph) + \frac{(b+2mh)Q^2}{(b+mh)^2 h^2} \frac{\partial}{\partial S} (h' - Ph) - gh(b+mh) \frac{\partial}{\partial S} (h' - Ph) + \sum_{s=1}^n a_{ks} Q'_s \\
 \frac{\partial h'}{\partial t} = & -\frac{1}{b+2mh} \frac{\partial}{\partial S} (Q' - PQ) + \frac{2m}{(b+2mh)^2} \left[ q + \frac{\partial Q}{\partial S} \right] \times \\
 & \times (h' - Ph) + \sum_{s=1}^n a_{ks} h'_s / k = 0.1, \quad s = \overline{1, n} \quad (3.4)
 \end{aligned}$$

при  $m = 0$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial Q'}{\partial t} = & \left[ -\frac{2n^2 g Q}{bh^3 \sqrt{b'h^4(b+2h)^4}} - \frac{2}{bh} \frac{\partial Q}{\partial S} + 2 \frac{Q}{bh^2} \frac{\partial h}{\partial S} - \frac{2q}{bh} \right] (Q' - PQ) - \\
 & - b \frac{\partial}{\partial S} (Q' - PQ) + [gi_0 b - Q^2 n^2 g \frac{7b(b+2h) - 8hb^3 \sqrt{b} + 2h}{3(bh)^{10/3}} - \\
 & - 2 \frac{Q}{bh^2} \frac{\partial Q}{\partial S} - gb \frac{\partial h}{\partial S} - b \frac{2Q^2}{6h^3} \frac{\partial h}{\partial S} + 2qQ \frac{1}{bh^2}] (h' - Ph) + b \frac{Q^2}{6h^2} \frac{\partial}{\partial S} (h' - Ph) - \\
 & - ghb \frac{\partial}{\partial S} (h' - Ph) + \sum_{s=1}^n a_{ks} Q'_s \\
 \frac{\partial h'}{\partial t} = & - \frac{1}{b} \frac{\partial}{\partial S} (Q' - PQ) + \sum_{s=1}^n a_{ks} Q'_s \quad k = 0.1
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

при  $b = 0$  получим

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial Q'}{\partial t} = & \left[ -\frac{2n^2 g Q}{mh^2 \sqrt{m^4 h^4 (2m')^4}} - \frac{2}{mh^2} \frac{\partial Q}{\partial S} + 4 \frac{Q}{mh^3} \frac{\partial h}{\partial S} - \frac{2q}{mh^2} \right] (Q' - PQ) - \\
 & - \frac{2Q}{mh^2} \frac{\partial}{\partial S} (Q' - PQ) + [2gi_0 mh - Q^2 n^2 g \frac{28h^2 mm' - 8h^2 mm'^3 \sqrt{2m'h}}{3m^{10/3} h^{10/3}} - \\
 & - \frac{4Q}{mh^3} \frac{\partial Q}{\partial S} - 2gmh \frac{\partial h}{\partial S} - \frac{6Q^2}{mh^4} \frac{\partial h}{\partial S} + 4q \frac{Q}{mh^3}] (h' - Ph) + \frac{2Q^2}{mh^2} \frac{\partial}{\partial S} (h' - Ph) - \\
 & - gmh^2 \frac{\partial}{\partial S} (h' - Ph) + \sum_{s=1}^n a_{ks} Q'_s \\
 \frac{\partial h'}{\partial t} = & - \frac{1}{2mh} \frac{\partial}{\partial S} (Q' - PQ) + \frac{1}{2mh^2} \left[ q + \frac{\partial Q}{\partial S} \right] \times (h' - Ph) + \sum_{s=1}^n a_{ks} h'_s \quad k = 0.1
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Система (3.4), (3.5) и (3.6) является моментными уравнениями относительно частных моментов  $\langle SQ \rangle = Q'$  и  $\langle \delta h \rangle = h'$  и выражает случайные решения систем (2.14), (2.15) и (2.16) при случайной остановке и пуске насосных агрегатов.

### 3.2. Численное решение моментных уравнений.

Краевыми условиями для решения моментных уравнений установлено следующее: граничные условия, принимаются из (2.20), (2.21), (2.22), (2.23), а начальными условиями являются:

$$Q'(Q,S) = P(O)Q(O,S), \quad h'(O,S) = P(O)h(O,S)$$

$Q$  и  $h$  в уравнениях 3.3, 3.4 и 3.5 определяются из уравнений (2.14), (2.15), (2.16). Для решений уравнений (3.3), (3.4) и (3.5) при условии 3.6 и для области  $G_t = |O,T| \times |O,L|$ .  $G_t$  разбиваем на шаги

$\tau \frac{T}{M}$  и  $L_1 \frac{L}{N}$  и образуем прямоугольную сетку. Затем установим  $G_t = \{(k,j)L1\}$ ,  $0 \leq k \leq m$ ,  $0 \leq j \leq N$ ; в узлах

$(k, j)$  находим значение функции  $Q' [k,j]$  и  $h' [k,j]$ . Используя вычислительную схему принятой в (2.17), (2.18) и (2.19) можно написать:

$$\begin{aligned}
 Q'_{k+1,j} = Q'_{kj} + \tau \left\{ & - \frac{2Q_{kj}n^2g}{(b+mh_{kj})h_{kj}\sqrt{\frac{(b+mh_{kj})^4h_{kj}^4}{(b+2h_{kj}\sqrt{1+m^2})^4}}} - \frac{2}{h_{kj}(b+mh_{kj})} \times \frac{Q_{k+1} - Q_{kj-1}}{2L_1} \right. \\
 & + 2 \frac{(b+2mh_{kj})Q_{kj}h_{kj+1} - h_{kj-1}}{(b+mh_{kj})^2h_{kj}^2} \frac{h_{kj+1} - h_{kj-1}}{2L_1} - \frac{2q}{(b+mh_{kj})h_{kj}} (Q'_{kj} - P_{ik}Q_{kj}) - \\
 & - \frac{2Q_{kj}}{h_{kj}(b+mh_{kj})} \left( \frac{Q'_{kj} - Q'_{kj-1}}{2L_1} - P_{ik} \frac{Q_{kj+1} - Q_{kj-1}}{2L_1} \right) + [gi_0(b+2mh_{kj}) - \\
 & - Q_{kj}^2n^2g \frac{\sqrt{(b+2h_{kj}\sqrt{1+m^2})[7(b+2mh_{kj})(b+2h_{kj}\sqrt{1+m^2} - 8h_{kj}(b+mh_{kj})\sqrt{1+m^2}}]}{3h_{kj}^{10/3}} \\
 & + 2 \frac{(b+2mh_{kj})Q_{kj}Q_{kj+1} - Q_{kj-1}}{h_{kj}^2(b+mh_{kj})^2} \frac{h_{kj+1} - h_{kj-1}}{2L_1} - gb(1+2b) \frac{h_{kj+1} - h_{kj-1}}{2L_1} + \\
 & 2 \frac{Q_{kj}[(b+mh_{kj})mh_{kj} - (b+2mh_{kj})^2]}{(b+2mh_{kj})^3h_{kj}^3} \frac{h_{kj+1} - h_{kj-1}}{2L_1} + \\
 & - 2qQ_{kj} \frac{b+2mh_{kj}}{(b+2mh_{kj})^2h_{kj}^2}] \times (h'_{kj} - P_{ik}h_{kj}) - gh_{kj}(b+mh_{kj}) \left( \frac{h'_{kj+1} - h'_{kj-1}}{2L_1} - \right. \\
 & \left. - P_{ik} \frac{h_{kj+1} - h_{kj-1}}{2L_1} \right) + \frac{(b+2mh_{kj})Q_{kj}^2}{(b+mh_{kj})^2h_{kj}^2} \left( \frac{h'_{kj+1} - h'_{kj-1}}{2L_1} - P_{ik} \frac{h_{kj+1} - h_{kj-1}}{2L_1} \right) + \sum_{s=1}^n \prod_{ks} Q_s \} \\
 h'_{k+1,j} = h'_{ikj} - \tau \left[ & \frac{1}{(b+2mh_{kj})} \left( \frac{Q'_{kj+1} - Q'_{kj-1}}{2L_1} - P_{ik} \frac{Q_{kj+1} - Q_{kj-1}}{2L_1} \right) + 2m \frac{\left[ q + \frac{Q_{kj+1} - Q_{kj-1}}{2L_1} \right]}{(b+2mh_{kj})^2} \right] \quad (3.7) \\
 & (h'_{kj} - P_{ik}h_{kj}) + \sum_{s=1}^n \prod_{ks} Q_s \quad k=0, M, i=\overline{1,3}, j=\overline{1, N}
 \end{aligned}$$

При  $m=0$  получится

$$\begin{aligned}
 Q'_{k+1,j} = Q'_{kj} + \tau \left\{ & \left[ - \frac{2Q_{kj}n^2g}{bh_{kj}\sqrt[3]{b^4h_{kj}^4(b+2h_{kj})^{-4}}} - \frac{1}{bh_{kj}} \frac{Q_{kj+1} - Q_{kj-1}}{L_1} + \right. \\
 & \left. + \frac{Q_{kj}}{bh_{kj}^2} \frac{h_{kj+1} - h_{kj-1}}{L_1} - b \frac{2q}{\sigma h_{kj}} \right] \times \\
 & \times (Q'_{kj} - P_{ik}Q_{kj}) - \frac{2Q_{kj}}{bh_{kj}} \left( \frac{Q'_{kj+1} - Q'_{kj-1}}{2L_1} - P_{ik} \frac{Q_{kj+1} - Q_{kj-1}}{2L_1} \right) + [gi_0b - Q_{kj}^2n^2g \\
 & \frac{\sqrt[3]{b+2h_{kj}}[7b(b+2h_{kj}) - 8h_{kj}b]}{3h_{kj}^{10/3}b^{10/3}} + \frac{Q_{kj}}{h_{kj}^2b} \frac{Q_{kj+1} - Q_{kj-1}}{L_1} - \\
 & - gb \frac{h_{kj+1} - h_{kj-1}}{2L_1} - \frac{Q_{kj}^2}{bh_{kj}^3} \left( \frac{h_{kj+1} - h_{kj-1}}{L_1} \right) + 2qQ_{kj} \frac{1}{bh_{kj}^2}] (h_{kj} - P_{ik}h_{kj}) + \\
 & + \left( \frac{Q^2}{bh_{kj}^2} - gbh_{kj} \right) \times \left( \frac{h'_{kj+1} - h'_{kj-1}}{2L_1} - P_{ik} \frac{h_{kj+1} - h_{kj-1}}{2L_1} \right) + \sum_{s=1}^n a_{ks} Q_s \} \\
 h'_{k+1,j} = h'_{ikj} - \tau \left[ & \frac{1}{b} \left( \frac{Q'_{kj+1} - Q'_{kj-1}}{2L_1} - P_{ik} \frac{Q_{kj+1} - Q_{kj-1}}{2L_1} \right) + \sum_{s=1}^n a_{ks} h'_s \right] \quad (3.8) \\
 & k=0/\overline{M}; i=\overline{1,3}; j=\overline{1, N}
 \end{aligned}$$

При  $b = 0$

$$\begin{aligned}
 Q'_{k+1,j} &= Q'_{kj} + \tau \left\{ - \frac{2Q_{kj} n^2 g}{mh_{kj}^3 \sqrt{m^4 h^4 kj (16)^{-1} (\sqrt{1+m^2})^{-4}}} - \frac{2}{2L_1} \frac{Q_{kj+1} - Q_{kj-1}}{2L_1} + \right. \\
 &\quad \left. + 4 \frac{Q_{kj}}{mh_{kj}^3} \frac{h_{kj+1} - h_{kj-1}}{2L_1} - \frac{2q}{mh_{kj}^2} \right\} \\
 (Q'_{kj} - P_{ik} Q'_{kj}) &- \frac{2Q_{kj}}{mh_{kj}^2} \left( \frac{Q'_{kj+1} - Q'_{kj-1}}{2L_1} - P_{ik} \frac{Q_{kj+1} - Q_{kj-1}}{2L_1} \right) + [2gi_0 mh_{kj} - Q_{kj}^2 n^2 g \\
 &\quad - \frac{\sqrt[3]{2h_{kj} \sqrt{1+m^2}} [4mh_{kj}^2 \cdot 5\sqrt{1+m^2}]}{3h_{kj}^{10/3} m^{10/3}} + 4 \frac{Q_{kj}}{mh_{kj}^3} \frac{Q_{kj+1} - Q_{kj-1}}{2L_1} - \\
 &\quad - gmh_{kj} \frac{h_{kj+1} - h_{kj-1}}{L_1} - \frac{6Q_{kj}^2}{mh_{kj}^4} \frac{h_{kj+1} - h_{kj-1}}{2L_1} + \frac{4qQ_{kj}}{mh_{kj}^3}] (h'_{kj} - P_{ik} h_{kj}) \\
 &\quad gmh_{kj}^2 \left( \frac{h_{kj+1} - h_{kj-1}}{2L_1} - P_{ik} \frac{h_{kj+1} - h_{kj-1}}{2L1} \right) + \frac{2Q_{kj}^2}{mh_{kj}^5} \left( \frac{h_{kj+1} - h_{kj-1}}{2L_1} - P_{ik} \frac{h_{kj+1} - h_{kj-1}}{2L1} \right) \\
 &\quad + \sum_{s=1}^n \prod_{kS} Q'_S \}, \\
 h'_{k+1,j} &= h'_{kj} - \tau \left\{ \frac{1}{2mh_{kj}} \left( \frac{Q'_{kj+1} - Q'_{kj-1}}{2L_1} - P_{ik} \frac{Q_{kj+1} - Q_{kj-1}}{2L_1} \right) + \frac{\left[ q + \frac{Q_{kj+1} - Q_{kj-1}}{2L_1} \right]}{2mh_{kj}^2} (h'_{kj} - P_{ik} h_{kj}) + \sum_{s=1}^n \prod_{kS} h'_S \right\} \\
 &\quad k = \overline{0, M}; j = \overline{1, N}; i = \overline{1, 3} \tag{3.9}
 \end{aligned}$$

Система уравнений (3.7), (3.8) и (3.9) содержат множество сложных параметров, что естественно осложняет вычислительный процесс. Для упрощения вычисления вводим в системы уравнений коэффициенты, характеризующие взаимосвязанные гидравлические параметры канала. При численном решении моментных уравнений (3.7), (3.8) и (3.9) сначала вычисляют коэффициенты систем моментных уравнений, затем искомые величины  $Q'$  и  $h'$ . Обозначая:

$$\begin{aligned}
 E_{k,j} &= - \frac{2Q_{kj} n^2 g}{(b + mh_{kj}) h_{kj}^3 \sqrt{\frac{(b + mh_{kj})^4 h_{kj}^4}{(b + 2h_{kj} \sqrt{1+m^2})^4}}} - \frac{2q}{(b + mh_{kj}) h_{kj}}; \\
 F_{k,j} &= - \frac{2}{h_{kj} (b + mh_{kj})} \frac{Q_{kj+1} - Q_{kj-1}}{2L_1} + \frac{2(b + mh_{kj}) Q_{kj}}{(b + mh_{kj})^2 h_{kj}^2} \frac{h_{kj+1} - h_{kj-1}}{2L_1}; \\
 \Delta_{kj} &= - \left( \frac{Q'_{kj+1} - Q'_{kj-1}}{2L_1} - P_{ik} \frac{Q_{kj+1} - Q_{kj-1}}{2L_1} \right) * \frac{2Q_{kj}}{(b + mh_{kj}) h_{kj}} \\
 n_{k,j} &= gi_0 (b + 2mh_{k,j}) - \\
 Q_{k,j}^2 n_g^2 &- \frac{\sqrt[3]{b + 2h \sqrt{1+m^2}} [7(b + mh_{k,j})(b + 2h_{k,j} \sqrt{1+m^2} - 8h_{kj} (b + mh_{k,j}) \sqrt{1+m^2})]}{3h_{k,j}^{10/3} (b + mh_{k,j})^{10/3}} \\
 &\quad + 2qQ_{k,j} \frac{b + 2mh_{k,j}}{(b + mh_{k,j})^2 h_{k,j}^2};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N_{k,j} &= 2 \frac{(b + 2mh_{k,j})Q_{k,j}}{h_{k,j}^2 (b + mh_{k,j})^2} \frac{Q_{k,j+1} - Q_{k,j-1}}{2L_1} - qb(1 + 2 \frac{mh_{k,j}}{b}) \frac{h_{k,j+1} - h_{k,j-1}}{2L_1} + \\
 &+ 2 \frac{Q_{k,j}^2 [(b + mh_{k,j})mh_{k,j} - (b + 2mh_{k,j})^2] h_{k,j+1} h_{k,j-1}}{(b + mh_{k,j})^3 h_{k,j}^3} \frac{1}{2L_1}; \\
 \Lambda_{k,j} &= \frac{h_{k,j+1}^1 - h_{k,j-1}^1}{2L_1} - P_{i,k} \frac{h_{k,j+1} h_{k,j-1}}{2L_1}; C_{k,j} = \frac{Q_{k,j+1}^1 - Q_{k,j-1}^1}{2L_1} - P_{i,k} \frac{Q_{k,j+1} - Q_{k,j-1}}{2L_1}; \\
 k &= \overline{O, M}, \quad j = \overline{1, N}, \quad i = \overline{1, 3}
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

При  $m = 0$

$$\begin{aligned}
 X1_{k,j} &= \frac{2Q_{k,j} n^2 g}{bh_{k,j}^3 \sqrt{\frac{b^4 h_{k,j}^4}{(b + 2h_{k,j})^4}}} - \frac{2g}{bn_{k,j}}; \\
 X2_{k,j} &= -\frac{1}{bh_{k,j}} \frac{Q_{k,j+1} - Q_{k,j-1}}{L_1} + \frac{Q_{k,j}}{bh_{k,j}^2} \frac{h_{k,j+1} - h_{k,j-1}}{L_1}; \\
 X3_{k,j} &= gi_0 b - Q_{k,j}^2 n^2 g \frac{\sqrt[3]{b + 2h_{k,j}} [7b(b + 2h_{k,j}) - 8h_{k,j} b]}{3h_{k,j}^{10/3} b^{10/3}} + 2qQ_{k,j} \frac{1}{bh_{k,j}^2}; \\
 k &= \overline{O, M}, j = \overline{1, N}, \quad i = \overline{1, 3}
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

При  $b=0$

$$\begin{aligned}
 Y1_{k,j} &= -\frac{2Q_{k,j} n^2 q}{mh_{k,j}^3 \sqrt{\frac{m^4 h_{k,j}^4}{16(\sqrt{1+m^2})^4}}} - \frac{2q}{mh_{k,j}^2}; \\
 Y2_{k,j} &= -\frac{2}{mh_{k,j}^2} \frac{Q_{k,j+1} - Q_{k,j-1}}{2L_1} + \frac{4Q_{k,j}}{mh_{k,j}^3} \frac{h_{k,j+1} - h_{k,j-1}}{2L_1}; \\
 Y3_{k,j} &= 2qi_0 mh_{k,j} - Q_{k,j}^2 n^2 n \frac{\sqrt[3]{2h_{k,j} \sqrt{1+m^2}} 20mh_{k,j}^2 \sqrt{1+m^2}}{3h_{k,j}^{10/3} m^{10/3}} + 4qQ_{k,j} \frac{1}{mh_{k,j}^3}; \\
 Y4_{k,j} &= 4 \frac{Q_{k,j}}{mh_{k,j}^3} \frac{Q_{k,j+1} - Q_{k,j-1}}{2L_1} - qmh_{k,j} \frac{h_{k,j+1} - h_{k,j-1}}{L_1} + \frac{6Q_{k,j}^2}{mh_{k,j}^4} \frac{h_{k,j+1} - h_{k,j-1}}{2L_1}; \\
 k &= \overline{O, M}, j = \overline{1, N}, \quad i = \overline{1, 3}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Получим упрощенные системы линейных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}
 Q_{k+1,j}^1 &= Q_{k,j}^1 + t[(E_{k,j} + F_{k,j})(Q_{k,j}^1 - P_{i,k} Q_{k,j}) + \Delta_{k,j} + (n_{k,j} + N_{k,j})(h_{k,j}^1 - P_{i,k} h_{k,j}) + \\
 &+ \left[ \frac{(b + 2mh_{k,j})Q_{k,j}^2}{(b + mh_{k,j})^2 h_{k,j}^2} - gh_{k,j} (b + mh_{k,j}) \right] \Lambda_{k,j} + \sum_{s=1}^n n_{k,s} Q_s^1] \\
 h_{k+1,j}^1 &= h_{k,j}^1 - t \left[ \frac{C_{k,j}}{(b + 2mh_{k,j})} + 2m \frac{\left[ q + \frac{Q_{k,j+1} - Q_{k,j-1}}{2L_1} \right]}{(b + 2mh_{k,j})^2} \right] (h_{k,j}^1 - P_{i,k} h_{k,j} + \sum_{s=1}^n n_{k,s} h_s^1)
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

При  $m=0$

$$\begin{aligned}
 Q_{k+1,j}^1 &= Q_{k,j}^1 + \tau \left[ (X1_{k,j} + X2_{k,j})(Q_{k,j}^1 - P_{i,k}Q_{k,j}) - \frac{2Q_{k,j}}{bh_{k,j}} C_{k,j} \left[ X3_{k,j} + \frac{Q_{k,j}}{h_{k,j}^2} \frac{\Delta Q_{k,j}}{L_1} - \right. \right. \\
 & \left. \left. gb \frac{h_{k,j+1} - h_{k,j-1}}{2L_1} - \frac{Q_{k,j}^2}{bh_{k,j}^3} \frac{h_{k,j+1} h_{k,j-1}}{L_1} \right] (h_{k,j}^1 - P_{i,k} h_{k,j}) + \left( \frac{Q_{k,j}^2}{bh_{k,j}^2} - gbh_{k,j} \right) \Lambda_{k,j} a_{k,s} Q_s^1 \right] \\
 h_{k+1,j}^1 &= h_{k,j}^1 - \tau \left[ (Y1_{k,j} + Y2_{k,j})(Q_{k,j}^1 - P_{i,k}Q_{k,j}) - \frac{2Q_{k,j} C_{k,j}}{mh_{k,j}^2} + \right. \\
 & \left. (Y3_{k,j} + Y4_{k,j})(h_{k,j}^1 - P_{i,k} h_{k,j}) + \left[ \frac{2Q_{k,j}^2}{mh_{k,j}^3} - gmh_{k,j}^2 \right] \Lambda_{k,j} + \sum_{s=1}^n n_{k,s} Q_s^1 \right] \\
 h_{k+1,j}^1 &= h_{k,j}^1 - \tau \left[ \frac{1}{2mh_{k,j}} C_{k,j} + \frac{\left[ q + \frac{Q_{k,j+1} - Q_{k,j-1}}{2L_1} \right]}{2mh_{k,j}^2} (h_{k,j}^1 - P_{i,k} h_{k,j}) + \sum_{s=1}^n n_{k,s} h_s^1 \right] \quad (3.15)
 \end{aligned}$$

Для решения системы моментальных уравнений рассмотрим участок Каршинского магистрального канала между насосными станциями №1 и №2.

Производительность первой насосной станции  $Q_{nc1}$  и второй насосной станции  $Q_{nc2}$  и расход воды в канале  $Q: Q_{nc1} = Q_{nc2} = Q = 114,3 \text{ м}^3/\text{с}$ , уклон дна канала  $i_0 = 0,00015$ ,  $b = 7,0 \text{ м}$ ,  $m = 2,5$ ,  $n = 0,017$ ,  $h = 6,0 \text{ м}$ . Многочисленные наблюдения за режимом работы насосных станций каскада Каршинского магистрального канала показывает, что продолжительность остановки всех агрегатов насосной станции любого подъема режима в среднем 7 мин.

Принимая начальные и граничные условия в виде:

$$\begin{aligned}
 Q^1(O,S) &= P(O)Q(O,S); & Q^1(t,O) &= 114,3 \text{ м}^3/\text{с}; \\
 h^1(O,S) &= P(O)h(O,S); & h^1(t,O) &= 6,0 \text{ м}.
 \end{aligned}$$

а также, используя вычислительную схему (3.7) при решении линейного дифференциального уравнения (3.13) находим расход  $Q^1$  и глубину  $h^1$  при случайной остановке и пуске насосной станции №2.

Численные решения моментных уравнений, описывающие неустойчившееся движения воды, обусловленные непредвиденной остановкой насосной станции №2, которые показали, что в подводящей части канала к ней происходит увеличение глубины потока с постепенным распространением этого процесса вдоль канала против течения воды. По классификационному признаку такой процесс относится к положительным волнам перемещения. Скорость распространения волны перемещения равнялась от 5,3 м/с до 5,9 м/с.

Многолетние наблюдения за режимом эксплуатации насосной станции показали, что в случае остановки насосной станции со случайным отключением электроэнергии, обслуживающий персонал затрачивает время для повторного пуска в среднем 7 минут. Учитывая это обстоятельство, было установлено среднее время пребывания насосной станции в нерабочем положении 420 с, затем осуществлялся повторный пуск, к моменту пуска были установлены, что фронт волны достигало расстояние 8400 м а ее максимальная высота равнялась 6,72 м (таблица 3.1), (рис.3.1., 3.2).

По условиям задачи принимая значение гидравлических элементов равной в данный момент времени осуществлен пуск насосной станции, т.е.  $Q = 114,3 \text{ м}^3/\text{с}$  по этой команде произведено численное решение моментных уравнений.

Результаты решения моментных уравнений дали следующую картину (таблица 3.2), (рис.3.3, 3.4), по которым видно, что в канале возникает отрицательная волна перемещения, при этом ее скорость распространения достигает  $5,2 \div 5,5 \text{ м/с}$ , через 315 с. отрицательная волна перемещения прекратилась и в канал движение воды перешло в установившееся состояние.

Хотя полученный вышеперечисленный результат подобен ранее известным данным [30,33], тем не менее, наши исследования открывают возможность в описании динамики проявлений вышеперечисленных параметров. Известные результаты давали лишь крайние значения гидравлических

параметров в канале при неустановившемся режиме движения воды и использовались они для установления проектных значений канала. Проведенные нами исследования открывают возможности в программном управлении потоком воды в канале при возникновении аварийной ситуации.

В следующем параграфе монографии приводятся количественные сравнения значений, полученных численным решением и с данными натуральных опытов.

Таблица 3.1. Решение моментных уравнений для канала трапецидального сечения  $Q_{ис2}=0$

Время Участок, м	21		42		63		84		105	
	м <sup>3</sup> /с	м	м <sup>3</sup> /с	м	м <sup>3</sup> /с	м	м <sup>3</sup> /с	м	м <sup>3</sup> /с	м
2100	114,40	6,01	114,40	6,01542	114,67	6,01	114,71	6,02	114,85	6,02
4200	114,40	6,01	114,50	6,02142	114,69	6,02	114,71	6,02	114,82	6,03
6300	114,40	6,02	114,53	6,03	114,69	6,03	114,71	6,03	114,89	6,03
8400	114,40	6,02	114,53	6,03	114,69	6,04	114,71	6,04	114,82	6,04
10500	114,40	6,03	114,53	6,04	114,69	6,04	114,61	6,05	114,82	6,05
12600	114,40	6,02	114,53	6,05	114,69	6,05	114,61	6,06	114,89	6,06
14700	114,40	6,04	114,53	6,04	114,69	6,06	114,61	6,06	114,80	6,07
16800	114,40	6,06	114,53	6,07	114,69	6,07	114,61	6,07	114,17	6,07
18900	114,40	6,07	114,57	6,10	114,06	6,13	114,35	6,16	114,84	6,20
2100	114,92	6,02	115,06	6,03	115,13	6,03	115,23	6,03	115,34	6,04
4200	114,69	6,03	115,02	6,03	115,13	6,04	115,23	6,04	115,34	6,04
6300	114,62	6,04	115,01	6,04	115,15	6,04	115,23	6,05	115,34	6,05
8400	114,93	6,05	115,01	6,04	115,16	6,05	115,25	6,06	115,34	6,06
10500	114,93	6,05	115,01	6,06	115,15	6,06	115,25	6,06	115,34	6,07
12600	114,93	6,06	115,01	6,07	115,15	6,07	115,23	6,07	115,34	6,07
14700	114,93	6,07	115,01	6,07	115,13	6,08	115,23	6,08	115,34	6,08
16800	114,92	6,08	115,03	6,08	115,13	6,08	115,23	6,08	115,33	6,09
18900	114,93	6,23	115,03	6,26	115,13	6,26	115,24	6,33	115,35	6,36
2100	115,44	6,04	115,53	6,04	115,65	6,05	115,75	6,06	115,86	6,05
4200	115,40	6,05	115,52	6,05	115,65	6,05	115,75	6,06	115,85	6,06
6300	115,43	6,05	115,54	6,06	115,67	6,06	115,75	6,06	115,85	6,07
8400	115,44	6,06	115,54	6,06	115,78	6,07	115,79	6,07	115,85	6,07
10500	115,47	6,07	115,54	6,07	115,77	6,08	115,75	6,08	115,84	6,63
12600	115,44	6,08	115,54	6,08	115,65	6,08	115,78	6,08	115,85	6,08
14700	115,44	6,09	115,54	6,09	115,66	6,09	115,75	6,09	115,85	6,11
16800	115,44	6,09	115,54	6,09	115,66	6,09	115,75	6,11	115,84	6,09
18900	115,45	6,39	115,56	6,43	115,66	6,46	115,77	6,50	115,88	6,53
2100	115,96	6,06	116,06	6,06	116,06	6,06	116,26	6,07	116,37	6,07
4200	115,97	6,07	116,06	6,06	116,16	6,07	116,27	6,07	116,37	6,07
6300	115,97	6,08	116,06	6,07	116,16	6,08	116,27	6,08	116,37	6,08
8400	115,96	6,09	116,06	6,08	116,16	6,08	116,29	6,09	116,37	6,09
10500	115,96	6,09	116,06	6,09	116,16	6,09	116,27	6,08	116,37	6,10
12600	115,96	6,09	116,06	6,10	116,16	6,10	116,27	6,10	116,37	6,10
14700	115,96	6,10	116,06	6,10	116,16	6,11	116,27	6,11	116,37	6,11
16800	115,96	6,09	116,05	6,10	116,15	6,10	116,25	6,10	116,35	6,10
18900	115,98	6,57	116,09	6,60	116,20	6,64	116,30	6,67	116,41	6,71

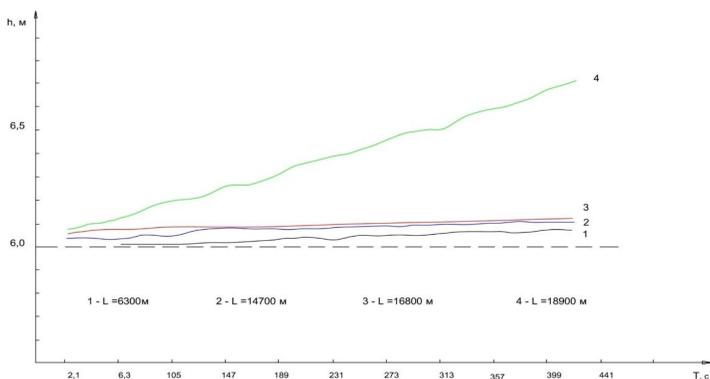


Рисунок 3.1. Изменение горизонта воды в канале после остановки НС-2.

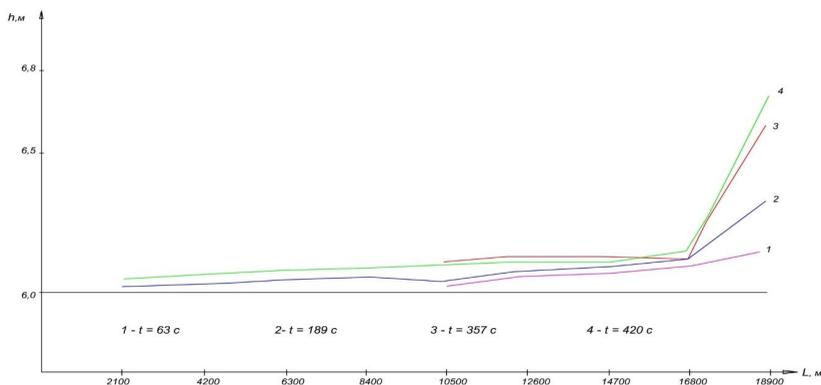


Рисунок 3.2. Изменение глубины потока вдоль канала после остановки НС-2

Таблица 3.2. Решение моментных уравнений для канала трапецеидального сечения (при  $Q_{НС2}=114,3 \text{ м}^3/\text{с}$ )

Время	21		48		68		84		105		126	
	м <sup>3</sup> /с	м										
2100	114,76	6,18	114,52	6,17	114,28	6,16	114,04	6,14	113,79	6,13	113,50	6,12
4200	114,76	6,18	114,53	6,17	114,28	6,17	114,03	6,14	113,78	6,13	113,50	6,12
6300	114,76	6,17	114,53	6,17	114,28	6,16	114,03	6,14	113,79	6,13	113,50	6,12
8400	114,76	6,18	114,52	6,17	114,28	6,16	114,04	6,15	113,79	6,13	113,50	6,11
10300	114,76	6,17	114,52	6,17	114,28	6,16	114,03	6,14	113,79	6,13	113,50	6,12
12600	114,76	6,18	114,52	6,17	114,28	6,16	114,03	6,14	113,79	6,13	113,50	6,13
14700	114,76	6,18	114,52	6,17	114,28	6,16	114,03	6,14	113,79	6,13	113,50	6,12
16800	114,76	6,18	114,52	6,17	114,28	6,16	114,03	6,14	113,79	6,13	113,50	6,12
18900	114,76	6,18	114,53	6,17	114,28	6,16	114,03	6,13	113,79	6,12	113,50	6,10
2100	114,76	6,18	114,52	6,17	114,28	6,16	114,04	6,14	113,79	6,13	113,50	6,12
4200	114,76	6,18	114,53	6,17	114,28	6,17	114,03	6,14	113,78	6,13	113,50	6,12
6300	114,76	6,17	114,53	6,17	114,28	6,16	114,03	6,14	113,79	6,13	113,50	6,12
8440	114,76	6,18	114,52	6,17	114,28	6,16	114,04	6,15	113,79	6,13	113,50	6,11
10300	114,76	6,17	114,52	6,17	114,28	6,16	114,03	6,14	113,79	6,13	113,50	6,12
12600	114,76	6,18	114,52	6,17	114,28	6,16	114,03	6,14	113,79	6,13	113,50	6,13
14700	114,76	6,18	114,52	6,17	114,28	6,16	114,03	6,14	113,79	6,13	113,50	6,12
16800	114,76	6,18	114,52	6,17	114,28	6,16	114,03	6,14	113,79	6,13	113,50	6,12
18900	114,76	6,18	114,53	6,17	114,28	6,16	114,03	6,13	113,79	6,12	113,50	6,10

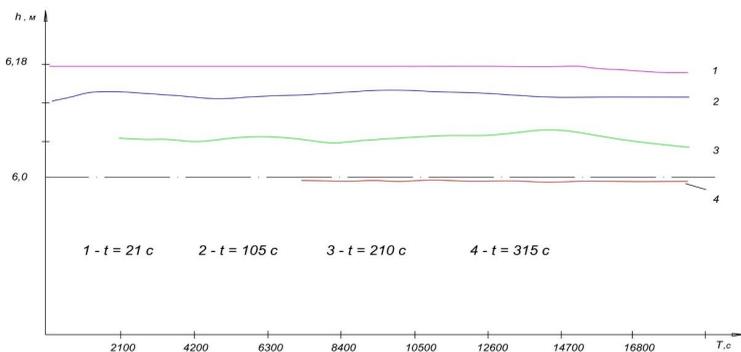


Рисунок 3.3. Изменение глубины потока вдоль канала после включения НС-2.

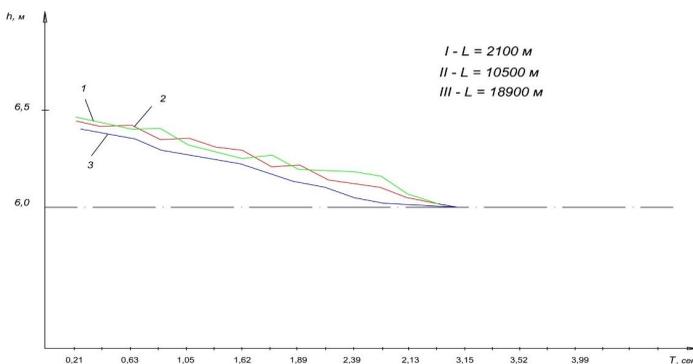


Рисунок 3.4. Изменение глубины потока воды вдоль канала после включения НС-2

### 3.3. Сопоставление результатов численного решения с данными натуральных опытов.

В [4,8,9] приведены результаты натуральных исследований по изучению неустановившегося режима движения воды в машинном канале при остановке агрегатов насосной станции №1 и №2.

Каршинский магистральный канал в своем составе имеет шесть последовательно расположенных насосных станций, которые поднимают Амударьинскую воду на 132 м. Движение воды канала определяется режимом эксплуатации насосных станций. Любая остановка агрегатов насосных станций приводит к возникновению неустановившегося движения воды в канале, что в свою очередь приводит к аварийным ситуациям. А таких остановок агрегатов насосных станций происходит регулярно, о чем свидетельствуют данные эксплуатации канала и каскада насосных станций таблица 3.3.

Для орошения более 200 тыс. га земель из реки Амударья забирается бесплатным способом и подается в Каршинский магистральный канал, который состоит из двух частей: головной и рабочей, связанный непосредственно с оросительной сетью.

Общая длина Головной части от реки Амударья до начало рабочей части составляет 77,6 км и рассчитана на пропуск нормального расхода  $175 \text{ м}^3/\text{с}$  и форсированного  $195 \text{ м}^3/\text{с}$ . Каршинский магистральный канал в своем составе имеет шесть последовательно расположенных насосных станций, которые поднимают Амударьинскую воду на 132 м. Движение воды канала определяется режимом эксплуатации насосных станций. Любая остановка агрегатов насосных станций приводит к возникновению неустановившегося движения воды в канале, что в свою очередь приводит к аварийным ситуациям. А таких остановок агрегатов насосных станций происходит регулярно, о чем свидетельствуют данные эксплуатации канала и каскада насосных станций таблица 3.3.

В связи с этим проведены натурные исследования неустановившихся процессов, возникающих в машинных каналах при отключении в пуске агрегатов станции, установление типа возникающих волн, процессе их формирования, трансформации и проверки надежности работы аппаратуры измерения.

Таблица 3.3. Количество остановок агрегатов каскада насосных станций Каршинского магистрального канала в среднем за год

Насосная станция	Насосные агрегаты	Причины, из-за которых произошли отключения				Итого
		Отсутствие энергии в линии электропередаче	Из-за кавитации	По техническим причинам	Из-за понижения уровня воды в нижнем бьефе	
I	НА-1	3	4	7	23	37
	НА-2	9	3	7	38	57
	НА-3	8	6	13	83	110
	НА-4	7	-	15	69	91
	НА-5	8	4	10	69	91
	НА-6	6	6	10	97	119
	<b>Итого</b>	<b>41</b>	<b>23</b>	<b>62</b>	<b>379</b>	<b>505</b>
II	НА-1	8	19	25	8	60
	НА-2	8	12	22	1	43
	НА-3	6	19	13	2	40
	НА-4	7	30	15	-	52
	НА-5	7	18	20	2	47
	НА-6	7	62	14	5	88
		<b>Итого</b>	<b>43</b>	<b>160</b>	<b>109</b>	<b>18</b>
III	НА-1	4	19	22	4	49
	НА-2	5	11	11	5	32
	НА-3	2	33	20	8	63
	НА-4	7	36	17	3	63
	НА-5	3	9	32	5	49
	НА-6	1	21	18	9	49
		<b>Итого</b>	<b>22</b>	<b>129</b>	<b>120</b>	<b>31</b>
IV	НА-1	1	10	15	3	30
	НА-2	4	9	11	-	24
	НА-3	4	9	12	-	25
	НА-4	3	1	9	1	14
	НА-5	4	2	14	-	20
	НА-6	6	4	16	2	27
		<b>Итого</b>	<b>22</b>	<b>36</b>	<b>77</b>	<b>6</b>
V	НА-1	3	12	30	3	86
	НА-2	1	4	11	1	17
	НА-3	5	3	23	2	33
	НА-4	4	3	22	1	30
	НА-5	-	3	17	3	23
	НА-6	3	11	18	2	34
		<b>Итого</b>	<b>16</b>	<b>36</b>	<b>129</b>	<b>12</b>
VI	НА-1	-	3	16	4	23
	НА-2	4	13	22	7	46
	НА-3	6	30	19	19	32
	НА-4	3	7	39	4	53
	НА-5	4	23	30	20	77
	НА-6	1	8	17	1	27
		<b>Итого</b>	<b>18</b>	<b>92</b>	<b>143</b>	<b>55</b>
	<b>Всего</b>	<b>162</b>	<b>476</b>	<b>690</b>	<b>504</b>	

Исследования установившегося процесса в канале проводились между насосными станциями №1 и №2. Используя параметры данного участка канала и принимая аналогичные условия, что и для натурального эксперимента производились вычисления значений моментных уравнений (3.7) на ЭВМ. По результатам численного и натурального экспериментов построен график (рис. 3.5).

Результаты численных экспериментов показали, что после случайной остановки насосной станции №2, горизонт воды в подводящем канале постепенно возрастает, наблюдается образование положительной восходящей волны перемещения и к моменту 420 с. происходило переполнение канала в контрольном створе перед насосной станцией №2. При этом при изменении горизонта воды в контролируемом створе не наблюдается колебание горизонта воды, т.е. уединенные или групповые гребни, это объясняется тем, что в численных расчетах поступление воды в аванкамеру из напорных водоводов упрощены, т.е., они просто прибавлены к общей массе в подводящем канале. А при проведение натуральных опытов спуск воды из напорных водоводов способствовали появлению колебаний –

образованию гребней в возрастающих горизонтах воды, с последующим затуханием за счет увеличения объема в аванкамере насосной станции №2. Характер изменения горизонта воды в контрольном створе в численных и натуральных экспериментах идентичны, исключение лишь составляют первые 20 с., т.е. период активного опорожнения объема напорного трубопровода. Расхождение численных значений экспериментов незначительны кроме начального участка они составляют в среднем 3 см.

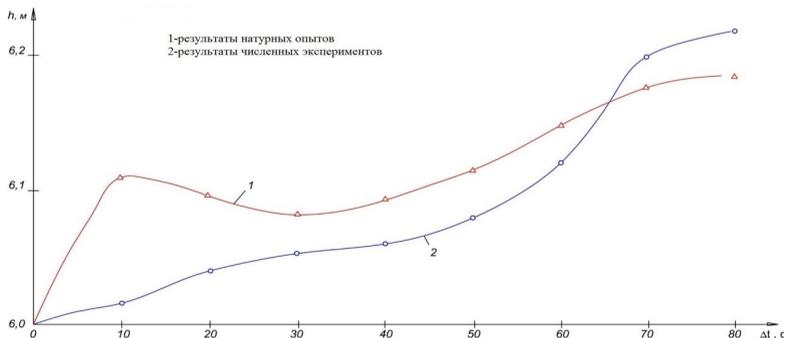


Рисунок 3.5. Изменение горизонта воды в канале после остановки НС-2 (контрольный створ перед НС-2)

## Глава 4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ В КАНАЛЕ

### 4.1. Постановка вопроса и задачи исследований.

Предложенные моментные уравнения, описывающие случайные приращения расхода и глубину потока в канале при случайном режиме эксплуатации насосных станций представляют довольно сложные математические зависимости. Для установления корректности полученной математической модели использованы два метода: лабораторный эксперимент и решение тестовой задачи. Исследование неустановившегося движения на лабораторной модели представляет довольно сложную задачу. В наших исследованиях работа задвижек, подводющих воду в установки, имитировали режим работы насосной станции в начале канала, а затвор в конце лотка режим работы насосной станции в конце канала.

Полное открытие затвора соответствует работе, а закрытие остановке насосной станции, при этом на фиксированных сечениях измерялись параметры глубины воды вдоль лотка.

Далее с использованием параметров экспериментальной установки с учетом версии моделирования, численно решена тестовая задача по определению приращения глубины потока вдоль экспериментального канала.

Исходя из вышеизложенного, задача наших исследований заключалась в сравнении и оценке результатов физического моделирования и вычисления тестового примера.

### 4.2. Описание модельной установки.

Эксперименты проводились в лаборатории кафедры «Гидротехнические сооружения» Ташкентского института ирригации и механизация сельского хозяйства на лотке с размерами 50\*90\*1415 см. рис. 4.1. Модельная установка на 1300 см длины имеет стеклянные стенки, а на 115 см металлическую. При исследовании неустановившихся движения принимаются во внимание вся длина лотка, а не только рабочая /стеклянная/ часть. Хотя длина лотка разбивалась на 9 створов с расстоянием 130 см последний створ имеет длину 345 см, участок длиной 115 см с металлическими стенками также участвуют при исследовании. Дно лотка сложено из промывного песка с удельным весом 2,66 г/м<sup>3</sup>. Путем подачи разных расходов создавалось жесткое дно, чтобы в ходе многократности экспериментов не допускать изменение гидравлических параметров лотка.

Установка рис. 4.1 состоит: 1-водопроводящий трубопровод, 2-успокоительный резервуар, 3-прямоугольный лоток, 6-опоры, 5-дно, 9-водоприемный резервуар, 7-треугольный водослив, 8-пьезометр, 17-плоский затвор, 13-задвижки.

Моделирование неустановившегося движения воды на экспериментальном лотке проводилось по общепринятой методике с использованием критериев Фруда  $F_1 = \frac{v}{gh}$ , Рейнольдса  $R_1 = \frac{v\alpha}{\nu}$  и

Струхала  $St = \frac{v\tau}{l}$  [49]. На экспериментальной установке при принятых расходах оказалось  $Re \gg$

2100, поэтому моделирование производилось с учетом  $\frac{v^2}{gn} = idem, \frac{v\tau}{l} = idem$ . Принимая во внимание

область гидравлического сопротивления подобное для масштаб модели принят  $\alpha_s = \alpha_n = \alpha_l = \frac{1}{30}$ ,

$$\alpha_g = \alpha_l^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{\sqrt{30}}, \quad \alpha_a = \alpha_l^{\frac{5}{2}} = \frac{1}{\sqrt{30^5}} \quad (4.1)$$

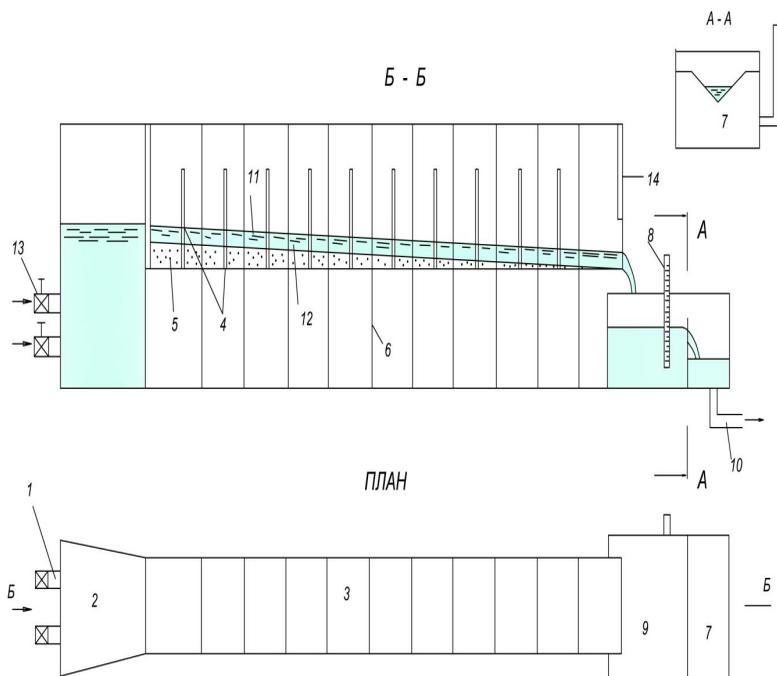


Рисунок 4.1. Экспериментальная установка

Численные параметры модели, соответствующие им значения, полученные на канале, приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Численные параметры модели, соответствующие им значения, полученные на канале

Параметры	Критерии	Линейные разметки			Уклон	Коэффициент шероховатости	Расход воды, $\frac{M^3}{c}$	Скорость потока, $\frac{M}{c}$	Время возмущений	
		Длина, м	Ширина, м	Глубина воды, м						
Модель	0,0125	1,04	14,15	0,40	0,125	0,005	0,011	1,2	0,16	103
Натура	0,0125	1,04	434,5	12,0	3,75	0,005	0,011	30,56	0,63	10

#### 4.3. Методика проведения исследований и состав выполненных опытов.

Опыты проводилось следующим образом. Производилось тарировка треугольного водослива при этом использована зависимость  $Q = 1,4 \cdot H^{3/2}$ , где  $H$  – напор перед водосливом. Изменение расход воды осуществлялось задвижками 13.

При установившемся значении расхода, отметки дна лотка и горизонта воды во всех десяти створах фиксировались специальным шкалами, наклеенными на боковой стенке. В соответствии с поставленной задачей произведено закрытие плоского затвора-14 в конце лотка. Продолжительность закрытия – 108с. Через 50с, 60с и 108с на 10 точках производилось фиксирование глубины потока, затем затвор открывался полностью и на этих же створах в указанных интервалах времени снова фиксировалось глубины воды. Для фиксации глубины были привлечены магистранты и бакалавры Ташкентского института ирригации и механизации сельского хозяйства (ТШИИМСХ), а также научные сотрудники Научно-исследовательского института ирригации и водных проблем.

После проведения серийных опытов производилось статистическая обработка измеренных величин. Для оценки экспериментальных результатов использовали традиционный метод выявления ошибок в виде среднего квадратичного отклонения

$$S[h_i] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{h} - h_i)^2}{n-1}} \quad (4.2)$$

где  $\bar{h}$  – среднее количество измерения глубины, см  
 $h_i$  – единица измерения глубины при каждом повторение опытов, см  
 $n$  – число опытов.

Результаты статистической обработки приведены в таблицах 4.2 - 4.5

Таблица 4.2. Результаты статистической обработки измеренных величин на опытной установке при  $\tau = 30c$ .

Номер сечения	Число опытов						Среднее квадратичное отклонения
	1	2	3	4	5	6	
1	9,8	10,0	9,9	10,2	10,1	10,0	0,15
2	10,6	10,1	10,0	10,5	10,2	10,2	0,25
3	9,9	10,0	10,2	10,3	10,1	10,1	0,15
4	10,1	10,5	10,7	10,0	10,3	10,3	0,29
5	10,1	9,7	10,0	10,1	10,1	10,0	0,154
6	10,1	10,0	10,6	10,2	10,5	10,2	0,27
7	11,0	10,7	10,5	10,8	10,5	10,7	0,22
8	10,9	10,8	11,3	11,4	10,7	10,9	0,34
9	11,2	11,5	11,0	10,6	10,1	11,2	0,28
10	11,2	11,8	11,1	12,1	11,7	11,5	0,43
11	12,7	12,1	12,9	12,1	12,6	12,4	0,37

Таблица 4.3. Результаты статистической обработки измеренных величин на опытной установке при  $\tau = 60c$ .

Номер сечения	Число опытов						Среднее квадратичное отклонения
	1	2	3	4	5	6	
1	10,7	10,9	10,6	11,0	10,8	10,8	0,16
2	10,8	10,9	11,3	10,7	11,4	10,9	0,34
3	10,6	11,0	10,5	11,1	10,8	10,8	0,26
4	11,0	10,7	10,5	10,8	10,5	10,7	0,22
5	10,7	11,0	11,4	10,6	11,4	10,9	0,40
6	11,2	11,8	11,1	12,1	11,7	11,5	0,43
7	11,2	11,9	11,1	12,1	11,8	11,6	0,44
8	11,1	11,7	11,9	11,1	11,6	11,4	0,37
9	13,7	13,1	13,9	13,6	13,1	13,4	0,37
10	13,8	13,2	14,1	13,1	13,7	13,5	0,43
11	13,6	14,0	13,5	14,1	13,8	13,8	0,26

Таблица 4.4. Результаты статистической обработки измеренных величин на опытной установке при  $\tau = 90c$ .

Номер сечения	Число опытов						Среднее квадратичное отклонения
	1	2	3	4	5	6	
1	11,1	11,7	11,0	12,0	11,6	11,4	0,42
2	12,2	12,8	12,1	13,1	12,7	12,5	0,43
3	13,0	13,6	13,5	13,1	13,2	13,2	0,27
4	13,1	13,5	13,7	13,0	13,3	13,3	0,29
5	13,6	13,5	13,0	13,2	13,1	13,2	0,27
6	13,1	13,7	13,1	13,9	13,6	13,4	0,37
7	13,2	13,8	13,1	14,1	13,7	13,5	0,43
8	14,0	13,7	13,5	13,8	13,5	13,7	0,22
9	14,1	14,7	14,9	14,1	14,6	14,4	0,37
10	14,2	14,9	14,1	15,1	14,8	14,6	0,44
11	14,8	15,0	14,9	15,2	15,1	15,0	0,16

Таблица 4.5. Результаты статистической обработки измеренных величин на опытной установке при  $\tau = 108\text{с}$ .

Номер сечения	Число опытов						Среднее квадратичное отклонения
	1	2	3	4	5	6	
1	15,0	15,6	15,5	15,1	15,2	15,2	0,27
2	17,7	17,9	17,6	18,0	17,8	17,8	0,16
3	18,9	19,0	19,2	19,3	19,1	19,1	0,16
4	18,8	19,0	18,9	19,2	19,1	19,0	0,16
5	19,6	19,0	19,1	19,5	19,2	19,2	0,27
6	19,1	19,5	19,7	19,0	19,3	19,3	0,29
7	19,7	19,1	19,9	19,1	19,6	19,4	0,37
8	20,0	19,7	19,5	19,8	19,5	19,7	0,22
9	19,7	19,9	19,6	20,0	19,8	19,8	0,16
10	20,0	19,8	19,9	20,2	20,1	20,2	0,27
11	20,2	20,8	20,1	21,1	20,7	20,5	0,43

Полученные результаты показывают, что после серийных опытов, искомые величины  $h$  находилась в доверительном интервале. При повторении опытов сохранились гидравлические элементы потока, соответствующие начальному установленному режиму течения. Результаты опытов отражены на рис. 4.2. Приращение глубины вдоль потока лотка фиксировалась также видеокамерой.

#### 4.4. Решение тестовой задачи.

Экспериментальный лоток имеет прямоугольную форму, поэтому сечения натурального канала также прямоугольна. Используя вычислительную схему 3.6 для параметров теоретического канала (табл. 4.1) вычислены значения приращение глубин потока вдоль канала. Канал прямоугольного сечения длиной 424,5 м, также разбит на 9 участков. Расстояние между участками 30 м, а длина последнего участка 73,5 м. В начале канала насосная станция подает расход  $30,56 \text{ м}^3/\text{с}$  а в конце другая насосная станция перекачивает такой же расход имитируется остановка второй насосной станцией на 10 мин, а затем его пуск и с использованием параметров теоретического канала производим численные решения моментных уравнений (3.5). Результаты численного решения установившегося значения моментного уравнения, а также вычисления приращения глубин потока вдоль канала приведена в табл. 4.6 и на рис. 4.2. Модели имитации опорожнения напорных водоводов отключенной насосной станции не произведено, и, в связи с этим для создания аналогичной ситуации в тестовой задаче в конце канала исключено опорожнение напорных трубопроводов. В результате этого на физической и имитационной модели наблюдалось только положительная восходящая волна перемещения (рис.4.2) образование уединенных и групповых гребней на свободной поверхности воды не наблюдалось. Сопоставление результатов физического и математического моделирования показали их достаточно хорошую сходимость рис.4.3.

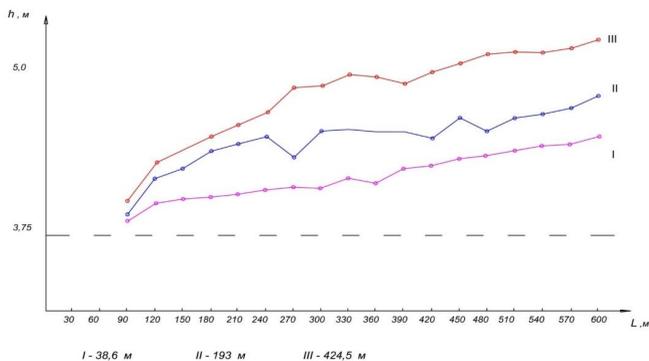


Рисунок 4.2. Результаты решения тестовой задачи

Таблица 4.6. Переходной процесс на участке канала прямоугольной формы поперечного сечение /тестовая задача/

Участки м	Время, с											
	30		60		90		120		150		180	
38,6	30,21	3,75	29,96	3,75	29,70	3,85	29,48	3,97	29,23	4,02	29,03	4,04
77,2	30,21	3,75	29,88	3,76	29,53	3,82	29,21	4,11	38,87	4,15	28,55	4,13
115,8	30,21	3,75	29,88	3,76	29,56	3,86	29,19	4,14	28,88	4,24	28,47	4,30
154,4	30,21	3,75	29,88	3,76	29,56	3,86	29,26	4,17	28,90	4,26	28,62	4,36
193,0	30,21	3,75	29,88	3,76	29,56	3,86	29,26	4,17	28,98	4,28	29,86	4,41
231,6	30,21	3,75	29,88	3,78	29,56	3,86	29,26	4,17	29,149	4,26	28,85	4,36
270,2	30,21	3,75	29,88	3,78	29,56	3,86	29,49	4,17	29,24	4,26	28,37	4,39
308,8	30,21	3,75	29,88	3,78	29,86	3,92	29,68	4,21	29,81	4,26	29,56	4,43
347,4	30,21	3,75	30,22	3,89	30,15	3,95	30,24	4,27	30,21	4,32	30,35	4,44
386,0	30,21	3,75	30,22	3,89	30,15	3,96	30,25	4,30	30,22	4,38	30,36	4,47
424,6	30,21	3,75	30,22	3,80	30,15	3,89	30,25	4,32	30,22	4,40	30,35	4,30
38,6	28,8	4,08	28,62	4,09	28,39	4,14	28,26	4,13	27,97	4,20	27,99	4,16
77,2	28,21	4,16	27,92	4,24	27,62	4,25	27,30	4,25	27,13	4,32	26,65	4,20
115,8	28,19	4,3	27,80	4,34	27,52	4,23	27,23	4,34	26,84	4,40	36,84	4,32
154,4	28,23	4,43	28,00	4,44	27,75	4,27	27,40	4,41	27,38	4,56	26,75	4,49
193,0	28,46	4,47	28,37	4,52	28,00	4,35	28,12	4,56	27,53	4,58	28,05	4,53
231,6	28,91	4,47	28,55	4,54	28,82	4,36	28,28	4,61	28,38	4,68	27,97	4,58
270,2	29,09	4,47	29,42	4,54	29,02	4,45	29,59	4,74	28,94	4,70	29,89	4,62
308,8	29,93	4,36	29,73	4,54	30,15	4,65	29,81	4,75	30,45	4,72	29,86	4,60
347,4	30,32	4,38	36,53	4,69	30,45	4,74	30,74	4,83	30,57	4,79	30,08	4,80
386,0	30,31	4,60	30,52	4,47	30,46	4,77	30,75	4,87	30,60	4,90	30,87	4,82
424,6	30,32	4,62	31,00	4,72	30,47	4,89	30,80	4,92	30,58	4,99	30,7	4,90
38,6	27,51	4,26	27,3	4,27	36,87	4,34	28,13	4,37	25,78	4,4C	29,23	4,45
77,2	26,85	4,35	25,83	4,29	26,98	4,44	24,54	4,41	27,96	4,43	22,11	4,48
115,8	26,05	4,44	36,73	4,34	24,93	4,55	27,41	4,43	22,03	4,47	24,49	4,52
154,4	27,26	4,44	25,88	4,42	27,62	4,61	24,46	5,49	28,95	4,54	21,72	4,56
193,0	26,94	4,53	25,88	4,42	26,04	4,69	29,13	4,58	24,37	4,67	31,17	4,68
231,6	29,13	4,54	27,48	4,50	29,71	4,71	26,60	5,59	30,91	4,74	24,88	4,7C
270,2	28,77	4,66	30,34	4,64	28,43	4,73	31,07	4,76	27,73	4,77	32,30	4,32
306,8	30,82	4,75	29,85	4,69	31,28	4,34	29,71	4,86	31,87	4,83	29,38	4,95
347,4	30,67	4,83	31,23	4,87	30,75	4,93	31,47	4,94	30,32	4,93	31,69	5,05
386,0	30,70	4,90	31,10	4,90	30,80	4,99	31,00	5,00	30,99	4,99	30,99	5,10
424,6	30,75	4,55	31,32	5,00	30,90	5,00	30,999	5,20	31,00	5,2,0	31,99	5,18

Продолжение таблицы 4.6.

Участки м	Время, с			
	570	600	630	660
38,6	23,62	4,46	31,92	4,52
77,2	30,77	4,55	17,09	4,68
115,8	18,91	4,60	34,70	4,73
154,4	32,35	4,69	16,03	4,79
193,0	21,02	4,72	35,75	4,83
231,6	33,55	4,79	21,39	4,90
270,2	26,33	4,90	34,51	4,94
308,8	32,68	5,05	28,74	5,07
347,4	32,91	5,12	31,82	5,17
386,0	30,99	5,17	31,99	5,18
424,6	31,00	5,20	31,09	5,29

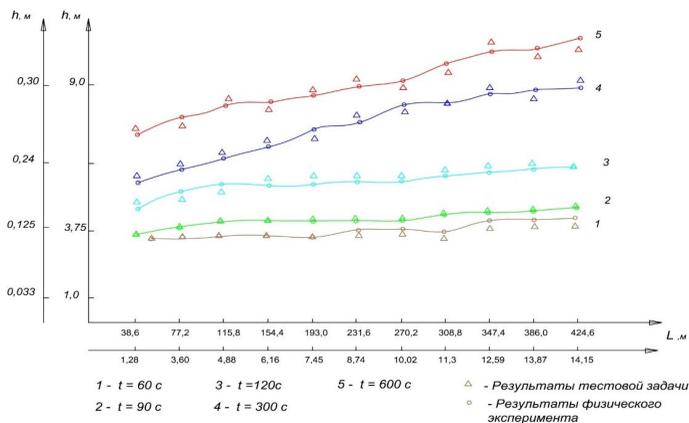


Рисунок 4.3. Сопоставление результатов физического и численного эксперимента

## ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В каналах с машинным водоподъёмом вследствие износа оборудования и неисправностей в системе энергоснабжения участились непредвиденные остановки насосных станций. Ситуации, вызванные случайной остановкой насосной станции в каскаде, приводят порой к катастрофическим последствиям, обусловленным резким изменением гидравлических параметров в канале. Гидравлические расчеты канала на эти случаи существующими нормативами не предусмотрены.

1. На основе гипотезы Сен-Венана получены система дифференциальных уравнений, характеризующая изменение гидравлических параметров в каналах трапецидальной, прямоугольной формы поперечного сечения для неустановившегося движения потока вызванного изменением режима работы насосной станции.

2. На основе использования уравнений, описывавших Марковский процесс, рассмотрено изменение глубины потока /расхода воды/ для всех возможных случаев режима работы насосной станции: первый – насосная станция внезапно остановлена, второй – насосная станция исправно работает.

3. Разработаны моментные уравнения, которые отражают закономерности случайного приращения глубины и расхода воды при возникновении неустановившегося режима движение воды в канале трапецидальной, прямоугольной формы поперечного сечения, обусловленного случайной остановкой или пуском насосной станции.

4. На основе гидравлической схемы движения воды в каналах, а также по результатам натурных наблюдений за режимом работы Каршинского каскада насосных станций и магистрального канала сформулированы краевые условия для решения системы моментных уравнений. Разработана программа численной реализации моментных уравнений Каршинского магистрального канала на участке между насосными станциями №1 и №2 при случайном режиме работы насосной станции №2.

### ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$Q$ – расход воды, м <sup>3</sup> /с.	$i$ – уклон дна русла.
$n$ – глубина воды, м.	$g$ – 9,81 м/с <sup>2</sup> .
$b$ – ширина канала по дну, м.	$\rho$ – плотность воды кг/м <sup>3</sup> .
$B$ – ширина канала по урезу воды, м.	$J$ – уклон трения.
$R$ – гидравлический радиус, м.	$\alpha$ – коэффициент Кориолиса.
$\mathcal{X}$ – смоченный периметр, м.	$\beta$ – коэффициент Буссинеска.
$\omega$ – площадь живого сечения м <sup>2</sup> .	$n$ – коэффициент шероховатости.
$\partial Q$ – изменение расхода м <sup>3</sup> /с.	$m$ – коэффициент откоса.
$\partial h$ – изменение глубины м.	$a, \beta$ – коэффициенты, зависящие от Марковского процесса.
$q$ – боковой водозабор м <sup>3</sup> /с на 1 м.	$P$ – функция вероятности.
$a_{ij}$ – коэффициент перехода.	$\tau$ – касательное напряжение кг/см <sup>2</sup> .
$L$ – длина канала м.	$P$ – гидродинамическое давление кПа.
$H$ – напор перед измерительным водосливом, м.	$G$ – вес, кг.
$ds$ – длина отрезка канала м.	$\lambda$ – коэффициент трения.
$Re$ – число Рейнольдса.	$u_3$ – скорость бокового водозабора, м/с.
$Fr$ – число Фруда.	$h_0$ – нормальная глубина, м.
$St$ – число Струхалия.	$T'$ – наибольшая ширина потока в сечении.
$U$ – средняя скорость, м/с.	$M$ – частный момент.
$t$ – время, с.	$C$ – коэффициент Шези.
$a$ – средняя высота волны, м.	$K$ – модуль расхода.
$C$ – скорость распространения волны м/с.	$S$ – среднее квадратичное отклонения.



RS Global

# **НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В КАНАЛАХ, ОБУСЛОВЛЕННОЕ РЕЖИМОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ**

**МОНОГРАФИЯ**

**Махмудов Илхомжон Эрназарович  
Муродов Навруз Курбонович  
Садиев Умиджон Абдусамадович  
Казаков Эргаш Ахмадович**

Passed for printing 23.03.2022. Appearance 28.03.2022.  
Typeface Times New Roman. Circulation 100 copies.  
RS Global Sp. z O.O., Warsaw, Poland, 2022  
Numer KRS: 0000672864  
REGON: 367026200  
NIP: 5213776394

Warsaw 2022



RS Global

Publisher:

RS Global

Dolna 17, Warsaw,

Poland 00-773

<https://monographs.rsglobal.pl/>

Tel: +48 226 0 227 03

Email: [monographs@rsglobal.pl](mailto:monographs@rsglobal.pl)



RS Global