

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ – МСХА
ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА»

На правах рукописи

ХАЕК БУШРА

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОДОВЫПУСКНОГО
СООРУЖЕНИЯ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОГО ТИПА
МЕЛИОРАТИВНЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ**

Специальность 2.1.6 - Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная
гидрология

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор,
Ханов Нартмир Владимирович

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА I: АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ВОДОВЫПУСКНЫХ СООРУЖЕНИЙ МЕЛИОРАТИВНЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ.....	10
1.1. Тип, назначение и состав водовыпускных сооружений	10
1.2. Классификация водовыпускных сооружений, условия применения и техниче- ские условия проектирования.....	12
1.2.1. Сооружения с запорными устройствами механического действия.....	12
1.2.2. Сооружения сифонного типа.....	16
1.2.3. Сооружения с переливными стенками.....	21
1.3. Конструктивные недостатки проанализированных водовыпускных сооруже- ний.....	25
Выводы по главе I.....	31
ГЛАВА II. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКО- ГО РЕЖИМА И ПАРАМЕТРОВ ВОДОВЫПУСКОВ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОГО ТИ- ПА.....	33
2.1. Конструктивные особенности водовыпуска телескопического типа с поплавком круглоцилиндрического поперечного сечения.....	34
2.2. Гидравлический расчёт параметров восходящей струи.....	39
2.2.1. Общие положения.....	39
2.2.2. Параметры незатопленной вертикальной струи напорного трубопровода.....	39
2.2.3. Определение параметров внешней оболочки вертикальной струи	48
2.2.4. Определение параметров короны вертикальной струи.....	51
2.3. Теоретические расчёты параметров струи при затопленном истечении	58
2.4. Описание работы водовыпуска телескопического типа.....	63
2.5. Назначение параметров элементов подвижного короба с круглоцилиндрическим поплавком.....	64

2.5.1. Назначение параметров элементов подвижного короба с круглоцилиндрическим поплавком при отсутствии воды в опорожнённом водовыпуске.....	64
2.5.2. Гидростатические расчёты плавания подвижного короба при его заполнении водой и отсутствии перелива.....	67
2.5.3. Гидродинамические расчёты плавания короба при изливе из него воды через круглоцилиндрический поплавок.....	69
2.5.4. Определение величины пригрузки G_w поплавка весом слоя переливающейся воды.....	70
2.6. Расчёт параметров подвижного короба с квадратным поплавком.....	77
2.6.1. Конструктивные схемы соединения подвижного короба с квадратным поплавком.....	77
2.6.2. Назначение параметров элементов подвижного короба с квадратным поплавком.....	81
2.6.3. Гидродинамические расчёты плавания короба при переливе из него воды через оголовки со свободным омыванием стенок.....	82
2.6.4. Гидродинамические расчёты плавания короба при переливе из него воды через оголовки с плотным прилеганием стенок короба и поплавка.....	85
2.6.5. Гидродинамические расчёты плавания короба со стенками, являющимися продолжением внутренних стенок поплавка.....	87
Выводы по главе II.....	89
ГЛАВА III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ВЫВОДОВ.....	90
3.1. Цель и задачи экспериментальных исследований модели водовыпуска.....	90
3.2. Параметры элементов модели водовыпуска телескопического типа	90
3.3. Параметры элементов модели коробов.....	92

3.4. Модель установки, технология проведения исследований.....	96
3.5. Достоверность измерений.....	103
3.6. Методика проведения и обработки результатов опытных данных.....	104
ГЛАВА IV. РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ	
ИССЛЕДОВАНИЙ.....	106
4.1. Результаты экспериментальных данных.....	106
4.1.1. Коэффициент расхода модели водовыпускного сооружения.....	107
4.1.2. Экспериментальная зависимость расхода от напора на гребне поплавка - водослива.....	109
4.1.3. Экспериментальная высота подъёма поплавка.....	109
4.1.4. Экспериментальные параметры скоростного напора.....	110
4.5. Экономическое сравнение гидравлических параметров исследуемого водовыпуска с существующими сооружениями.....	112
4.5.1. Техничко-экономическое сравнение сопоставляемых вариантов.....	112
Выводы по главе IV.....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	119
Рекомендации производству.....	121
Перспективы дальнейшей разработки темы.....	121
Условные обозначения.....	122
Библиографический список.....	124
Приложение	131

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Насосные станции мелиоративных систем являются наиболее крупными гидротехническими сооружениями, с напорами до ста метров, и выше, расходом до $50 \text{ м}^3/\text{с}$, при этом объёмы перекачиваемой воды могут достигать десятки миллионов кубических метров в год.

Для орошения сельскохозяйственных земель, например в Сирийской Арабской Республике (САР), в настоящее время используется более 240 насосных станций с напорами 20-120 м и расходами $0,5-9,0 \text{ м}^3/\text{с}$. Объем подачи воды при этом достигает 200 млн. м^3 в год [62], с необходимым значительным объемом энергозатрат при высокой стоимости электроэнергии. В связи с вышеизложенным, при проектировании мелиоративных насосных станций, особое внимание уделяется вопросу снижения потребления электроэнергии при подборе схем водоподачи, обеспечивающей уменьшение гидравлических потерь на конструктивных элементах. Одними из наиболее значимых величин гидравлических потерь, влияющих на потребление электроэнергии, являются водовыпускные сооружения. При подаче воды в открытые водовыпускные сооружения и мелиоративные каналы, в случае внезапного прекращения электроснабжения, в напорном трубопроводе может наблюдаться обратный возвратный поток. В случае продолжительной эксплуатации в подобном режиме возникает опасность вывода из строя гидромеханического оборудования. Для возможности предотвращения подобных явлений необходимо отключение напорного трубопровода от верхнего бьефа приемного бассейна. При проектировании насосных станций задача решается с применением соответствующих конструктивных элементов водовыпускных сооружений, сопрягающих напорные водоводы с каналами и их снабжение энергоэффективными устройствами [23, 24, 67, 68].

Степень разработанности темы. В диссертационной работе представлены существующие схемы водовыпускных сооружений, технические условия проектирова-

ния, которые опираются на работы Рычагова В.В., Флоринского М.М. Чебаевского В.Ф., Вишневого К.П., Накладова Н.Н., Беглярова Д.С., Али М.С.

В системах напорных водоводов используется конструкция сифонного водовыпуска [А.С. СССР №1013554 от 1976], позволяющая повысить эффективность зарядки путем улучшения условий отвода воздуха.

Для необходимости повышения надёжности работы водовыпускного сооружения в ФРГ разработана конструкция с резервуаром и вспомогательным сифоном, горловина которого при помощи вакуумной струи с электромеханическим клапаном сообщена с трубопроводом горловины сифона, а резервуар сообщен с вертикальной трубой наклонным лотком [патент ФРГ № 479847 от 25.11.1975 г.].

Кроме того, для повышения надёжности эксплуатации водовыпусков используется конструкция камерного водовыпуска с замкнутой переливной стенкой [патент ФРГ №1617084 от 29.12.1983г.].

Основным недостатком вышеуказанных конструкций является увеличенный расход энергозатрат при колебаниях уровней воды в отводящем канале.

Поскольку описания работы подобной конструкции водовыпускного сооружения телескопического типа не обнаружено в доступной литературе, необходимо изучить физику явлений, происходящих при поступлении воды из напорного водовода в телескопический водовыпуск.

Цель и задачи исследования. Теоретическое и экспериментальное обоснование параметров водовыпускного сооружения телескопического типа мелиоративной насосной станции.

Для достижения вышеуказанной цели поставлены следующие задачи:

1. Изучить современные конструкции водовыпускных сооружений мелиоративных насосных станций.
2. Теоретически обосновать способы расчёта переливного водовыпускного сооружения телескопического типа с переменным положением гребня переливной стенки;

3. Разработать методы исследования и моделирования водовыпуска телескопического типа мелиоративной насосной станции.
4. Провести анализ результатов исследований и разработать практические рекомендации для расчёта водовыпуска телескопического типа.

Научная новизна работы:

- впервые предложена методика расчёта переливного водовыпускного сооружения телескопического типа с переменным положением гребня переливной стенки, выполнено теоретическое обоснование возможности использования предлагаемой конструкции водовыпуска;
- впервые проведены гидравлические исследования на физической модели разработанной конструкции водовыпуска телескопического типа насосной станции;
- получены новые данные по коэффициентам расхода и гидравлическим сопротивлениям водовыпускного сооружения телескопического типа;
- выполнен анализ результатов лабораторных исследований водовыпускного сооружения с восходящей вертикальной затопленной струей в ограниченном пространстве, даны рекомендации для расчета подобных водовыпусков.

Теоретическая и практическая значимость работы. В работе представлены рекомендации, объединяющие в себе результаты проведённых автором лабораторных гидравлических и теоретических исследований. Разработанные рекомендации могут быть учтены при проектировании водовыпускных сооружений телескопического типа мелиоративных насосных станций.

Практическая значимость работы заключается в разработке экономически обоснованной конструкции переливного водовыпускного сооружения телескопического типа, обладающего простотой конструкции и надёжностью в эксплуатации при минимальных гидравлических потерях.

Методология и методы научного исследования. Теоретические расчёты и модельные гидравлические исследования.

Положения, выносимые на защиту:

- теоретическое обоснование использования предлагаемой конструкции водовыпускного сооружения телескопического типа;
- теоретическое обоснование элементов кинематической структуры потока напорного трубопровода насосной станции в камере телескопического водовыпуска;
- результаты экспериментальных исследований водовыпускного сооружения с восходящей вертикальной затопленной струёй в ограниченном пространстве, их анализ;
- рекомендации по проектированию водовыпуска телескопического типа насосной станции.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность результатов работы обусловлена: применением известных, апробированных расчетных методик; достаточной полнотой выполненных экспериментальных исследований; взаимным сопоставлением расчетных и экспериментальных данных.

Основные положения и результаты работы были доложены на конференциях: международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 160-летию В.А. Михельсона (Москва, 9-11 июня 2020); IV-го Всероссийского научно-практического семинара (НИУ МГСУ, 26 мая 2021 г.); Всероссийской с международным участием научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 155-летию со дня рождения Н.Н. Худякова (Москва 7-9 июня 2021 г).

Публикации. По результатам диссертационных исследований опубликовано 7 печатных работ, в том числе 2 статьи в изданиях, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук», 3 статьи (тезисов докладов) в других печатных изданиях и подготовлены **2 заявки на патент на изобретение.**

Структура и объём диссертации. Диссертация изложена на 132 страницах, состоит из введения, основной части, содержащей 51 рисунков, 6 таблиц, заключения, списка литературы (включает 94 наименований, в том числе 6 – на иностранном языке), условных обозначений и приложения.

ГЛАВА I. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ВОДОВЫПУСКНЫХ СООРУЖЕНИЙ МЕЛИОРАТИВНЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ

1.1 Тип, назначение и состав водовыпускных сооружений

Водовыпускное сооружение входит в состав гидротехнического узла машинного водоподъема и предназначено для соединения напорных трубопроводов с сооружениями, транспортирующими воду к потребителю. В оросительных системах водовыпускное сооружение принято называть напорным бассейном, который соединяется с машинным каналом и обеспечивает командную отметку оросительной системы [56, 70]. Оно должно: предотвращать обратный ток воды из водоприемника по напорным трубопроводам при отключении насосных агрегатов или разрыве напорного трубопровода; обеспечивать плавный выпуск воды из напорных трубопроводов в водоприемник с наименьшими потерями напора, распределение ее по нескольким водопотребителям; надежный, устойчивый пуск насосов и впуск воздуха в напорные трубопроводы при их опорожнении от воды; обладать достаточной прочностью и устойчивостью; быть удобным в эксплуатации. В общем случае, в состав водовыпускного сооружения входят: водовыпускной оголовок, в котором находятся выходные диффузоры напорных трубопроводов; рабочие и ремонтные затворы; успокоительный колодец; элементы, сопрягающие колодец с отводящим каналом; аварийный сброс при опасности переполнения успокоительного колодца водой и перелива ее через стены сооружения или бермы канала [69, 70, 71].

По конструкции и способу предотвращения обратного тока воды при отключении насосных агрегатов различают водовыпускные сооружения:

с запорными устройствами механического действия; сифонного типа; с переливной стенкой.

По числу водоприемников, водовыпускные сооружения подразделяют на прямоточные (подача воды в один водоприемник) и делители (подача воды в два или более оросительных канала, начинающихся непосредственно у водовыпускного сооружения) [8].

Для выполнения перечисленных функций должно быть построено такое гидротехническое сооружение, которое обладало бы достаточной прочностью и устойчивостью и имело размеры и конфигурацию, обеспечивающие благоприятные гидравлические условия протекания через него жидкости и минимальные гидравлические потери энергии.

Совершенно очевидно, что это сооружение должно одновременно обеспечивать удобную и надежную эксплуатацию его [56].

Принципиальная схема и состав сооружений мелиоративной насосной станции показана на рисунке 1.1.

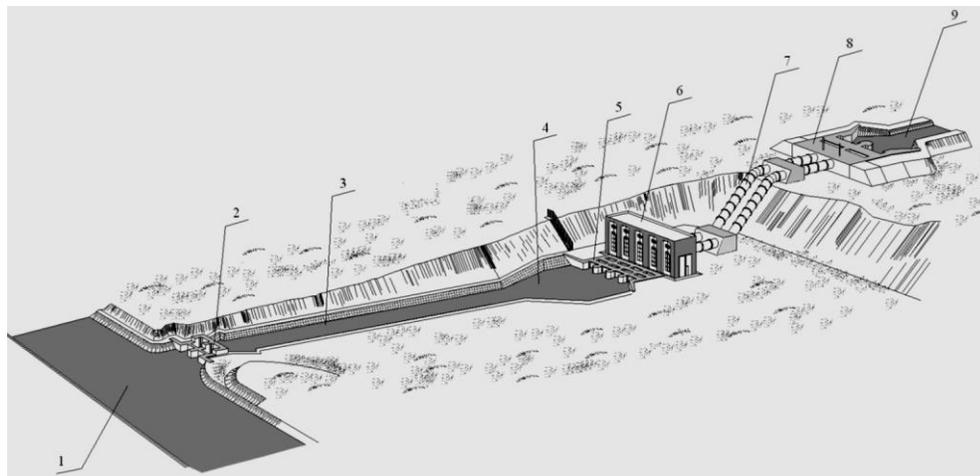


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема и состав сооружений мелиоративной насосной станции [56]: 1-магистральный канал (водоисточник); 2-головное водозаборное сооружение; 3-подводящий канал; 4-аванкамера; 5- водозаборное сооружение; 6- здание насосной станции; 7- напорный трубопровод; 8- водовыпускное сооружение; 9- отводящий канал

1.2. Классификация водовыпускных сооружений, условия применения и технические условия проектирования

1.2.1. Сооружения с запорными устройствами механического действия

Водовыпускные сооружения с запорными устройствами механического действия универсальны, применяются при достаточно высокой амплитуде колебаний уровней воды в водоприемнике и соответствующем типе запорного устройства. На каждый напорный трубопровод воды может подаваться разным количеством насосов. Концевая часть напорных трубопроводов прямолинейна. Запорные устройства предотвращают обратный ток воды из водоприемника по напорным трубопроводам при отключении насосных агрегатов или разрыве напорного трубопровода [70].

В качестве запорных на водовыпускных сооружениях применяют следующие устройства:

- простейшие однодисковые обратные клапаны-захлопки при диаметре выходного отверстия напорного трубопровода $D_{\text{вых}} < 1,2$ м;
- многодисковые клапаны-захлопки при $D_{\text{вых}} > 1,2$ м;
- клапанные затворы (с верхней горизонтальной осью вращения), оборудованные гидроприводом при площади выходного отверстия напорного трубопровода до 20 м^2 ;
- плоские и сегментные затворы, снабженные подъемными механизмами, при площади выходного отверстия напорного трубопровода более 1 м^2 ;
- обратные клапаны стандартного изготовления, которые устанавливают перед выходным диффузором.

Однодисковый клапан-захлопка, показанный на рисунке 1.2, представляет собой металлический диск с горизонтальной осью вращения, расположенной на верхней кромке выходного диффузора напорного трубопровода.

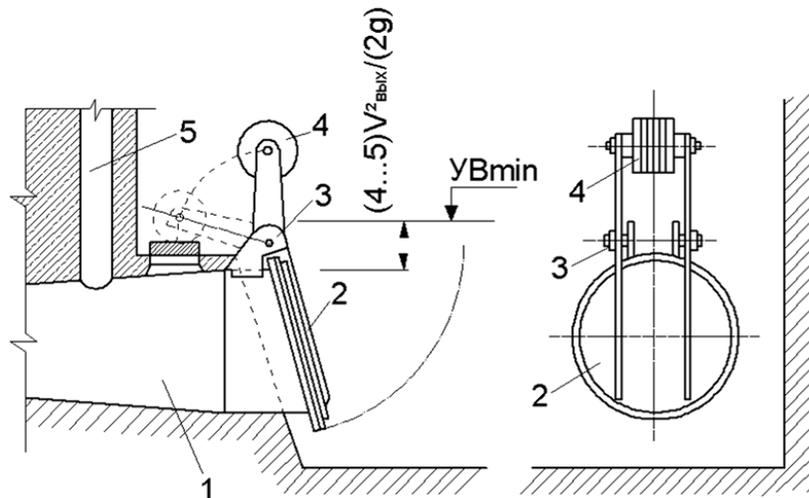


Рисунок 1.2 – Схема однодискового обратного клапана-захлопки: 1- выходной диффузор трубопровода; 2– диск; 3 – шарнир; 4 – противовес; 5 –воздушная труба

По контуру выходного отверстия трубопровода устраивают резиновое уплотнение. При включении насоса вода заполняет трубопровод и достигает клапана. Под ее напором диск открывается, и вода поступает в водоприемник. При отключении насоса движение воды по напорному трубопроводу вначале прекращается, а затем начинается уже в обратном направлении (из водоприемника). Диск под действием собственного веса и напора воды закрывается. Для снижения величины удара дисков по уплотнению и обеспечения более полного их открытия при диаметрах $D_{\text{вых}}=0,6...1,2$ м диски снабжают противовесами. В водовыпускных сооружениях, оборудованных затворами механического действия, следует предусматривать воздуховоды – трубы или галереи для выпуска воздуха из напорных трубопроводов при пуске насосов и впуска воздуха в них при отключении насосов и закрытии основных затворов.

Выпуск воздуха из напорного трубопровода предотвращает повышение пускового напора насоса, а впуск воздуха препятствует образованию вакуума при опорожнении. Воздушную трубу присоединяют к верхней точке напорного трубопровода, а выходное отверстие размещают выше максимального уровня воды в водопри-

емнике. Поперечное сечение воздуховода определяют по скоростям воздуха 40...50 м/с. Расход воздуха принимают равным расчетной подаче насоса при его выпуске. В водовыпускных сооружениях, оборудованных быстропадающими затворами, роль воздуховодов выполняют предзатворные камеры, соединяемые с атмосферой. Основные размеры водовыпускного сооружения определяются в зависимости от размеров и числа напорных трубопроводов, размеров водоприемника (в большинстве случаев открытого канала) и амплитуды колебаний уровней воды в нём.

Порядок конструирования водовыпускного сооружения с затворами механического действия следующий. Задавая скорость на выходе из напорного трубопровода $v_{\text{ВЫХ}}=1,5...2$ м/с, находят площадь выходного отверстия $F_{\text{ВЫХ}}$. При $F_{\text{ВЫХ}} < 2$ м² форма выходного отверстия принимается круглой, при $D_{\text{ВЫХ}} > 2$ м² прямоугольной. Характерные размеры круглого сечения – $D_{\text{ВЫХ}}$, прямоугольного – $H_{\text{ВЫХ}}$ и $B_{\text{ВЫХ}}$. Переход с круглого сечения напорного трубопровода на выходное сечение площадью $F_{\text{ВЫХ}}$, осуществляют с помощью диффузора с пространственным углом конусности не более 10°. Верхняя точка выходного отверстия принимается ниже минимального уровня воды в водоприемнике на значение $h_{\text{заг}}=(4...5) v_{\text{ВЫХ}}^2 / g$, как показано на рисунке 1.3, но не менее 0,2 м. Из выходного отверстия трубопровода вода поступает в водовыпускную камеру шириной:

$$b_{\text{кам}} = B_{\text{ВЫХ}} + 2b, \quad (1.1)$$

где: b – запас между стенкой быка и выходным отверстием для размещения уплотняющих конструкций, принимают $b=0,3$ м, при использовании плоских или сегментных затворов $b=0$; $B_{\text{ВЫХ}}$ – ширина выходного отверстия трубопровода, при круглом отверстии $B_{\text{ВЫХ}} = D_{\text{ВЫХ}}$, .

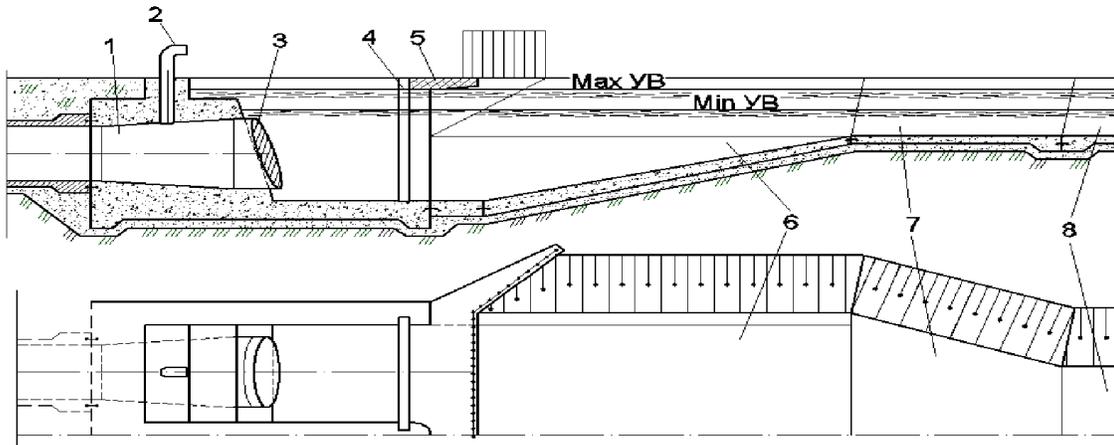


Рисунок 1.3 – Схема водовыпускного сооружения, оборудованного клапаном-захлопком: 1 – выходной диффузор трубопровода; 2 – воздушная трубка; 3 – клапан-захлопок; 4 – паз под ремонтный затвор; 5 – служебный мостик; 6 – успокоительный колодец; 7 – переходный участок; 8 – отводящий канал

Каждое выходное отверстие отделяются от соседнего разделительной стенкой, в которой размещены пазы рабочих и ремонтных затворов. Длина быка должна быть достаточной для размещения затворов и служебных мостиков. Длина водовыпускного фронта сооружения (водовыпускного оголовка):

$$V_{\text{вып}} = b_{\text{кам}} n + b_6(n-1), \quad (1.2)$$

где n – число напорных трубопроводов; b_6 – толщина быка, м.

Из водовыпускного оголовка вода поступает в начальную часть успокоительного колодца, дно которого горизонтально и прямоугольно в плане. Глубина колодца равна высоте водовыпускного оголовка:

$$H_{\text{вып}} = H_{\text{вых}} + b + h_{\text{заг}} + \Delta H + h_{\text{зап.}}, \quad (1.3)$$

где: $H_{\text{вых}}$ – высота выходного отверстия трубопровода, при круглом отверстии $H_{\text{вых}} = D_{\text{вых}}$, м; ΔH – амплитуда колебаний уровней воды в водоприемнике, м; $h_{\text{зап.}}$ – превышение стенки колодца над максимальным уровнем воды, м.

Для водовыпускного сооружения с быстропадающими затворами в формулу (1.3) вводится значение, соответствующее напору на гребне водослива при расходе, равном подаче насоса. Длина начальной части колодца принимается равной

$(2...3)D_{\text{вых}}$ или $(2...3)H_{\text{вых}}$. Дно колодца сопрягается с дном отводящего канала наклонным порогом с уклоном 0,2. Общая длина колодца:

$$L_{\text{кол}} = (2 \dots 3)D_{\text{вых}} + 5p, \quad (1.4)$$

где p – высота порога, равная разности отметок дна канала и колодца, м.

Стенки колодца могут быть откосными (для малых и средних насосных станций) или вертикальными. Вертикальные боковые устои водовыпускного оголовка или колодца с откосными стенками сопрягается, как правило, обратными стенками, поставленными под углом $45...90^\circ$ к оси сооружения, а дно колодца в плане с дном отводящего канала - переходным участком с углом конусности $35...40^\circ$. В некоторых случаях переходный участок совмещается с наклонным порогом, что позволяет сократить общую длину водовыпускного сооружения. Переходный участок и начальная часть отводящего канала крепится бетонными плитами и каменной наброской.

1.2.2. Сооружения сифонного типа

Наиболее распространенными считаются водовыпускные сооружения сифонного типа. Схема типовой конструкции сифонного водовыпуска показана на рисунке 1.4.

Обратное течение воды через сифон предотвращается клапаном срыва вакуума – разрядкой сифона. На сооружениях с сифонным водовыпуском затворы механического действия не предусматривается, исключение составляет установка датчика обратного тока воды, включающего подачу воздуха в зону вакуума сифона. Область применения сифонных водовыпусков ограничивается условиями: максимальный статический вакуум (превышение наивысшей точки сифона над минимальным уровнем воды в водоприемнике) не превышает 6 м; пуск насоса осуществляется в стандартном режиме; возможность автоматической зарядки сифона.

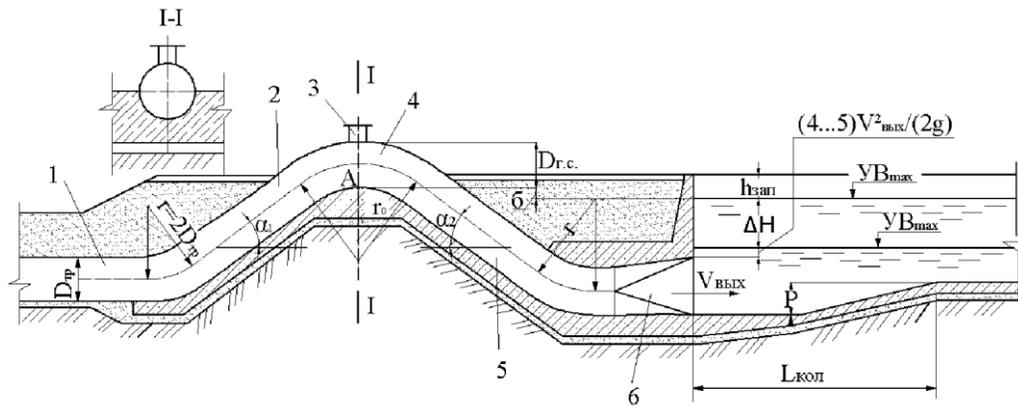


Рисунок 1.4 – Схема типовой конструкции сифонного водовыпуска:

- 1 – напорный трубопровод; 2, 5 – восходящая и нисходящая ветви сифона;
 3 – люк для установки клапана срыва вакуума; 4 – горло сифона; 6 – выходной диффузор

Характерная конструктивная особенность водовыпуска сифонного типа - устройство концевой части напорного трубопровода в форме колена, изогнутого кверху в вертикальной плоскости. При подаче воды по напорному трубопроводу верхняя часть колена работает в условиях вакуума (с отрицательным давлением). Сифон снабжают вспомогательными устройствами, выпускающими воздух из него при пуске насоса и впускающими воздух в него в количестве, достаточном для срыва вакуума при остановке насосного оборудования (прекращении подачи воды по трубопроводам). Выпуск воздуха из сифона предотвращает повышение пускового напора насоса, а впуск (разрядка) – забор воды из водоприёмного канала при обратном течении воды из водоприемника по напорному трубопроводу через насос при его аварийной остановке. Для обеспечения эффективной эксплуатации насосов, вакуум в сифоне необходим максимально возможным в течении всего времени подачи воды по напорным трубопроводам, а сифон - герметичным. Проточная часть сифона разделяется на несколько участков: восходящую ветвь, которая включает колено и наклонный участок, в пределах которого при необходимости осуществляется переход от круглого поперечного сечения напорного трубопровода к прямоугольному;

горловое колено 4, нижняя точка которого является гребнем (порогом) сифона; нисходящую ветвь (рисунок 1.4), состоящую из наклонного участка, колена и выходного диффузора (в отдельных случаях выходной диффузор совмещается с наклонным участком). Сечение I-I на рисунке 1.4 называют горлом сифона. Верхнюю кромку выходного сечения сифона называют шельгой; а верхнюю образующую горлового колена 4 и наклонного участка капором сифона. Гребень сифона (точка А) должен быть выше максимального уровня воды, а шельга - ниже минимального уровня воды в источнике. При пуске насоса вода постепенно заполняет напорный трубопровод, достигает гребня сифона и начинает переливаться через него. Воздух, находящийся в трубопроводе, выходит в атмосферу через открытый клапан срыва вакуума. Площадь выпускных отверстий клапана определяется, исходя из необходимых требований: воздух не должен скапливаться в верхней части сифона, из-за возможности прорыва в водоприемник из-под шельги, который вызывает колебание давления в сифоне и изменение характеристики насоса, что отрицательно отражается на эксплуатации насосной станции. В начальный момент перелива воды через гребень сифон работает как водослив, а геометрическая высота подъема насоса (определяется разностью отметок уровней воды на гребне сифона и в водоисточнике) считается максимальной. Данное обстоятельство учитывается при подборе насоса: (рабочая точка не должна находиться в области с минимальным КПД. На характеристиках осевых насосов, как правило, указывается величина максимального значения статического напора, превышение которого значительно снижает эффективные эксплуатационные параметры. В случае, когда уровень воды достигает гребня и начинается перелив, сифон разобщается с атмосферой. Характер течения воды в нисходящей ветви имеет некоторые особенности. На нисходящей ветви поток воды находится в бурном состоянии, поскольку уклон ее значительно превосходит критический. Поток сопрягается с потоком воды в колене и выходном диффузоре посредством гидравлического прыжка.

Эффективная эксплуатация сифона определяется устойчивым вакуумом и выносом выделяющегося из воды воздуха в водоприемник. Процесс выноса воздуха по мере подъема уровня воды в нисходящей ветви замедляется, герметичность нарушается, начинается процесс подсоса воздуха и разрядки сифона. Зарядный расход для сифонов круглого сечения:

$$Q_{\text{зар}} = \sqrt{g D_{\text{гс}}^{2,5}} \left(0,53 - 0,17 \frac{\alpha_1}{90} \right), \quad (1.5)$$

где $D_{\text{гс}}$ – диаметр горлового сечения сифона, м; α_1 – угол наклона восходящей ветви сифона, град; g – ускорение свободного падения, м/с².

Для крупных насосных станций зарядить сифон можно и при помощи вакуум-насоса. Но такая зарядка должна быть обоснована технико-экономическими расчетами.

При конструировании проточной части сифона следует:

- принимать угол наклона к горизонту восходящей ветви 30...45°, а нисходящей 30...40° (меньшие углы наклона облегчают зарядку сифона);
- при диаметре трубопровода $D < 2,2$ м выполнять сифон из стальных (на сварке) труб с круглым поперечным сечением как восходящей, так и нисходящей ветвей;
- при $D > 2,2$ м изготавливать сифон из железобетона (желательно с внутренней стальной облицовкой для лучшей герметизации) прямоугольным поперечным сечением шириной $B = D$ и высотой $H = 0,8D$ (возможны и другие соотношения B и H , но площадь сечения обычно сохраняют постоянной). Переход с круглого сечения на прямоугольное осуществляют в пределах восходящей ветви на участке длиной не менее $2D$;
- назначать радиусы закруглений горлового колена не менее $(2...3,5)H$, нижнего колена восходящей и нисходящей ветвей не менее $2H$ (для круглого сечения $H = D$);
- определять площадь выходного отверстия сифона по допустимой скорости 1,5...2 м/с. Переход с сечения нисходящей ветви на выходное сечение осуществляют с помощью диффузора с углом пространственной конусности 8...10°;

- устанавливать сифон так, чтобы шельга выходного отверстия была ниже минимального уровня воды в водоприемнике на 4...5 скоростных напоров, но не менее чем на 0,2 м, а гребень был выше максимального уровня воды в водоприемнике (с учетом высоты волн) не менее чем на 0,2 м. Ширина выходного оголовка, в котором размещают выходные диффузоры сифонов:

$$B_{\text{вып}} = B_{\text{вых}} + t(n - 1), \quad (1.6)$$

где $B_{\text{вых}}$ – ширина выходного отверстия, при круглом отверстии $B_{\text{вых}} = D_{\text{вых}}$, м; t – толщина стенки, м, разделяющей выходные диффузоры сифонов, определяют из условий производства работ и прочности; n – число пролётов сифона.

Из выходных отверстий сифонов вода поступает непосредственно в общий успокоительный колодец (бассейн) шириной $B_{\text{вых}}$. Другие размеры успокоительного колодца определяются таким образом, как и для водовыпускного сооружения с запорными устройствами механического действия.

Вследствие необходимости поддержания в сифоне максимального (предельного) вакуума в течение времени транспортировки воды по напорному трубопроводу, к клапану срыва вакуума предъявляются определенные требования: обеспечение надежного срыва вакуума в сифоне при прекращении движения воды по напорному трубопроводу; наличие герметичности стыков; возможность автоматизации процесса срыва вакуума. По принципу действия клапаны разделяют на гидравлические и механические. Каждый клапан оборудован отверстием для впуска и впуска воздуха из сифона и напорного трубопровода при его заполнении. Отверстие закрывается (открывается) с помощью запорного устройства.

Основным достоинством сифонных водовыпускных сооружений является отсутствие ремонтных затворов и наличие обратного движения воды, что существенно облегчает проведение ремонтных работ. Кроме того, сооружение эксплуатируется с незаряженным сифоном, превращая сифонный водовыпуск в водовыпускное сооружение с переливной стенкой, с увеличенными гидравлическими характеристиками. В таком случае высота подъема насоса увеличивается на величину разности отметок

верхней поверхности сифона и уровня воды в водоприемнике, в таком случае КПД насоса снижается. Для обеспечения постоянной эксплуатации сифона в заряженном состоянии следует проводить: регулярный контроль при эксплуатации сооружения, герметичности швов сифона и надежности клапанов срыва вакуума. Отказ клапана срыва вакуума приводит к обратному движению потока воды по трубопроводу, аварийному состоянию гидромеханического оборудования и полной остановке насосной станции.

1.2.3. Сооружения с переливными стенками

Водовыпускные сооружения с переливной стенкой рекомендуется применять при низких колебаниях уровней в водоприемнике, превышающих 0,5 м. Типовая конструкция водовыпускного сооружения с переливными стенками показана на рисунке 1.5.

Из напорного трубопровода вода поступает в приёмную камеру, отметка стенки которой превышает максимальный уровень в водоприемнике и далее переливается в водоприемник, с отсутствием возможности обратного направления движения. Конструкция данного вида проста и надежна в эксплуатации. Вода из диффузора 1 напорного трубопровода со скоростью $V_{\text{вых}}$ поступает в приёмную камеру 4, изолированную от бассейна 3 вертикальными стенками 2. Отметка уровня воды в бассейне 3 равна отметке уровня в водоприемнике. Верхняя кромка стенок 2 горизонтальна и превышает максимальный горизонт воды в водоприемнике, не более чем на 0,1 м. Вода, переливаясь через стенки 2, поступает в бассейн 3. Стенки 2 работают как неподтопленный водослив с тонкой стенкой.

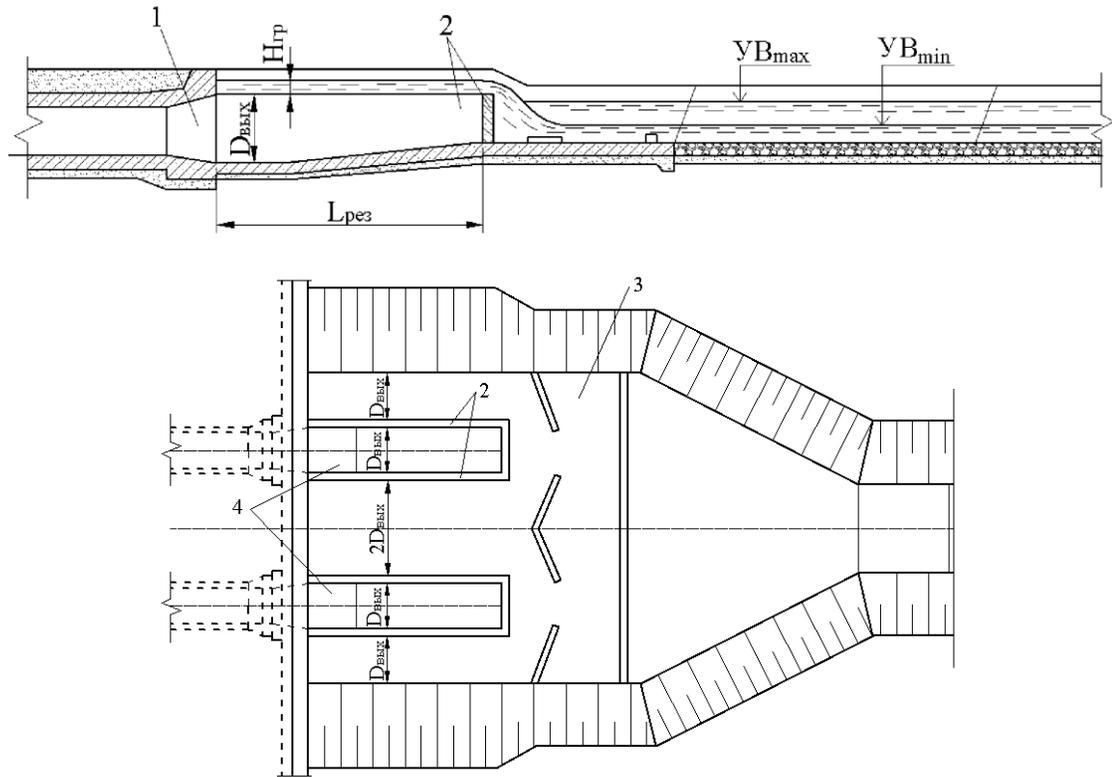


Рисунок 1.5 – Схема водовыпускного сооружения с переливными стенками: 1 – выходной диффузор напорного трубопровода; 2 – стенки приёмной камеры; 3 – бассейн; 4 – приёмные камеры

Для пропуска расхода $Q_{\text{тр}}$ ($\text{м}^3/\text{с}$), проходящего по трубопроводу, на гребне водослива будет создаваться напор $H_{\text{гр}}$:

$$H_{\text{гр}} = Q_{\text{тр}} / (mL\sqrt{2g})^{2/3} \quad , \quad (1.7)$$

где L – длина периметра гребня водослива, м; m – коэффициент расхода.

При увеличении длины гребня водослива L и коэффициента расхода m , уменьшается напор $H_{\text{гр}}$, и, соответственно, энергопотребление насосной станцией.

Форма приёмной камеры в плане может быть любой: круглой, прямоугольной, полигональной и т. д. Разность отметок уровней воды в резервуаре и водоприемнике является дополнительной высотой подъема насоса $h_{\text{доп}}$. Для обеспечения гарантии защиты трубопровода насосной станции от возникновения обратного тока воды, отметка гребня водовыпуска должна превышать максимальный уровень воды в водо-

приёмнике не менее 0,1 метра, с учётом чего значение $h_{\text{доп}}$ будет наименьшим при максимальном уровне в водоприемнике:

$$h_{\text{доп}} = H_{\text{гр}} + 0,1. \quad (1.8)$$

При уровнях воды в водоприемнике ниже максимального:

$$h_{\text{доп}} = H_{\text{гр}} + 0,1 + \Delta H, \quad (1.9)$$

где ΔH – амплитуда колебаний уровней воды в водоприемнике, м.

Водовыпускное сооружение с переливными стенками экономично применять при $H \leq 0,5$ м. Длина гребня водослива должна быть такой, чтобы $H_{\text{гр}} = 0,2 \dots 0,4$ м, а удельный расход на 1 м длины водослива $q = 0,2 \dots 0,9$ м²/с. Размеры водосливной стенки можно определить следующим образом: конструктивно назначают толщину гребня водослива (в верхней части) $t_{\text{гр}} \approx 0,5H_{\text{гр}}$ и вычисляют коэффициент расхода водослива:

$$m = 0.44 \cdot \left(0.7 + \frac{0,185H_{\text{гр}}}{t_{\text{гр}}} \right). \quad (1.10)$$

Затем вычисляют суммарную длину водосливной грани стенки:

$$L = Q_{\text{тр}} / m (2g)^{0.5} H_{\text{гр}}^{3/2}, \quad (1.11)$$

где $Q_{\text{тр}}$ – максимальный расход трубопровода, м³/с; $g = 9,81$ м/с² - ускорение свободного падения;

$$B_{\text{рез}} = D_{\text{вых}}; L_{\text{рез}} = (L - D_{\text{вых}}) / 2.$$

Длину камеры не следует делать менее $4 D_{\text{вых}}$; в этом случае $L > 9 D_{\text{вых}}$. При известной длине гребня водослива уточняют значение $H_{\text{гр}}$. С этой целью находят значение $q = Q_{\text{тр}} / L$, а затем коэффициент расхода, при $q < 0,1$ м²/с:

$$m = (0,3 + 0,375q). \quad (1.12)$$

При $q > 0,1$ м²/с

$$m = 0,3 + 0,375(q - 0,1). \quad (1.13)$$

Определяется напор $H_{\text{гр}}$ при пропуске расхода $Q_{\text{ср}}$ и уточняется коэффициент расхода по формулам (1.12) и (1.13), вычисляется значение $H_{\text{гр}}$ при пропуске макси-

мального и минимального расходов воды по трубопроводу. Вода, переливающаяся через грани камеры, поступает в бассейн водовыпускного сооружения. Размеры и конструкция бассейна рассчитываются таким образом, чтобы обеспечивалось неподтопленное истечение воды через гребень водослива при пропуске максимального расхода и при максимальном уровне воды в отводящем канале, с соблюдением сопряжения струи воды, переливающейся через гребень, с потоком воды в отводящем канале в виде надвинутого гидравлического прыжка. Для необходимости соблюдения данных условий рекомендуется отметку дна камеры водовыпускного сооружения принимать равной отметке дна отводящего канала, с расстоянием между соседними камерами $2D_{\text{вых}}$. В концевой части бассейна, как правило, устраивается гаситель (рисунок 1.5), состоящий из одного ряда косых зубьев и водобойной стенки. Площадь выходного отверстия и диаметр $D_{\text{вых}}$ (или $V_{\text{вых}}$) напорного трубопровода определяется по скорости $V_{\text{вых}}=1,5...2$ м/с. Верхняя кромка выходного отверстия напорного трубопровода заглубляется под минимальный уровень воды в камере - водосливе на 4...5 скоростных напоров на выходе из трубопровода, $V_{\text{вых}}^2/2g$ но не менее чем на 0,2 м. Дно бассейна водовыпускного сооружения сопрягается с дном отводящего канала переходным участком с углом конусности 35...40°. Боковые стенки бассейна и переходного участка выполняется, как правило, откосными. Бассейн и начальная часть отводящего канала защищается от размыва бетонными плитами или каменной наброской.

При проектировании сооружений необходимо обеспечить: заданные гидравлические условия, как в пределах самого сооружения, так и на примыкающих к нему участках верхнего и нижнего бьефов [43];

- устойчивость и прочность сооружения в целом и отдельных его частей;
- фильтрационную прочность грунтов основания;
- надежность и удобство в эксплуатации, возможность осмотра и ремонта сооружения;
- выполнение требований по охране окружающей природной среды;

- высокий уровень индустриализации строительства;
- экономное расходование дефицитных строительных материалов;
- широкое применение местных строительных материалов.

Решать данные задачи одновременно одной какой-либо конструкцией водовыпуска с минимальными затратами сложно, вследствие чего приведенные конструкции водовыпусков мелиоративных насосных станций, как правило, построены с наличием недостатков.

1.3. Конструктивные недостатки проанализированных водовыпускных сооружений

Как показано выше, водовыпускное сооружение мелиоративной насосной станции размещается в голове канала, питающего оросительную систему [19, 24, 42, 44, 49].

В настоящее время испытание временем выдержали два типа водовыпускных сооружений: водовыпуски с обратным клапаном и сифонные водовыпуски. Основное назначение мелиоративных водовыпусков – обеспечить защиту напорного трубопровода насосной станции от возвратного течения воды, возникающего при аварийном отключении электродвигателей НС. При этом требование обеспечить минимальные гидравлические потери уходят на второй план. Но в водовыпусках клапанного типа эти потери настолько велики, особенно после нескольких лет эксплуатации, поэтому на крупных гидромелиоративных системах преимущество получили сифонные водовыпуски, несмотря на то, что их сооружение требует больших материальных затрат [24].

Эффективность эксплуатации и надежная работа сифонного водовыпуска определяется необходимым наличием устойчивого вакуума и с гарантированным выносом из воды воздуха в водоприемник.

В процессе зарядки сифона подача насоса увеличивается на 10-15 %, однако условия аэрации потока и выноса воздуха из сифона ухудшаются, при одновременном снижении давления, при этом уровень воды в нисходящей ветви повышается и выделение воздуха усложняется [47], патент ФРГ № 479847 [63].

Для повышения надёжности работы разработана конструкция, снабжена резервуаром со вспомогательным сифоном, горловина которого при помощи вакуумной струи с электромеханическим клапаном сообщена с трубопроводом горловины сифона, а резервуар с вертикальной трубой наклонным лотком, схема которого показана на рисунке 1.6.

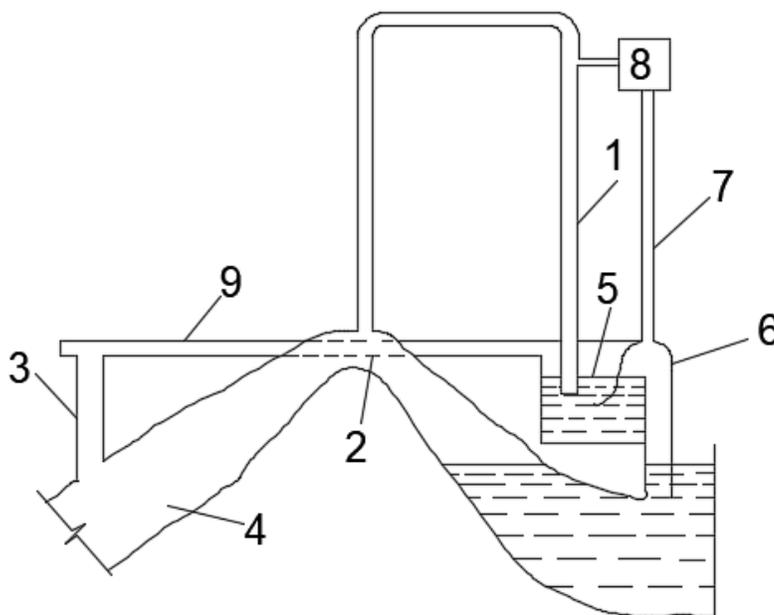


Рисунок 1.6 – Схема сифонного водовыпуска, патент [63]: 1– трубопровод; 2– горловина сифона; 3– вертикальная труба; 4– напорный трубопровод; 5– резервуар; 6– вспомогательный сифон; 7– вакуумные трубки; 8– электромеханический клапан

Устройство работает следующим образом. При пуске насосной установки воздух, вытесняемый водой из напорного трубопровода, выходит наружу через трубу 3 и из сифона 2 через трубопровод 1. После зарядки сифона 2 в трубопроводе 1 устанавливается столб воды, надёжно запирающий вход для воздуха внутрь сифона 2,

поэтому последний оказывается полностью заряженным в течение работы насосной установки.

При отключении привода насоса обесточивается и электромеханический клапан 8, при этом открывается отверстие вакуумной трубки 7 и вспомогательный сифон 6 величиной вакуума сифона 2 заряжается. Вода из резервуара 5 сбрасывается вспомогательным сифоном и открывает входное отверстие в трубопроводе 1. Воздух поступает через трубопровод 1 в сифон 2, срывая в нем вакуум.

Недостатком конструкции является повышенный расход электроэнергии при значительных колебаниях уровня воды.

Разработанная конструкция сифонного водовыпуска [58], позволяющая повысить эффективность зарядки путем улучшения условий отвода воздуха, приведена на рисунке 1.7.

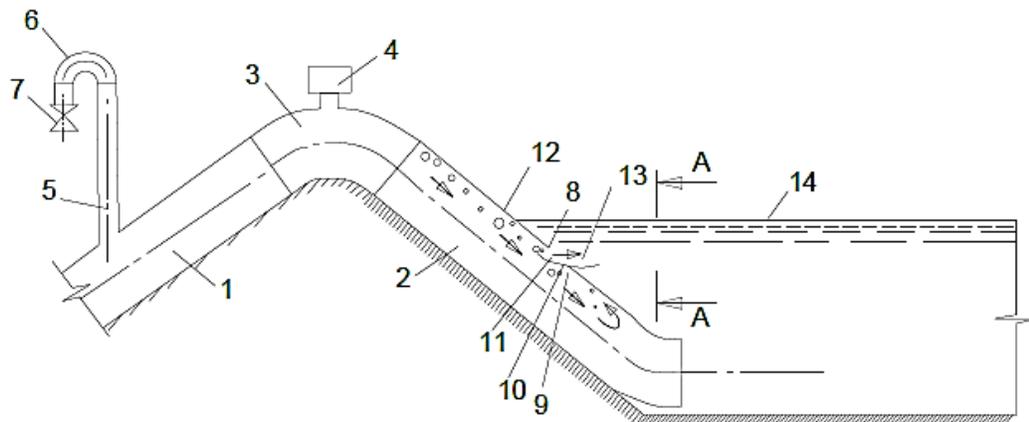


Рисунок 1.7 – Схема сифонного водовыпуска патент [58]: 1 – восходящая ветвь; 2 – нисходящая ветвь; 3 – колено сифона; 4 – клапан срыва вакуума; 5 – воздуховодная труба; 6 – колено; 7 – обратный клапан; 8, 9 – воздухоотводящие отверстия; 10 – перегородка воздухоотводящего устройства; 11 – козырек; 12 – капор сифона; 13 – свободный конец перегородки; 14 – бассейн

Водовыпуск работает следующим образом. При пуске насосного агрегата воздух, вытесняемый водой из колена сифона 3, выходит через клапан 4 срыва вакуума,

а также вместе с водой в воздухоотводящее отверстие 9, в основном над козырьком 11 и частично ниже козырька 1.

При остановке насосного агрегата в сифон поступает воздух через клапан 4 срыва вакуума, при понижении давления в восходящей ветви сифона воздух поступает через клапан 7 на колене 6 по воздухопроводной трубе 5, после чего поток разрывается.

Такого вида конструкция сифонного водовыпуска позволяет повысить эффективность зарядки путем увеличения условий отвода воздуха.

Недостатком конструкции является увеличенный расход электроэнергии при больших колебаниях уровня воды.

Для повышения надёжности эксплуатации разработана конструкция камерного водовыпуска с замкнутой переливной стенкой [57], показанная на рисунке 1.8.

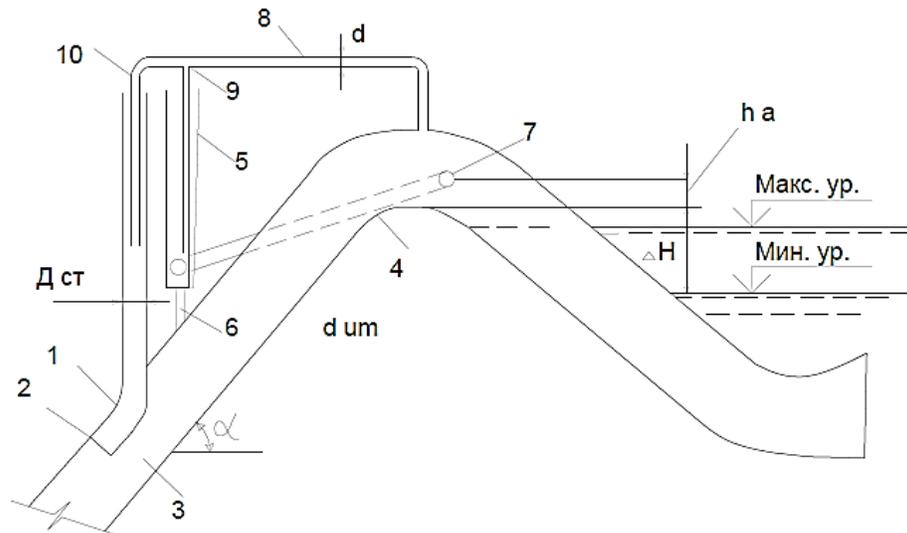


Рисунок 1.8 – Водовыпуск с переливной стенкой замкнутого типа [57]:

1 – трубопровод для подачи воздуха, 2 – начальное сечение трубы для подвода воздуха, 3 – ветви сифона, 4 – сифон, 5 – дополнительный затвор в виде стакана, 6 – импульсная трубка, 7 – зарядная трубка, 8 – магистральный коллектор, 9 – трубка, 10 – воздушная трубка

Для повышения надёжности эксплуатации разработана конструкция сифонного водовыпуска (рисунок 1.9) [59]. На рисунке 1.9, а) показан продольный разрез си-

фонного водовыпуска с наклонной восходящей ветвью, на рисунке 1.9, б) показан план сифонного водовыпуска с наклонной восходящей ветвью, на рисунке 1.9, в) показан продольный разрез сифонного водовыпуска с вертикальной восходящей ветвью.

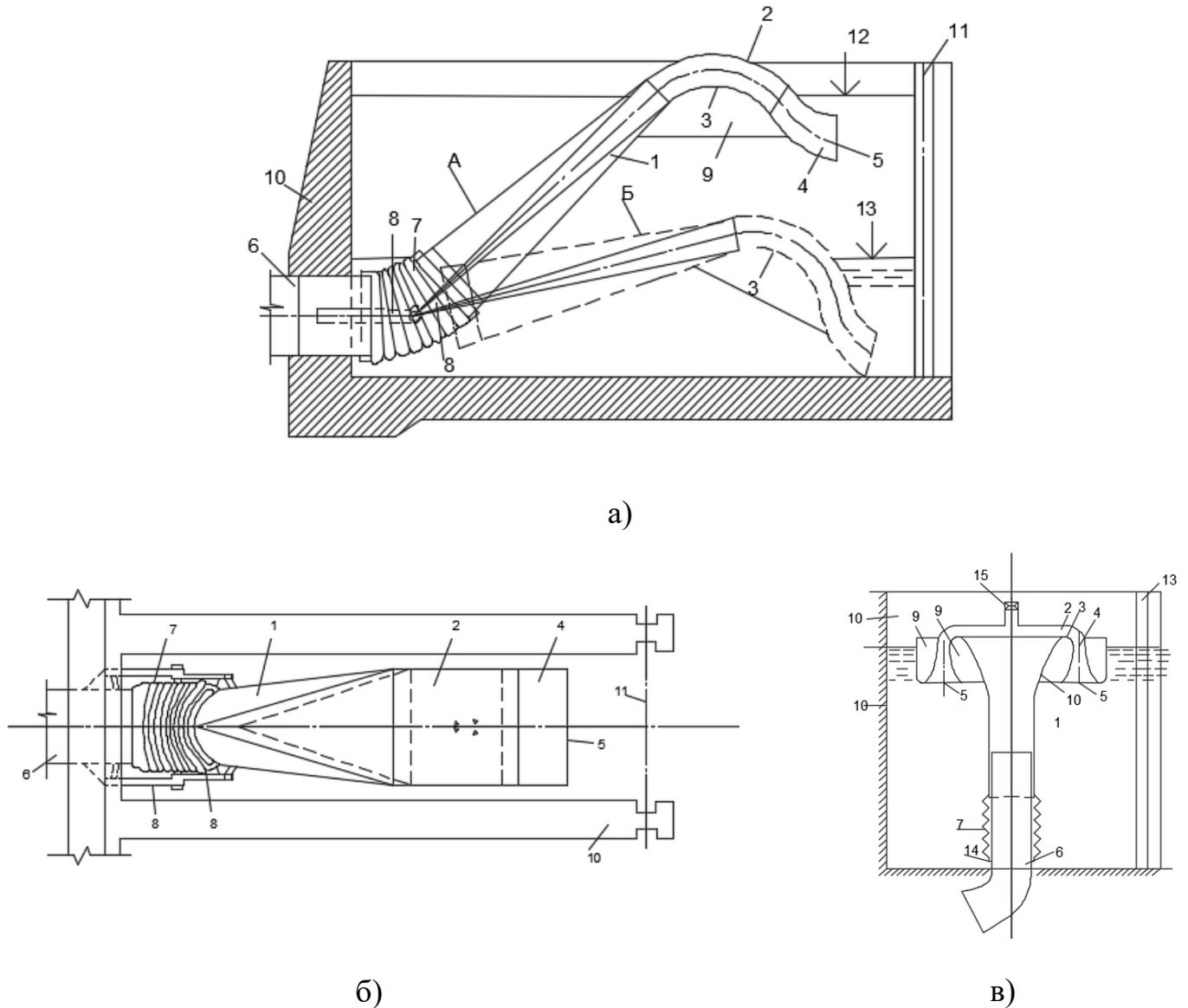


Рисунок 1.9 – Водовыпуск по А. С. СССР № 1016417. [59]; а) – продольный разрез сифонного водовыпуска с наклонной восходящей ветвью; б) – план, изображен сифонный водовыпуск с наклонной восходящей ветвью; в) - показан продольный разрез сифонного водовыпуска с вертикальной восходящей ветвью: 1 – восходящая ветвь, 2 – горловина, 3 – гребень, 4 – нисходящая ветвь, 5 – выпускное отверстие, 6 – напорный трубопровод, 7– сифон, 8 – ограничитель движения, выполненного в вид двух пар пластин, 9 – герметичная камера, 10 – бетонная стенка, 11– ремонтный проем, 12– макс.УВ, 13– мин.УВ, 14 – кольцевой с коническим участком клапан – 15

Устройство работает следующим образом. Горловина 2 с нисходящей ветвью 4 при повышении уровня воды до максимального 12 поднимается до положения "А", при понижении до минимального 13 опускается до положения Б, сохраняя высотное положение гребня 3 и выпускного отверстия 5 относительно поверхности воды в отводящем канале как при максимальном 12, так и минимальном 13 уровнях. При этом отметка гребня 3 сифона изменяется относительно воды в водоприёмных камерах насосов таким образом, что в момент пуска, когда сифон занимает положение Б, гребень 3 находится на минимальной отметке. В данном положении сифона геодезическая высота подъема имеет минимальную величину, что уменьшает пусковой напор подачи в напорный трубопровод 6, способствует снижению энергопотребления и повышению срока службы электроаппаратуры насосной станции. Кроме того, экономический эффект достигается уменьшением нисходящей ветви и времени зарядки сифона.

Недостатком конструкции также является сложность проектирования и монтажа.

На рисунке 1.10 в качестве примера станции подкачки на открытом канале показан продольный разрез одной из 22 насосных станций канала Иртыш- Караганда.



Рисунок 1.10 – Насосный гидроузел станции подкачки на открытом канале Иртыш- Караганда (общий вид)

В составе узла показан подводящий и отводящий участок канала, входят здание насосной станции, напорные трубопроводы, водовыпуск с сопрягающими устройствами и открытая понизительная подстанция. Насосная станция оборудована четырьмя агрегатами вертикальных осевых поворотно - лопастных насосов ОПВ10-185 с синхронными вертикальными двигателями ВДС-325/44-18 мощностью 5000 кВт и напряжением 6000 В. Каскад канала Иртыш-Караганда запроектирован институтом Гидропроект и эксплуатируется с 1971 года [31]. Опыт эксплуатации показал, [43] что на НС канала Иртыш-Караганда выброс воздуха через выходное отверстие сифонных водовыпусков наблюдается при максимальном $УВБ_{\text{макс}}$ в отводящем канале в зимнее время. Также выявлено отсутствие выброса воздуха в отводящий канал при пуске насоса, независимо от величины суммарного проходного сечения отверстий КСВ в сечении горла сифона, при средней скорости потока в трубопроводе, при его заполнении, превышающей на 15 % скорости в канале [6].

Выводы по главе I

- Сифонные водовыпуски обладают низкими гидравлическими потерями, но являются наиболее дорогостоящими, по сравнению с существующими сооружениями, конструкциями. Кроме того, при значительных колебаниях уровня воды в водоприёмном канале, эксплуатация затрудняется при возможных срывах вакуума и периодическом отключении.
- Водовыпуски, оборудованные обратными клапанами просты в устройстве, но не применяются при проектировании в связи с увеличенными гидравлическими потерями, увеличивающимися по мере роста срока эксплуатации.

На основании проведенного анализа существующих водовыпускных сооружений сформулированы цель и задачи настоящей диссертационной работы.

Цель: Теоретическое и экспериментальное обоснование параметров водовыпускного сооружения телескопического типа мелиоративной насосной станции.

Задачи:

1. Изучить современные конструкции водовыпускных сооружений мелиоративных насосных станций.
2. Теоретически обосновать способы расчёта переливного водовыпускного сооружения телескопического типа с переменным положением гребня переливной стенки.
3. Разработать методы исследования и моделирования водовыпуска телескопического типа мелиоративной насосной станции.
4. Провести анализ результатов исследований и разработать практические рекомендации для расчёта водовыпуска телескопического типа.

ГЛАВА II. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РЕЖИМА И ПАРАМЕТРОВ ВОДОВЫ- ПУСКОВ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОГО ТИПА

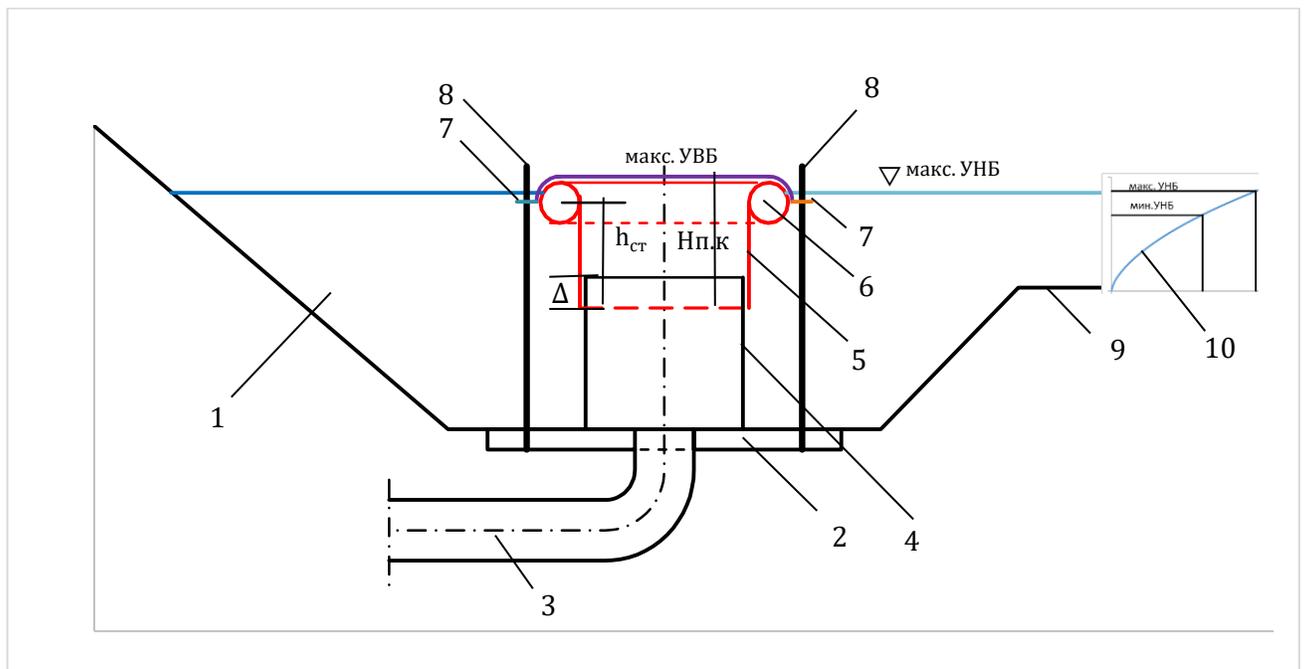
В практике применения линейных поплавковых конструкций при решении различных технических задач применяются, в основном, поплавки с круглоцилиндрическим поперечным сечением. Примером таких поплавков могут служить боновые ограждения на ГЭС для защиты водоприёмников от плавающего мусора, боновые ограждения для защиты акваторий от загрязнения воды нефтепродуктами при аварии морских скважин и нефтеперевозящих судов и т.п. Поэтому применение круглоцилиндрических поплавков в рассматриваемой конструкции водовыпускного сооружения насосной станции придаёт ей определённую простоту. Однако, несмотря на кажущуюся конструктивную простоту, конструкции поплавков с круглоцилиндрическим поперечным сечением обладают одним существенным недостатком: сложно подобрать трубы требуемого по расчёту диаметра, а ввиду штучного производства водовыпусков телескопического типа организация изготовления труб для поплавков расчётного диаметра затруднительна.

С другой стороны, использование в качестве строительного материала подвижного короба и поплавков листового ПХВ, с использованием производственных тепловых фенов [84, 85], позволяет вместо поплавков круглоцилиндрических поперечных сечений в условиях строительных организаций применять поплавки с квадратным или прямоугольным сечением.

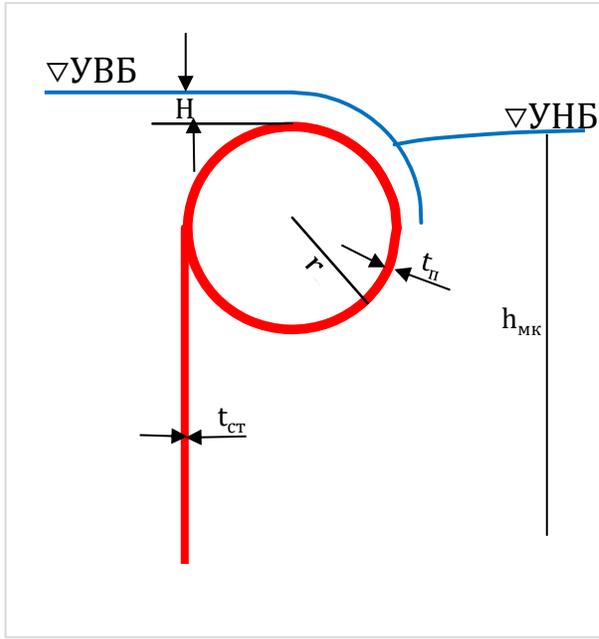
Учитывая эти обстоятельства, ниже рассмотрены расчёты как поплавков с круглоцилиндрическим, так и с квадратным поперечным сечением.

2.1. Конструктивные особенности водовыпуска телескопического типа с поплавком круглоцилиндрического поперечного сечения

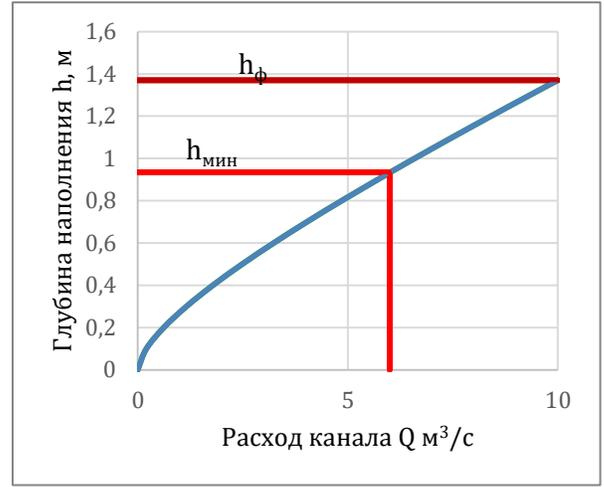
Для снижения гидравлических потерь энергии и снижения строительной стоимости водовыпускного сооружения разработана новая конструкция водовыпуска телескопического типа, показанная на рисунке 2.1 с поплавком круглоцилиндрического поперечного сечения. На рисунке 2.1-а показан продольный разрез положения поплавка при максимальном уровне воды в водоприёмном бассейне; на рисунке 2.1-б показан продольный разрез поплавка при изливе максимального расхода; на рисунке 2.1-в примерная кривая расходов отводящего канала $Q=f(h)$; на рисунке 2.1-г при полностью опорожнённом водоприёмном канале и напорном водоводе; на рисунке 2.1-д план телескопического водовыпуска.



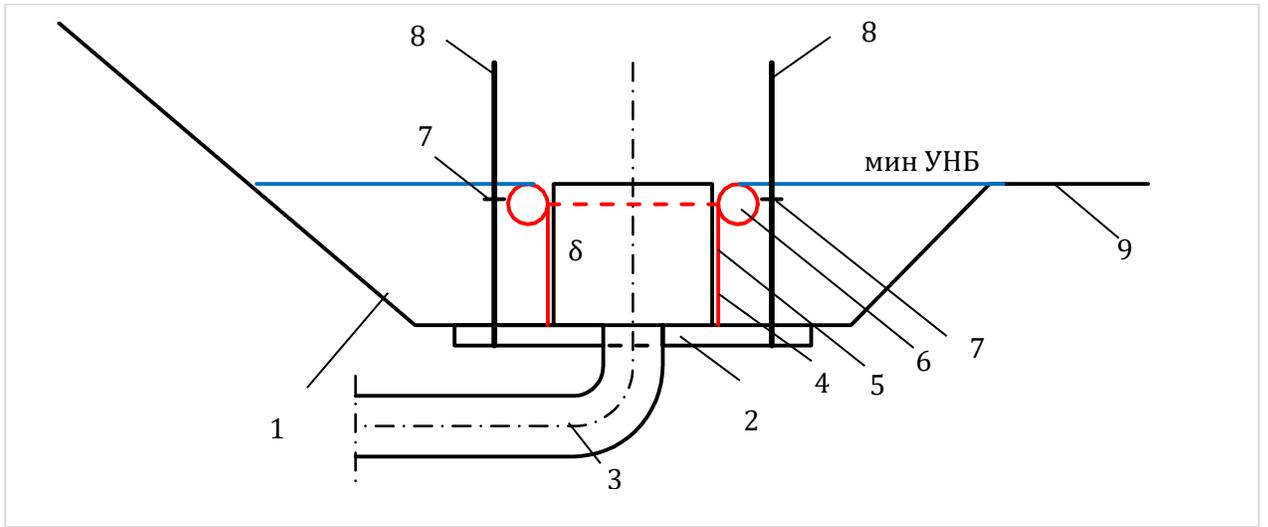
a)



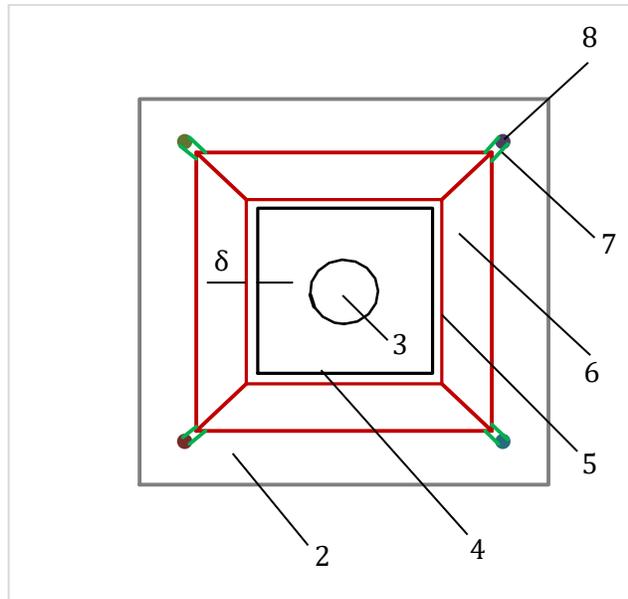
б)



в)



г)



д)

Рисунок 2.1 – Конструкция водовыпуска телескопического типа с поплавком круглопоперечного сечения:

а – продольный разрез при максимальном уровне воды в водоприёмном бассейне; б – схема излива воды при максимальном расходе трубопровода; в – примерная кривая расходов отводящего канала $Q=f(h)$; г – продольный разрез при полностью опорожнённом водоприёмном канале и напорном водоводе; д – план телескопического водовыпуска;

1 – водоприемник бассейна; 2 – бетонная плита; 3 –напорный трубопровод; 4 – внутренний короб; 5 –подвижный короб; 6 –поплавок; 7 – кольца; 8 –направляющие стержни; 9 – дно водоприемного канала; 10 – примерная кривая расходов отводящего канала $Q=f(h)$

Телескопический водовыпуск расположен в водоприёмном бассейне 1 в голове магистрального канала гидромелиоративной системы, имеющего максимальный - макс. УНБ и минимальный - мин. УНБ уровень воды, определяемые графиком орошения сельскохозяйственных культур мелиоративной системы [30, 36, 40].

Водовыпуск установлен на бетонной плите 2, в которой жёстко закреплён концевой участок напорного трубопровода 3 насосной станции, выходящий вертикально вверх. Водовыпуск состоит из двух коробчатых конструкций, соединённых с возможностью телескопического перемещения относительно друг друга. Внутренний

короб 4 жестко прикреплен к бетонному основанию 2, а второй короб 5 установлен с возможностью перемещения по вертикали вдоль первого короба 4. К верхнему ребру подвижного короба 5 по периметру жестко прикреплены отрезки труб, герметично соединенных между собой, образующие поплавок 6, с гребнем. Для предупреждения поперечного перемещения подвижного короба 5 относительно нижнего короба 4 вследствие колебания поверхности воды в водоприёмном бассейне и канале, к звеньям поплавка 6 в узлах их стыковки установлены кольца 7, через которые проходят фиксирующие стержни 8, жестко закрепленные в бетонном основании 2 и установленные вертикально. Для компенсации неточности вертикальной установки направляющих стержней 8, кольца 7 выполнены эллиптической формы. Для обеспечения минимального геодезического подъёма воды в период наполнения канала, глубина водоприёмного бассейна 1, назначается такой, чтобы при полностью опорожнённом канале гребень поплавка 6 находился не выше дна 9 водоприёмного канала, на уровне которого устанавливается уровень воды в водоприёмном бассейне 1 при полностью опорожнённом канале и телескопическом водовыпуске.

Дополнительно на рисунке 2.1 обозначены:

- $h_{пк}$ – высота стенок подвижного короба;
- $H_{пк}$ - полная высота подвижного короба;
- макс УВБ и макс УНБ – максимальные уровни воды в водовыпуске и в водоприёмном канале;

$h_{мк}$ – максимальная глубина магистрального канала;

$d_{п}$ – диаметр поплавка;

Δ – степень минимального перекрытия стенок неподвижного и подвижного короба при максимальном подъёме последнего;

Δ – зазор между стенками неподвижного и подвижного коробов.

В этой конструкции подвижного короба поплавков жестко крепится в плоскости горизонтального диаметрального сечения к верхнему ребру стенок короба. При ис-

пользовании в качестве материала стенок короба и поплавок ПВХ эта процедура легко осуществляется тепловой сваркой.

Диаметр труб 6 поплавок 7 подбирается таким, чтобы их подъёмная сила обеспечивала плавучесть верхнего короба 4 с учётом гидродинамической нагрузки воды, переливающейся через гребень поплавок 6 подвижного короба 5. На рисунке 2.1-в условно приведена расходная характеристика магистрального канала.

Вода в нижний короб 2 подаётся из концевого участка напорного трубопровода 3, выполненного вертикально и закреплённого в бетонном основании 2 по центру нижнего короба 4.

При такой конструкции водовыпускного сооружения верхнее сечение подвижного короба представляет собой в плане замкнутый прямоугольный водослив с круглоцилиндрическим оголовком, положение которого будет одним и тем же относительно уровня воды в канале независимо от его расхода. Это связано с тем, что при подъёме уровня воды в канале, поплавок будет перемещать вверх верхний короб следуя за перемещением уровня воды в канале, а при опускании уровня воды в канале подъёмная сила поплавок будет уменьшаться и под действием собственного веса верхний короб будет опускаться до тех пор, пока поплавок не восстановит плавучесть короба.

Поперечные размеры неподвижного поплавок назначаются такими, чтобы обеспечить свободное перемещение подвижного короба относительно стенок неподвижного короба без возникновения трения между ними. Это условие выполняется формированием между ними зазора δ , минимально возможного по условиям технологии изготовления короба. Для обеспечения стабилизации работы подвижного короба при его максимальном подъёме, необходимо обеспечить перекрытие по высоте его стенок и стенок неподвижного короба на величину Δ , как это показано на рисунке 2.1-а. Конструктивно эту величину можно назначить $\Delta=0,2\dots0,3$ м.

2.2. Гидравлический расчёт параметров восходящей струи

2.2.1. Общие положения

Гидравлическая схема работы рассматриваемого варианта водовыпускного устройства мелиоративной насосной станции телескопического типа представляет собой вертикальную восходящую струю, аналогичную с вертикальной струёй фонтана, но работающей в режиме затопленного истечения.

В соответствии с такой гидравлической схемой, параметры струи на выходе из напорного трубопровода насосной станции могут быть рассчитаны как параметры струи с соответствующими начальными характеристиками, определяемыми этими параметрами.

Но отличие работы рассматриваемой конструкции водовыпускного устройства насосной станции от работы фонтана состоит в том, что струя напорного трубопровода представляет собой «затопленную струю» с вертикально восходящим потоком. Схему работы такой струи в доступной литературе обнаружить не удалось, в связи с чем, представляется необходимым в комплексе изучить эти вопросы и определить зону работы струи напорного трубопровода для конструирования и расчёта оптимальных параметров водовыпускного устройства.

2.2.2. Параметры незатопленной вертикальной струи напорного трубопровода

Использование фонтанов известно ещё с давних времён. Родник, облицованный камнем руками первобытного человека, был первым прообразом фонтана. Декоративная каменная укладка в месте выхода родника способствовала созданию струи для возможности наполнения глиняной и деревянной посуды.

По мере развития цивилизации фонтаны приобрели роль источников водоснабжения, о чём свидетельствуют изображения на гробницах Египетских фараонов,

Месопотамии, древних письменных источниках Китая, Индии, Греции. Утилитарное значение фонтанов, наряду с колодцами, служат и в настоящее время источниками водоснабжения в некоторых населенных пунктах.

Параллельно с утилитарным значением, по мере развития человеческого общества грубая облицовка фонтанов начала приобретать элементы эстетические. Родники и колодцы обрабатываются каменными глыбами; появляются водометы, украшенные грубой скульптурой.

В результате возникли такие произведения искусства, как изящные нимфеи Древней Греции, монументальные фонтаны Рима, а позже фонтаны Версаля и Петергофа. До появления гидравлики как инженерной науки строительство фонтанов выполнялось на уровне интуитивных исполнений архитекторов. При появлении гидравлических законов Эйлера и Бернулли в XVII-XIX века и появились расчётные зависимости для определения геометрических и гидравлических параметров фонтана. Наиболее полные сведения об истории развития фонтанов выполнено в работах П.А. Спышнова, В. Теадоровского, В. Шошина и др.. [29, 66, 86, 88, 87].

В этих работах приводятся расчётные зависимости по определению высоты подъёма струи фонтана, основанные, в основном, на экспериментальных данных.

Наиболее подробно теоретическое обоснование и методика расчета параметров вертикальных водяных струй рассмотрена в работе А.Коха и М.Карстаньена [37]. При расчёте параметров струи фонтана авторами рассмотрена струя (рисунок 2.2), имеющая ствол и гребень в форме гриба.

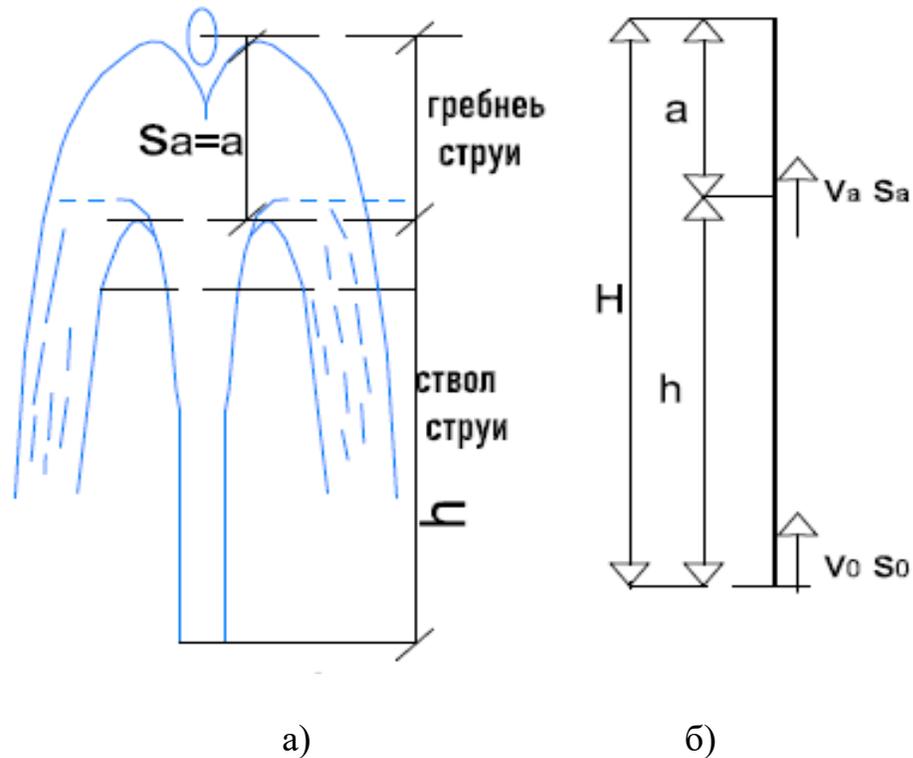


Рисунок 2.2 – Схема фонтанной струи по Коху: а) – общий вид; б) – расчётная схема струи

При расчётах приняты следующие обозначения:

d – диаметр сопла, формирующего струю;

$R_0 = d/2$ – радиус сопла и начального сечения струи;

V_0 – начальная скорость струи;

$s_0 = \frac{V_0^2}{2g}$ – скоростной напор струи на выходе из сопла;

$s_a = \frac{V_a^2}{2g}$ – скоростной напор в сечении возврата струи;

h – высота ствола струи;

$H = h + a$ – полная высота фонтанной струи.

При эксплуатации фонтанов, установлено [37], что высота подъёма струи H из сопла со скоростью V_0 меньше скоростного напора $s_0 = \frac{V_0^2}{2g}$ струи в выходном сечении сопла. Исследователями [37] при разработке конструкций и расчетов параметров струи фонтана, не установлена взаимосвязь между высотой фонтана H , высотой

ствола h , скоростным напором S_0 и начальной скоростью V_0 , в тоже время отмечена некоторая связь между ними. Так, Б.Фридманом в [89, 90] указано, что за основной причиной уменьшения высоты подъёма струи по сравнению с величиной скоростного напора в выходном сечении сопла является трение струи о воздух: «При невысокой скорости истечения высота H струи может быть приравнена скоростному напору, при увеличении скорости, вследствие сопротивления, разница заметно возрастает».

Согласно законам физики движения твёрдого тела известно [37], что высота подъёма S_0 частицы при отсутствии сил сопротивления приравнена к скоростному напору начальной скоростью V_0

$$s_0 = \frac{v_0^2}{2g}, \quad (2.1)$$

при высоте $h \leq S_0$ частица твёрдого тела обладает скоростью:

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot (s_0 - h)}. \quad (2.2)$$

В случае, когда вместо недеформируемой частицы рассматривается ряд призм, составляющих водяную струйку, при начальной скорости подъёма V_0 в секундный промежуток времени, по тому же вертикальному пути проследует $V_0 \cdot t_0$ частиц со скоростью, уменьшающейся постепенно с высотой от $V=V_0$ до величины $V=0$.

Для установления положения нахождения отрезков струйки, при подъеме по одной вертикали, предполагается, что их нахождение таким образом, когда они не препятствуют взаимному движению (рисунок 2.3) [37].

Для примера разбивается высота подъёма S_0 , соответствующая скорости V_0 , на четыре участка таким образом, когда в нижних линиях A_1, A_2, A_3 трёх верхних участков высоты S_0 , скорость уменьшается на четверть. Отрезки струек предполагаются в виде призм высотой δ_0 , поднимающиеся при движении от высоты линии A_0 в течение времени Δt ($\delta_0 = V_0 \cdot \Delta t$).

Предполагается, что отрезок 8 поднимается в начале, в момент, когда отрезок 1 входит в вертикальный ряд, каждый из последующих отрезков 2, 3, 4... находится на

величину δ_0 выше предыдущего. Пренебрегая незначительными уменьшениями скорости движения, в низкой зоне D, призмочки сдвигаются и образуют струйку.

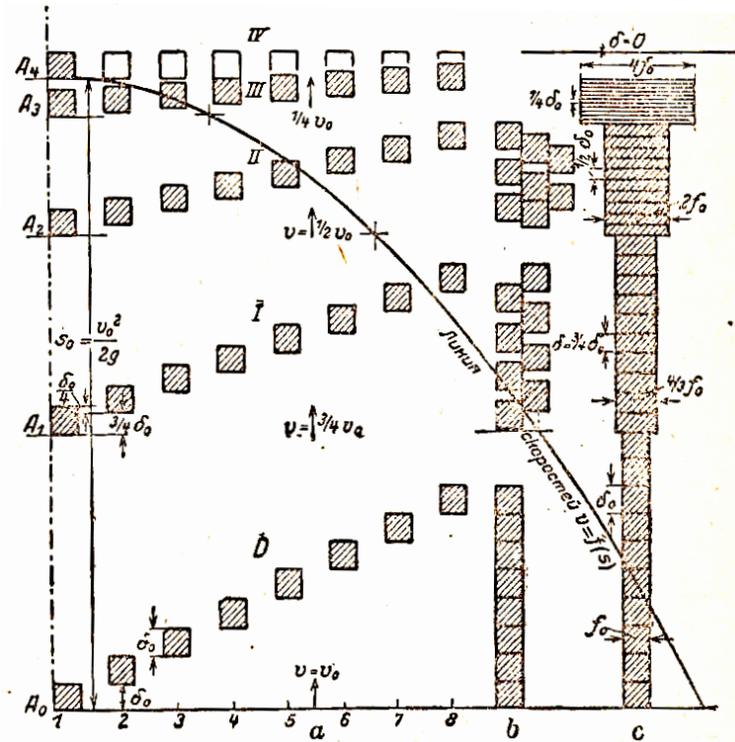


Рисунок 2.3 – Схема формирования поперечного сечения вертикально восходящей струи (рис.116 [37])

Нижнюю границу второй зоны I, линию с высотой A_1 , призмочки переходят уже со скоростью $3/4 V_0$, таким образом, в данной зоне каждая призмочка занимает положение через время Δt выше только на $3/4 \delta_0$, чем следующая. Призмочки этого отрезка не смогут образовать струйку путём сдвига их по горизонтальному направлению, как это было возможно в отрезке высоты D, а потому несколько призмочек будут вытолкнуты в стороны с образованием новой струйки. В зоне II возникнет две боковые струи, а в зоне III призмочки располагаются друг относительно друга в горизонтальных рядах, и так в предположении когда в зоне A_0 струйка на длине 1 м содержит n_0 призмочек, тогда через точку A_0 в секунду проходит $V_0 \cdot n_0$ призмочек, из которых каждая имеет длину δ_0 , получено:

$$V_0 \cdot n_0 \cdot \delta_0 = V_0 \quad (2.3)$$

откуда

$$\delta_0 = \frac{1}{n_0}. \quad (2.4)$$

Через точку А, где скорость снизилась до значения V , в секунду проходит $V_0 \cdot n_0$ призмочек, которые уже имеют длину δ , поэтому:

$$V_0 \cdot n_0 \cdot \delta = V, \quad (2.5)$$

откуда

$$\delta = \frac{V}{V_0} \cdot \frac{1}{n_0} = \frac{V}{V_0} \cdot \delta_0. \quad (2.6)$$

Из условия сохранения неразрывности потока происходит увеличение толщины струи от f_0 до f , при этом выполняется равенство:

$$f \cdot \delta = f_0 \cdot \delta_0. \quad (2.7)$$

откуда

$$f = \frac{\delta_0}{\delta} \cdot f_0 = \frac{V_0}{V} \cdot f_0. \quad (2.8)$$

Таким образом, длины призмочек укорачиваются в отношении V/V_0 , а площади, соответственно, увеличиваются на значение отношения V/V_0 .

Следовательно, уменьшение высоты подъёма струи объясняется на величину длины на значение V/V_0 .

Для вычисления высоты подъёма струи устанавливается отношение между величиной ΔS отдельной призмочки, пройденной за промежуток времени Δt и пути Δy ряда призмочек.

При рассмотрении отдельных призмочек и ряда покинувших исходную точку A_0 двигаясь со скоростью V_0 , при этом в двух случаях пройдёт N призмочек в течение времени Δt . Рассмотрено прохождение призмочек через сечение А, в котором скорость движения снизится до скорости V . За такое время отдельные призмочки пройдут путь $\Delta S = N \cdot \delta_0$. В это же время высота призмочек струйки сократится до величины δ , и пройденный путь определится по зависимости $\Delta y = N \cdot \delta$.

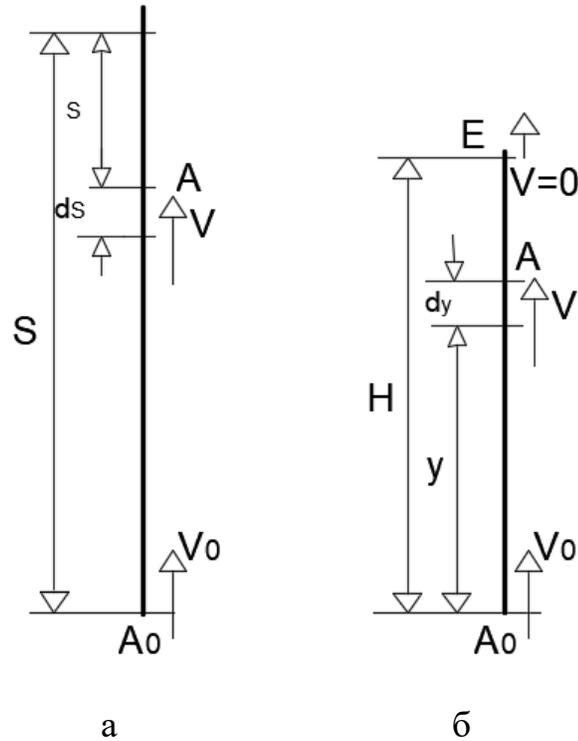


Рисунок 2.4 – Схема подъёма призмочек водяной струи: (а – схема подъёма изолированных призмочек; б – схема подъёма связанных призмочек струйки)

Принимая обозначения направления пути по рисунку 2.4, составляется соотношение:

$$-\Delta s = N \cdot \delta_o \quad \Delta y = N \cdot \delta \quad -\frac{\Delta y}{\Delta s} = \frac{\delta}{\delta_o} = \frac{V}{V_o}, \quad (2.9)$$

Принимая во внимание ранее принятое уравнение (2.7) $s = \frac{V^2}{2g}$, получена величина 1-й производной пути по времени:

$$ds = \frac{V \cdot dV}{g}, \quad (2.10)$$

и

$$dy = -\frac{1}{V_o \cdot g} \cdot V^2 \cdot dV. \quad (2.11)$$

Интегрирование уравнения (2.11) даст фактическое увеличение расстояния прохождения призмочек струи:

$$y = -\frac{1}{v_0 \cdot g} \cdot \int_{V_0}^V V^2 \cdot dV = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{v_0 \cdot g} \cdot (V_0^3 - V^3) = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{V_0^2}{2g} - \frac{V}{v_0} \cdot \frac{V^2}{2g} \right),$$

$$y = \frac{2}{3} \cdot \left(s_0 - \frac{V}{v_0} \cdot s \right). \quad (2.12)$$

При определении высоты h внешней оболочки ствола струи получено, что при $V=0$ значение $s=0$:

$$h = \frac{2}{3} \cdot s_0 = \frac{2}{3} \cdot \frac{V_0^2}{2g}. \quad (2.13)$$

Для определения полной высоты струи фонтана предложено несколько зависимостей.

Мариотт [37] ещё в 1686 году предложил экспериментальную формулу для расчёта высоты H подъёма струи:

$$H = \frac{s_0}{1+0,0103 \cdot s_0}. \quad (2.14)$$

Вейсбах [37] в 1848 году предложил экспериментальную формулу для расчёта высоты H подъёма струи

$$H = \frac{s_0}{1+0,01158 \cdot s_0+0,000582 \cdot s_0^2}, \text{ для } d = 1\text{см}; \quad (2.15)$$

$$H = \frac{s_0}{1+0,00778 \cdot s_0+0,0006038 \cdot s_0^2}, \text{ для } d = 1,41\text{см}; \quad (2.16)$$

Д'Аубуиссон упростил формулу Мариотта:

$$H = (1 - 0,01 \cdot s_0) \cdot s_0. \quad (2.17)$$

П.А. Спышновым [66], были рекомендованы для определения высоты H фонтана две формулы:

- Люгера для диаметров струи $d=10...30\text{мм}$:

$$H = \frac{s_0}{1+\varphi \cdot s_0}, \quad (2.18)$$

$$\varphi = \frac{0,25}{d+(0,1 \cdot d)^3}, \quad (2.19)$$

- для насадок диаметром более 50 мм применима формула Фридмана для d и H в метрах:

$$H = \left(1 - 0,000113 \cdot \frac{s_0}{d} \right) \cdot s_0 \quad (2.20)$$

В более поздних работах, авторы [64] рекомендуют использовать формулу Люгера для определения высоты фонтана.

Высота подъёма струи H/s_0 увеличивается с уменьшением напора $s_0=V_0^2/2g$ на выходе из сопла. При совсем малых величинах скоростного напора $s_0 \leq d$ диаметра насадка ствол струи исчезает, а корона превращается в кольцевой водослив с острой кромкой, расход которого рассчитывается по формуле водослива с острой кромкой:

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot m \cdot r_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_0^3}, \quad (2.21)$$

где – $m=0,42\dots0,44$ коэффициент расхода; r_0 – радиус насадка; H_0 – глубина по оси кроны над сечением возврата струи.

На рисунке 2.5 приведено сопоставление относительных высот подъёма струи фонтана в долях от величины скоростного напора s_0 скорости струи в выходном сечении сопла, полученным по формулам различных авторов:

$$\frac{H}{s_0} = f(V_0) \quad (2.22)$$

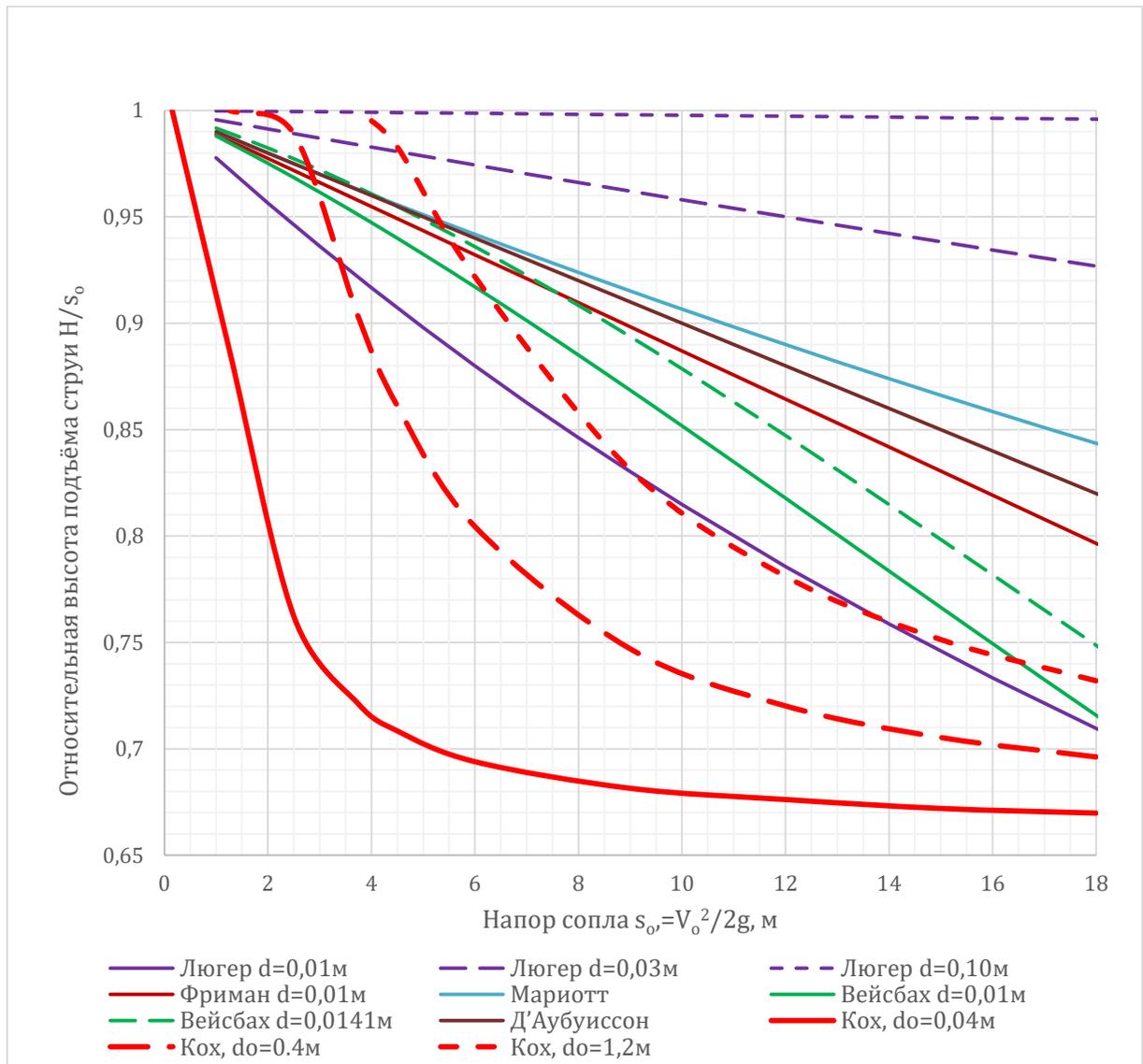


Рисунок 2.5 – Относительная высота подъёма $H/s_0=f(S_0)$ струи, подсчитанная по формулам различных авторов

Как видно по графикам рисунка 2-5, все известные расчётные зависимости дают значения относительной высоты подъёма фонтана $H/s \rightarrow 0$ при $V_0 \rightarrow 0$.

2.2.3. Определение параметров внешней оболочки вертикальной струи

По определению Коха [37] вертикально поднимающуюся струю можно представить как поток в невидимом стволе (упругой внешней оболочке), заканчивающийся короной – водяной шапкой, спадающей по периметру верхнего поперечного

сечения ствола. Расчётная схема продольного сечения вертикального ствола неподтопленной струи приведена на рисунке 2.6.

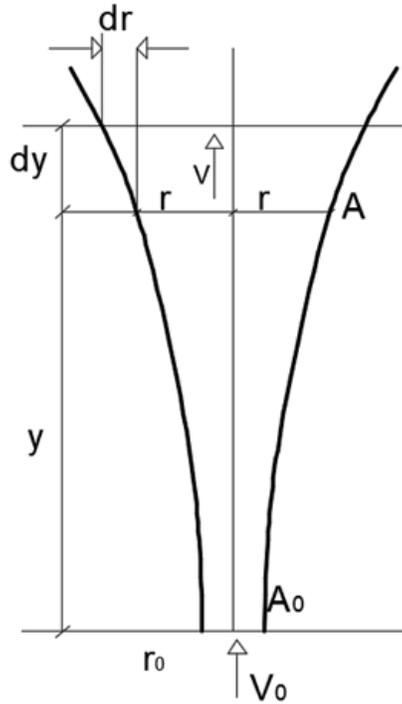


Рисунок 2.5 – Расчётная схема продольного сечения вертикальной неподтопленной струи

Известно, что расход струи Q с круглым поперечным сечением радиусом r_0 в сечении A_0 не изменится по мере рассмотрения вышележащих сечений [50, 51]:

$$Q = \pi \cdot r_0^2 \cdot V_0 = \pi \cdot r^2 \cdot V, \quad (2.23)$$

откуда получено

$$r = r_0 \cdot \sqrt{\frac{V_0}{V}}. \quad (2.23')$$

Для касательной к оболочке струи с углом φ величина $tg\varphi$ к вертикальной оси определится:

$$tg\varphi = \frac{dr}{dy} = \frac{\frac{1}{2}r_0 \cdot \sqrt{V_0} \cdot V^{-1,5}}{\frac{1}{V_0 \cdot g} \cdot V^2} = \frac{1}{4} \cdot \frac{r_0 \cdot V_0^{1,5} \cdot V^{-1,5}}{\frac{V^2}{2 \cdot g}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{r_0}{s} \cdot \left(\frac{V_0}{V}\right)^{1,5}. \quad (2.24)$$

Для начального сечения A_0 при скорости $V=V_0$ получено:

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{1}{4} \cdot \frac{r_0}{s_0}. \quad (2.25)$$

Для примера приведены параметры вертикально восходящей струи с радиусом $r_0=0,2$ м при скорости истечения $V_0=18$ м/с, по данным Коха [37].

Таблица 2.1– Расчёты параметров ствола струи с начальным диаметром $r_0=0,2$ м при скорости $V_0=18$ м/с

скорость в сечении на высоте y v , м/с	Относительная скорость в сечении на высоте y v/v_0	скоростной напор s в сечении на высоте y , S, м	высоту подъёма отдельной призмочки; s_0-s , м	высоту подъёма отдельной струй- ки; $y = \frac{2}{3} \cdot (s_0 - \frac{v}{v_0} \cdot s)$	отношение высот подъёма; $\frac{y}{s_0-s}$	высоту линии энергии; $y+s$, м	потери энергии; $\Delta S_0 = s_0 - (y+s)$	радиус поперечного сечения струи на высоте y ; r	тангенс угла наклона к оси касательной к внешней границе (оболочки) струи. $\operatorname{tg} \varphi$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$v_0=18$	1,0	$s_0=$ $=16,51$	0	0	0,0	16,51	0	0,200	0,003
15	5/6	11,47	5,04	4,64	0,921	16,11	0,40	0,219	0,006
12	2/3	7,34	9,17	7,75	0,845	15,09	1,42	0,245	0,012
9	1/2	4,13	12,38	9,63	0,778	13,76	2,57	0,283	0,034
6	1/3	1,83	14,68	10,60	0,722	12,43	4,08	0,346	0,143
3	1/6	0,46	16,05	10,96	0,683	11,42	5,09	0,49	1,600
2	1/9	0,20	16,31	11,01	0,675	11,21	5,30	0,600	7,0
1	1/18	0,05	16,46	11,01	0,669	11,06	5,45	0,848	76,1
0	0	0	16,51	11,01	0,667	11,01	5,46	∞	∞

По данным таблицы 1 на рисунке 2.7 построен продольный профиль ствола струи с начальным радиусом $r_0=0,2$ м при скорости $V_0=18$ м/с.

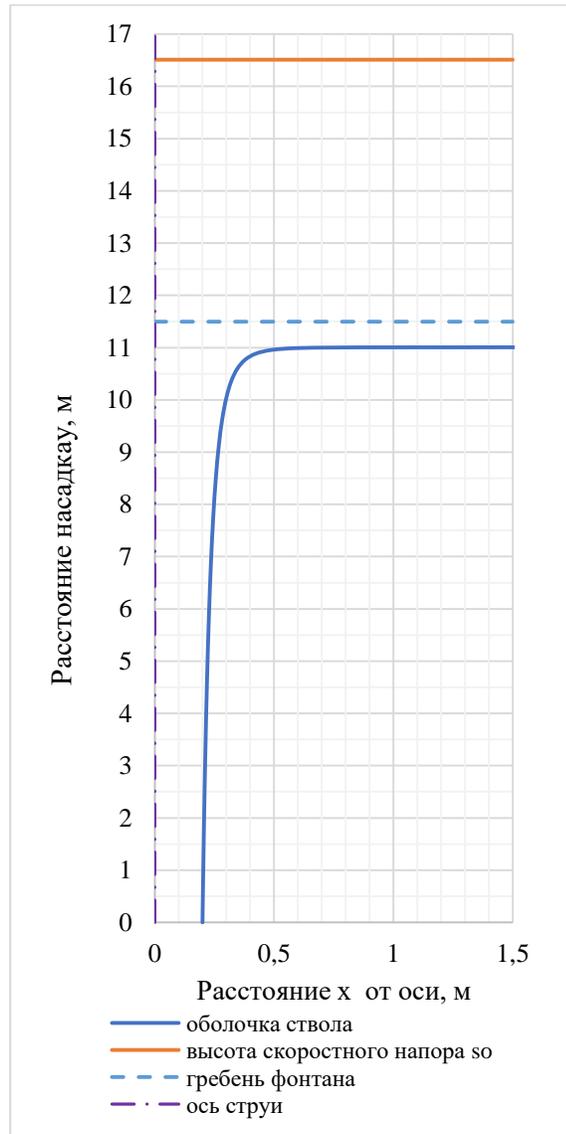


Рисунок 2.7 – Теоретический продольный профиль ствола струи с начальным радиусом $r_0=0,2$ м при скорости $V_0=18$ м/с

2.2.4. Определение параметров короны вертикальной струи

По мере подъёма струи вертикальная скорость в её поперечных сечениях уменьшается и в силу закона неразрывности потока диаметр струи увеличивается. При этом наступает момент, когда силы инерции подъёма струи уменьшаются

настолько, что уже не могут противостоять силам тяжести и растекающаяся струя начинает возвратное движение вниз, образуя шапку над восходящим участком струи. На рисунке 2-8 приведен пример формирования такой шапки над струёй с начальными параметрами $r_0=0,2$ м и $V_0=18$ м/с, дублирующий рисунок 120 [37]. На рисунке 2.8, а) показана шапка струи в натуральных координатах, приведенная в [37], а на рисунке 2.8, б) показана шапка струи в относительных координатах $y/H_0=f(r/H_0)$ для координат Коха и для очертаний струи как водослива с острой кромкой при истечении через оболочку струи в сечении возврата её движения.

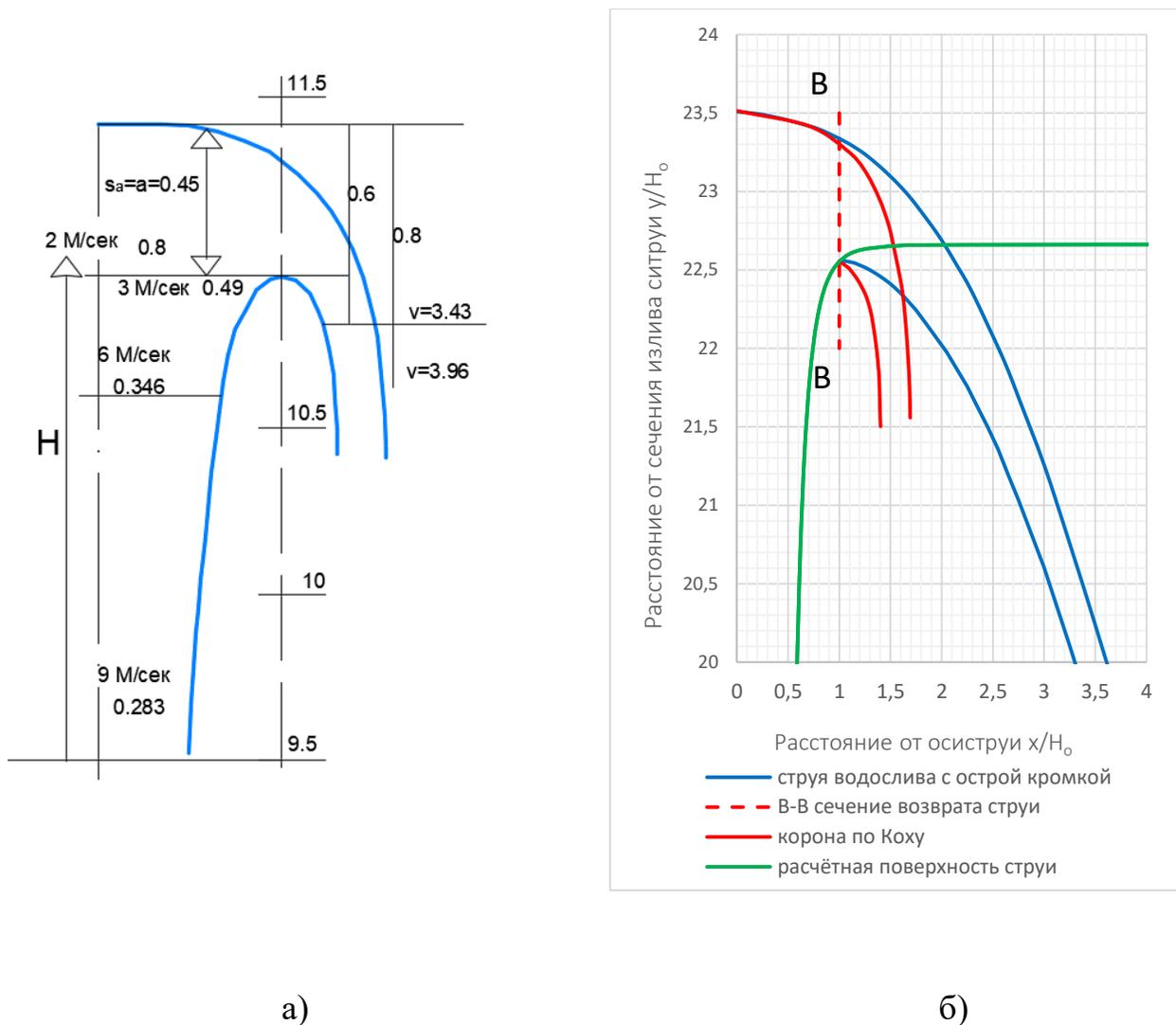


Рисунок 2.8 – Формирование шапки на вершине вертикальной струи.
а – по Коху [37]; б - с учётом истечения воды из шапки как через кольцевой водослив

При построении шапки Кох не указал методику её построения, а просто привёл картину шапки струи.

Если же рассматривать оболочку струи как упругую поверхность, то сечение возврата её движения можно условно рассматривать как ребро кольцевого водослива с острой кромкой. Воспользовавшись относительными координатами верхней и нижней поверхности струи, приведенными, например, в [34], построены границы струи как потока на водосливе с острой кромкой. Как видно из рисунка 2.8, б), очертания струй по Коху и как водосливной струи вне её границ резко различаются. Из доступной литературы, посвящённой вопросам расчёта параметров струи, кроме [37], имеются материалы по определению высоты подъёма вертикальной струи [17]. Принимая за основу расчёт параметров по Коху, изложенный выше, логически можно предположить, что высота подъёма струи над сечением возврата струи (величина $s_a=a$ по рисунку 2.8 а), должна равняться напору H_0 над сечением возврата струи. По схеме рисунка 2.7, высота подъёма шапки струи над сечением y определяется величиной скоростного напора $s_y = \frac{v_y^2}{2g} = a$. Координата шапки по оси струи определится как $y_0=y+a$. С другой стороны, принимая $a=H_0$ напору, необходимому для пропуска через кольцевой водослив радиусом r , из уравнения расхода:

$$Q = m \cdot B \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H^3} = 2 \cdot \pi \cdot m \cdot r \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_0^3}. \quad (2.26)$$

Определив из (2.1) величину напора H , можем построить линию $y+H_0=f(r)$.

С другой стороны, гребень шапки струи определяется как $y+a=F(r)$. Таким образом, точка пересечения этих линий даст положение сечения возврата струи, радиус r_h этого сечения и высоту подъёма струи H .

На рисунке 2.9 приведены результаты таких расчётов и построений для струи с начальным диаметром $r_0=0,2$ м и начальной скорости струи $V_0=18, 15, 12, 9, 6$ и 3 м/с.

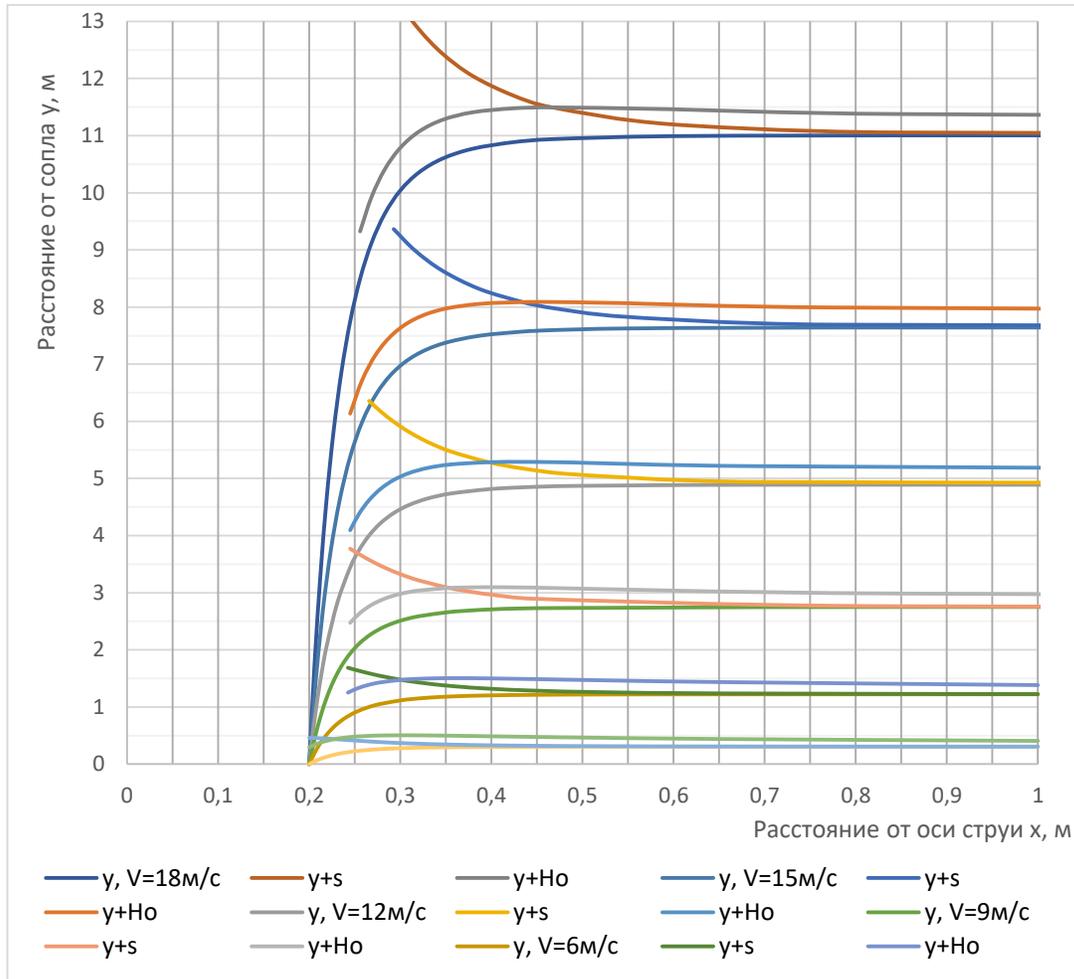


Рисунок 2.9 – Параметры струи с $r_0=0.2$, $V_0= \text{var}$

По данным Коха [37], в зависимости от соотношения скоростного напора $S_0 = \frac{V_0^2}{2g}$ и радиуса сопла струи r_0 , возможны три формы шапки струи, которые приведены на рисунке 2.10.

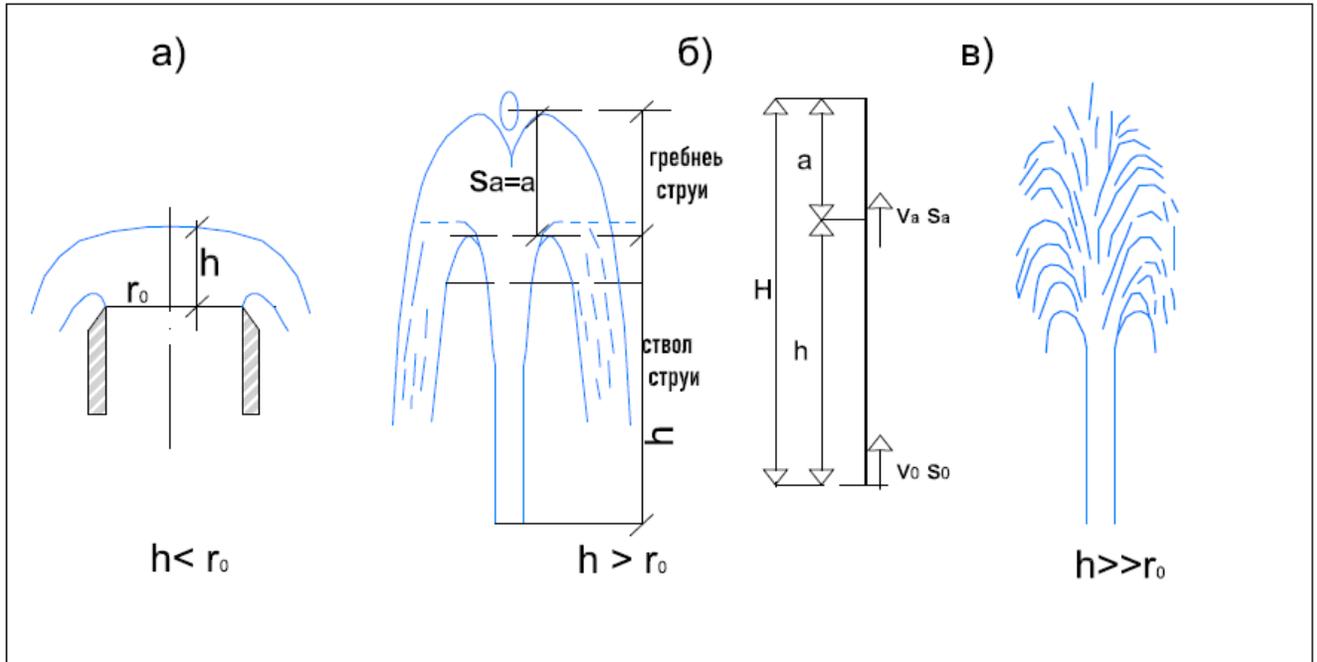


Рисунок 2.10 – Формы струи в зависимости от величины начального напора:
 а – формы струи при малых скоростях выхода воды из сопла при соотношении $s_0 \leq r_0$; б – формы струи при больших напорах при соотношении $s_0 > r_0$; в – формы струи при очень больших напорах $s_0 \gg r_0$.

Как видно из рисунка 2.10, при малых скоростях выхода воды из сопла при соотношении $s_0 \leq r_0$ непосредственно над его выходным сечением формируется грибоподобная шапка, у которой отсутствует восходящий ствол. При больших напорах при соотношении $s_0 > r_0$ формируется ствол струи и грибообразная шапка. При очень больших напорах и при высоте ствола струи многократно превосходящих радиус сопла при соотношении $s_0 \gg r_0$, формирование струи происходит с захватом струёй воздуха и распадом сплошности поверхности ствола струи, в результате чего шапка струи напоминает сноп. Однако каких-либо конкретных границ формообразования шапки струи Кох не показал.

В настоящей работе интерес представляют формирование струи по типу «а» и «б» рисунка 2.10. Для водовыпусков насосных станций характерны большие диаметры напорных труб до 2,0 и более метров, и ограниченных скоростях течения в них воды. По данным [10, 91], при насосной подаче воды, в зависимости от стоимости материала труб, производства работ и стоимости электроэнергии, экономически наиболее выгодная скорость воды в напорном трубопроводе не превосходит 3 м/с, чему соответствует скоростной напор $s_0=0,46$ м. При диаметре напорных труб $d_0=0,2\dots 2,0$ м, отношение s_0/r_0 будет находиться в пределах $s_0/r_0=4,6\dots 0,46$, чему соответствуют схемы «а» и «б» формирования шапки вертикально восходящей струи.

Д.В. Штеренлихт [81] для определения высоты подъёма вертикальной струи приводит формулу Люгера [80], при определении высоты H_k компактной части струи зависимость:

$$H_k = \beta \cdot H_B. \quad (2.27)$$

Для определения коэффициента β Д. В. Штеренлихтом предложен для использования график $\beta=f(V_0)$ Н.П. Розанова [46] (рисунок 2.11).

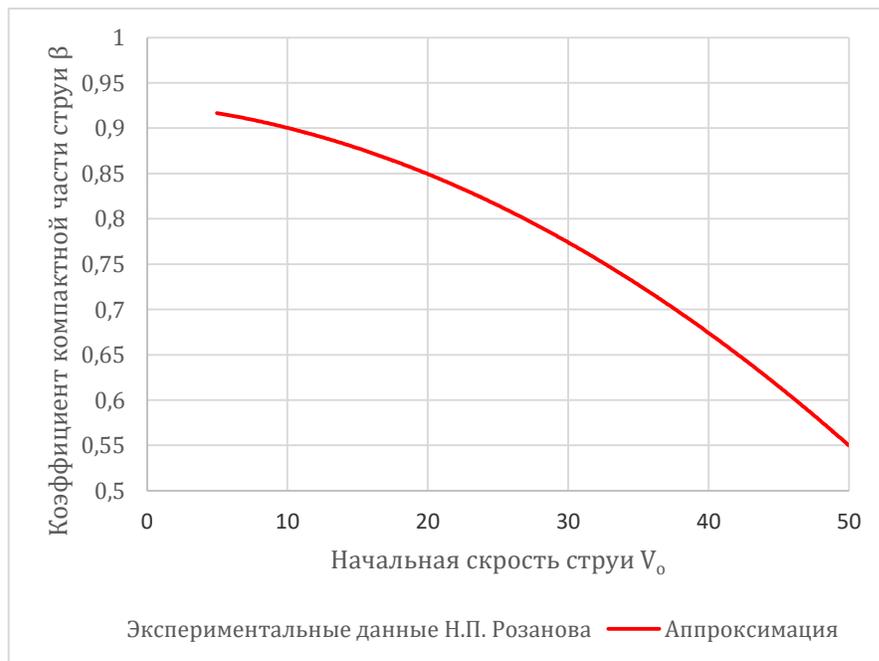


Рисунок 2.11 – Зависимость коэффициента $\beta=f(H)$

Известно, что при уменьшении начальной скорости струи V_0 сокращается и величина скоростного напора S_0 начальной скорости, и соответственно, скоростного напора S_h в сечении h (рисунок 2.12) от выходного сечения сопла, в результате наблюдается момент, когда скоростного напора S_h не достаточно для формирования напора H_0 , необходимого для истечения расхода Q через периметр поперечного сечения с радиусом r_h , на высоте h возврата струи. В таком случае высота шапки фонтана увеличивается за счёт энергии расхода напорного трубопровода насосной станции до значения, когда высота a не будет достаточной для формирования ниспадающей струи с расходом $Q = \pi \cdot r_0^2 \cdot V_0$.

На рисунке 2.12 представлены результаты расчёта параметров струй с $r_0 = 0,6$ м для варианта $a > H_0$ при $V_0 = 4,5$ м/с, для варианта $a = H_0$ при $V_0 = 3,745$ м/с и для варианта с $V_0 = 3,0$ м/с, при котором $a < H_0$.

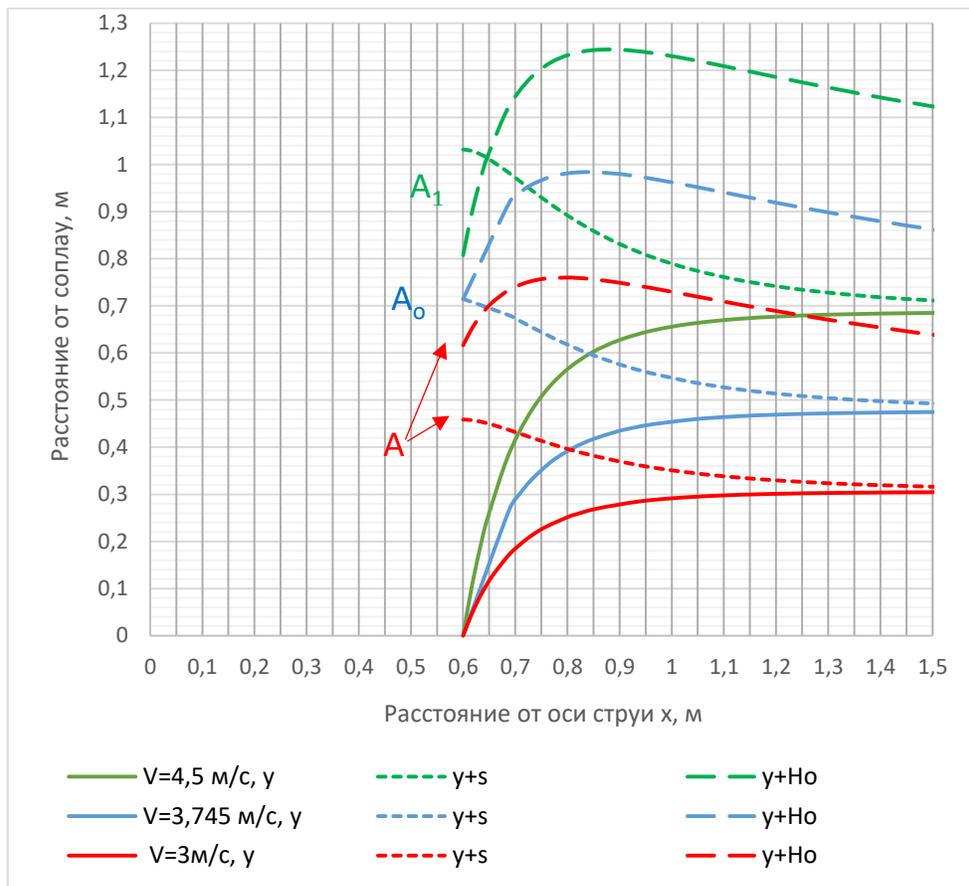
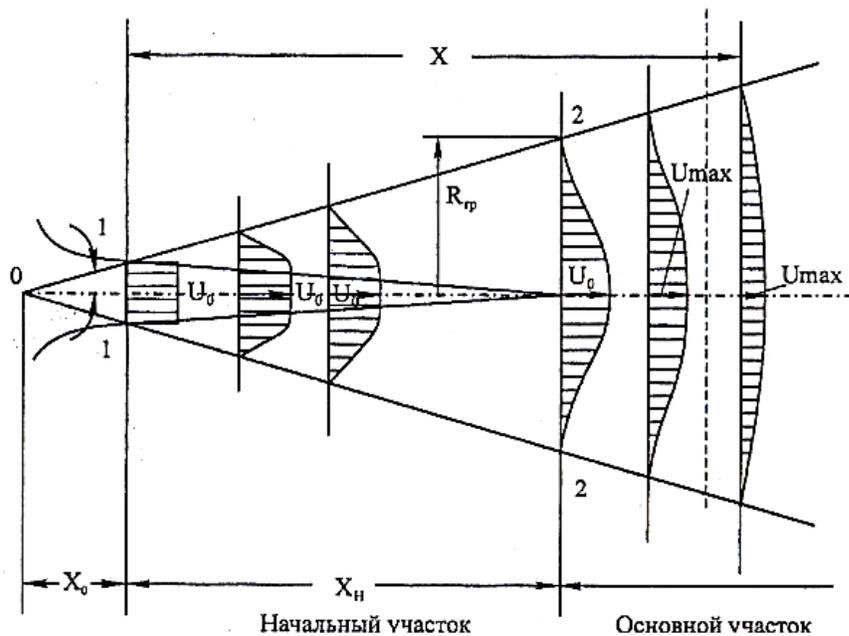


Рисунок 2.12 – Параметры струи с $r_0 = 0,6$ м, $V_0 = \text{var}$

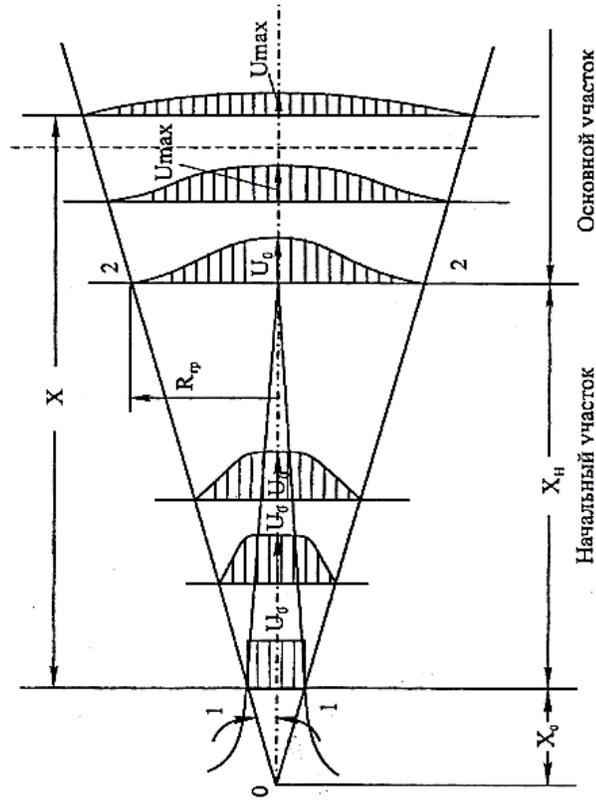
2.3. Теоретические расчёты параметров струи при затопленном истечении

Картина формирования восходящей струи наблюдается в момент включения насосного агрегата. По мере заполнения неподвижного короба водой струя, проходящая через слой воды, напоминает свободную затопленную струю. Расчёту параметров свободных затопленных струй в гидравлике уделено большое внимание. Кроме изучения данного вопроса в фундаментальных источниках [1, 27], расчёты параметров свободной затопленной струи излагают во многих учебниках и гидравлических справочниках [34, 2, 74, 81, 80, 77, 14, 92].

Однако, авторами рассматривается затопленная горизонтальная струя в бесконечном объёме воды. Параметры затопленной свободной струи можно определить по схеме (рисунок 2.13 и таблица 2.2 [26]).



a)



б)

Рисунок 2.13 – Схема затопленной свободной струи: а – Схема горизонтальной затопленной свободной струи; б – Схема вертикальной затопленной свободной струи

Таблица 2.2. Параметры затопленной свободной струи

Параметры затопленной свободной струи	Круглая струя	Плоская струя
1	2	3
расстояние от начального сечения до полюса струи	$x_0 = \frac{0.29}{a} \cdot \frac{d_n}{2}$	$x_0 = \frac{0.41}{a} \cdot \frac{b}{2}$
длина начального участка	$x_n = \frac{0.67}{a} \cdot \frac{d_n}{2}$	$x_n = \frac{1.03}{a} \cdot \frac{b}{2}$
тангенс половины угла расширения струи	$tg \alpha = 3.4 \cdot a$	$tg \alpha = 2.4 \cdot a$

Продолжение Таблица 2.2.

1	2	3
половина высоты струи на расстоянии x от начального сечения	$R_{zp} = \left(3.4 \cdot \frac{a \cdot x}{d_n/2} + 1 \right) \frac{d_n}{2}$	$R_{zp} = \left(2.4 \cdot \frac{a \cdot x}{b/2} + 1 \right) \frac{b}{2}$
скорость на оси основаного участка струи	$U_{\max} = \frac{0.96}{\frac{a \cdot x}{d_n/2} + 0.29} \cdot U_0$	$U_{\max} = \frac{1.2}{\sqrt{\frac{a \cdot x}{b/2} + 0.41}} \cdot U_0$
α - опытный коэф.	$\alpha \approx 0.08$	$\alpha \approx 0.09-0.12$

Задача растекания вертикальной затопленной струи в общем виде не решается, поэтому определение её параметров рассмотрим на конкретном примере, который может служить алгоритмом расчёта при других исходных данных.

Для расчёта параметров вертикально восходящей затопленной струи, прежде всего, необходимо знать параметры ёмкости, в которой происходит растекание этой струи. В качестве исходных данных примем, что телескопический водовыпуск с расчётным расходом $Q=3 \text{ м}^3/\text{с}$ установлен в прямке в голове магистрального канала, рассчитанного на пропуск форсированного расхода $Q_{\phi}=10 \text{ м}^3/\text{с}$. Магистральный канал выполнен в супесчаных грунтах, допускающих неразмывающую скорость $V_{\text{нр}} \approx 1 \text{ м/с}$ с некреплёными ложем, имеющим коэффициент шероховатости $n=0,0225$ [34]. Тогда из формулы для расчёта канала получим необходимое поперечное сечение $\omega_k = Q_{\phi} / V_{\text{нр}} = 10/1 = 10 \text{ м}^2$.

Примается ширина канала по дну $b_{\text{мар}}=4,0 \text{ м}$ и заложение откосов $m=1,5$.

Требуемый уклон дна канала для пропуска форсированного расхода $Q_{\phi}=10 \text{ м}^3/\text{с}$ получен из формулы Шези [35, 36, 61]:

$$Q_{\phi} = \omega \cdot C \cdot \sqrt{R \cdot i}. \quad (2.28)$$

Коэффициент Шези C определен по формуле Маннинга [80,81,52]:

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}. \quad (2.29)$$

При принятых исходных данных получен для форсированного расчётного расхода $Q_{\phi}=10 \text{ м}^3/\text{с}$ необходимый уклон дна канала $i=0,00112$. Расходная характеристика магистрального канала приведена на рисунке 2.14.

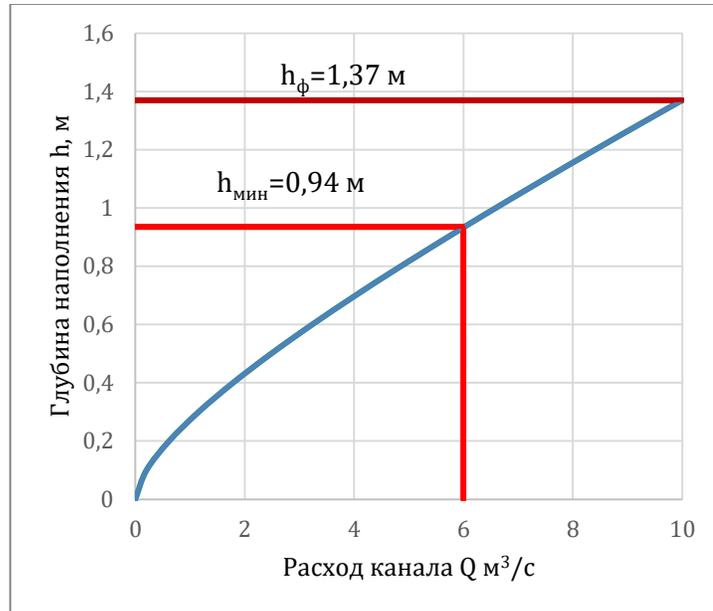


Рисунок 2.14 – Расходная характеристика магистрального канала

В соответствии со схемой рисунка 2.13, длина хода $l_{\text{ход}}$ подвижного поплавка приравнивается $l_{\text{ход}}=H-\Delta=h_{\phi}$. В таком случае высота бортов неподвижного короба в соответствии с рисунком 2.1.г равна высоте подвижного короба. Таким образом, при подаче расчётного расхода через напорный трубопровод одного водовыпуска полная глубина составит $H_{\text{вод}}$:

$$H_{\text{вод}}=2h_{\phi}+\Delta+H_0, \quad (2.30)$$

где: H_0 – напор на гребне поплавка. При переливе воды через гребень поплавков работает как вакуумный водослив с круглоцилиндрическим оголовком. Для предварительных расчётов принимается диаметр поплавка $d_{\text{п}}=0,3\text{ м}$, коэффициент расхода $m=0,5$. Учитывая принятые данные, пропускная способность поплавка определяется по выражению [53]:

$$Q = 4 \cdot (B + d_{\text{п}}) \cdot m \cdot H \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}. \quad (2.31)$$

В соответствии с принятыми предварительно параметрами телескопического водовыпуска $V=2D=2,4$ м, $d_{\text{п}}=0,3$ м, при расходе $Q=3$ м³/с получаем требуемый напор на гребне поплавка $H_0=0,25$ м.

Расчётная глубина воды в телескопическом водовыпуске будет $H_{\text{вод}}=2*1,37+0,3+0,25=3,29$ м,

или, в долях от диаметра трубопровода: $H_{\text{вод}}/D=3,29/1,2=2,74$. В соответствии с таблицей длина начального участка $x_{\text{н}}=0,67/0,08*R_0=8,375$ $R_0=4,19D$. Следовательно, растекание струи на водовыпуске будет происходить в пределах начального участка. Диаметр струи при выходе на поверхность воды в водовыпуске составит:

$$R = D_{\text{гр}} = 2 \cdot \left(3,4 \cdot \frac{0,08 \cdot 3,29}{0,6} + 1 \cdot \right) \cdot 0,6 = 3,0 \text{ м.} \quad (2.32)$$

Диагональ подвижного короба составит $V*2^{0,5}=3,4$ м. Следовательно, в зоне выхода затопленной струи из-под воды она, практически, будет занимать всё поперечное сечение подвижного короба с площадью $\Omega=2,4*2,4=5,76$ м². Средняя скорость в сечении струи при этом составит $V_{\text{ср}}=3/5,76=0,52$ м/с, а скоростной напор $s_0=(0,52/4,43)^2=0,014$ м=1,4 см.

Таким образом, геодезический напор $H_{\text{г}}$ насосного агрегата будет определяться отметкой воды на гребне поплавка подвижного короба:

$$H_{\text{г}} = \nabla \text{ гр. поп.} + H_0 - \nabla \text{ у. в. а.}, \quad (2.33)$$

где: $\nabla_{\text{гр. поп.}}$ – отметка гребня поплавка; H_0 – напор на гребне поплавка; $\nabla_{\text{у. в. а.}}$ – отметка уровня воды в аванкамере насосной станции.

При определении параметров следует иметь в виду, что отметка гребня поплавка величина переменная, относится к уровню воды в магистральном канале (рисунок 2.2-б).

2.4. Описание работы водовыпуска телескопического типа

В практике применения линейных поплавковых конструкций при решении различных технических задач применяются, в основном, поплавки с круглоцилиндрическим поперечным сечением. Примером таких конструкций могут служить боновые заграждения на ГЭС для защиты водоприёмников от плавающего мусора, боновые заграждения для защиты акваторий от загрязнения воды нефтепродуктами при аварии морских скважин и нефтеперевозящих судов и т.п. Однако применение в рассматриваемой конструкции поплавков с круглоцилиндрическим поперечным сечением имеет ряд недостатков, в связи с чем, ниже рассмотрены расчёты как поплавков с круглоцилиндрическим, так и с квадратным поперечным сечением.

При работе телескопического водовыпуска возможны 3 гидравлических режима:

- 1-й режим перелив отсутствует, коробки опорожнены;
- 2-й режим – перелив отсутствует, коробки заполнены водой до гребня поплавка;
- 3-й режим – работа с переливом воды из подвижного короба через гребень поплавка.

Таким образом, задачей гидравлических расчётов телескопического водовыпуска будут заключаться в определении его геометрических параметров, определении требуемого диаметра поплавка и рассмотрении гидравлических режимов его работы.

Гидростатические расчёты подвижного короба будут заключаться в определении диаметра поплавка, обеспечивающего равновесие его подъёмной силы и сил, действующих вниз.

Рассмотрим систему вертикальных сил, действующих на подвижный короб в каждом из возможных гидравлических режимов.

2.5. Назначение параметров элементов подвижного короба с круглоцилиндрическим поплавком

2.5.1 Назначение параметров элементов подвижного короба с круглоцилиндрическим поплавком при отсутствии воды в опорожнённом водовыпуске

Этот режим возможен в случае остановки насоса на профилактическое обслуживание. Для расчёта равновесия при этом режиме воспользуемся схемой рисунка 2.1,г.

За предельное равновесие подвижного короба примем условие его плавания при опорожнённом водовыпуске, когда уровень воды в магистральном канале будет находиться на уровне гребня поплавка. Условие равновесия подвижного короба в этом случае примет вид:

$$\Sigma G_k = \rho \cdot W_{\Pi}, \quad (2.34)$$

где: ΣG_k – сумма весов подвижного короба с поплавком; W – объём вытесняемый поплавком воды; ρ – удельный вес воды.

Таким образом, полная высота короба H_k , как видно по рисунку (2), будет:

$$H_k = h_k + \frac{d_{\text{поп}}}{2} \quad (2.35)$$

Объём стенок короба V_k определится из выражения (пренебрегая малыми величинами высших порядков):

$$V_k = [B^2 - (B - 2 \cdot t_{\text{ст}})^2] \cdot H_k = 4 \cdot (B - t_{\text{ст}}) \cdot t_{\text{ст}} \cdot h_k, \quad (2.36)$$

и, соответственно, вес стенок подвижного короба G_k , будет:

$$G_k = 4 \cdot (B - t_{\text{ст}}) \cdot t_{\text{ст}} \cdot H_k \cdot \rho_{\text{ст}}. \quad (2.37)$$

Длина поплавка по гребню l_{Π} будет:

$$l_{\Pi} = 4 \cdot (B + d_{\text{поп}}), \quad (2.38)$$

а его вес:

$$G_{\Pi} = 4 \cdot \pi \cdot (B + d_{\text{поп}}) \cdot d_{\text{поп}} \cdot t_{\Pi} \cdot \rho_{\text{поп}}. \quad (2.39)$$

Примем конструктивно вес колец, соединяющих подвижной короб с направляющими стойкам $g_{\text{кол}}=2 \text{ кг}=0,002 \text{ т. с.}$ Тогда суммарный вес подвижного короба составит:

$$\Sigma G = 4 \cdot (B - t_{\text{ст}}) \cdot t_{\text{ст}} \cdot h_{\text{к}} \cdot \rho_{\text{ст}} + 4 \cdot \pi \cdot (B + d_{\text{поп}}) \cdot d_{\text{поп}} \cdot t_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{поп}} + 0,002 \quad (2.40)$$

В статическом положении при опорожнённом водовыпускном устройстве в предельном положении гребень поплавка должен находиться на уровне горизонта воды в канале в случае саморегулирующегося канала, или на минимальном уровне, как показано на рисунке (2.1) в случае несаморегулирующегося канала.

Суммарный вес элементов подвижного короба должен уравниваться подъёмной силой поплавка $\rho W_{\text{поп}}$, которая в этом случае будет определяться по выражению:

$$\begin{aligned} \rho \cdot W_{\text{поп}} &= \rho \cdot l_{\text{п}} \cdot \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{\text{поп}}^2 + \frac{d_{\text{поп}}^2}{4} \right) = \left(\frac{3 \cdot \pi}{4} + 1 \right) \cdot \frac{d_{\text{поп}}^2}{4} \cdot 4 \cdot (B + d_{\text{поп}}) \cdot \rho = \\ &= 3,355 \cdot d_{\text{поп}}^2 \cdot (B + d_{\text{поп}}) \cdot \rho, \quad (2.41) \end{aligned}$$

где $\rho=1\text{т/м}^3$ – плотность воды.

Приравнявая (2.40) и (2.41), получим выражение для определения требуемого диаметра поплавка:

$$\begin{aligned} 4 \cdot (B - t_{\text{ст}}) \cdot t_{\text{ст}} \cdot H_{\text{к}} \cdot \rho_{\text{ст}} + 4 \cdot \pi \cdot (B + d_{\text{поп}}) \cdot d_{\text{поп}} \cdot t_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{поп}} + 0,002 &= \\ = 3,355 \cdot d_{\text{поп}}^2 \cdot (B + d_{\text{поп}}) \cdot \rho, \quad (2.42) \end{aligned}$$

откуда получаем:

$$d_{\text{поп}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{(B - t_{\text{ст}}) \cdot t_{\text{ст}} \cdot H_{\text{к}} \cdot \rho_{\text{ст}} + \pi \cdot (B + d_{\text{поп}}) \cdot d_{\text{поп}} \cdot t_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{поп}} + 0,0005}{3,355 \cdot (B + d_{\text{поп}}) \cdot \rho}} \quad (2.43)$$

Уравнение (2.43) не имеет аналитического решения в общем виде, поэтому его надо решать либо графо-аналитически, либо методом последовательных приближений для конкретных значений параметров.

Ниже рассмотрен пример решения уравнения (2.43) применительно к водовыпускному сооружению телескопического типа насосной станции с расходом $3 \text{ м}^3/\text{с}$ и с напорным трубопроводом $D=1,2 \text{ м}$.

В соответствии с изложенной методикой расчёта параметров подвижного короба водовыпускного сооружения, имеем:

- ширина стороны короба по внешнему обводу $B=2D=2 \cdot 1,2=2,4 \text{ м}$;
- толщина стенок подвижного короба $t_{\text{ст}}=0,006 \text{ м}$;
- высота стенок подвижного короба $H_{\text{к}}=1,2 \text{ м}$;
- плотность материала стенок $\rho_{\text{ст}}=1,4 \text{ т/м}^3$;
- $G_{\text{к}}$ – вес стенок подвижного короба
- толщина стенок поплавка $t_{\text{п}}=0,006 \text{ м}$.
- плотность материала поплавка $\rho_{\text{поп}}=1,4 \text{ т/м}^3$;

Подставляя исходные данные в уравнение (2.43), получаем численное выражение для определения диаметра поплавка:

$$d_{\text{поп}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{(2,4 - 0,006) \cdot 0,006 \cdot 1,2 \cdot 1,4 + 3,14 \cdot (2,4 + d_{\text{поп}}) \cdot d_{\text{поп}} \cdot 0,006 \cdot 1,4 + 0,0005}{3,355 \cdot (2,4 + d_{\text{поп}})}} =$$

$$= 2 \cdot \sqrt{\frac{0,0241 + 0,0264 \cdot (2,4 + d_{\text{поп}}) \cdot d_{\text{поп}} + 0,0005}{3,355 \cdot (2,4 + d_{\text{поп}})}}. \quad (2.43')$$

На рисунке 2.15 приведено графоаналитическое решение уравнения (2.43') для расчёта диаметра поплавка при опорожнённом водовыпуске.

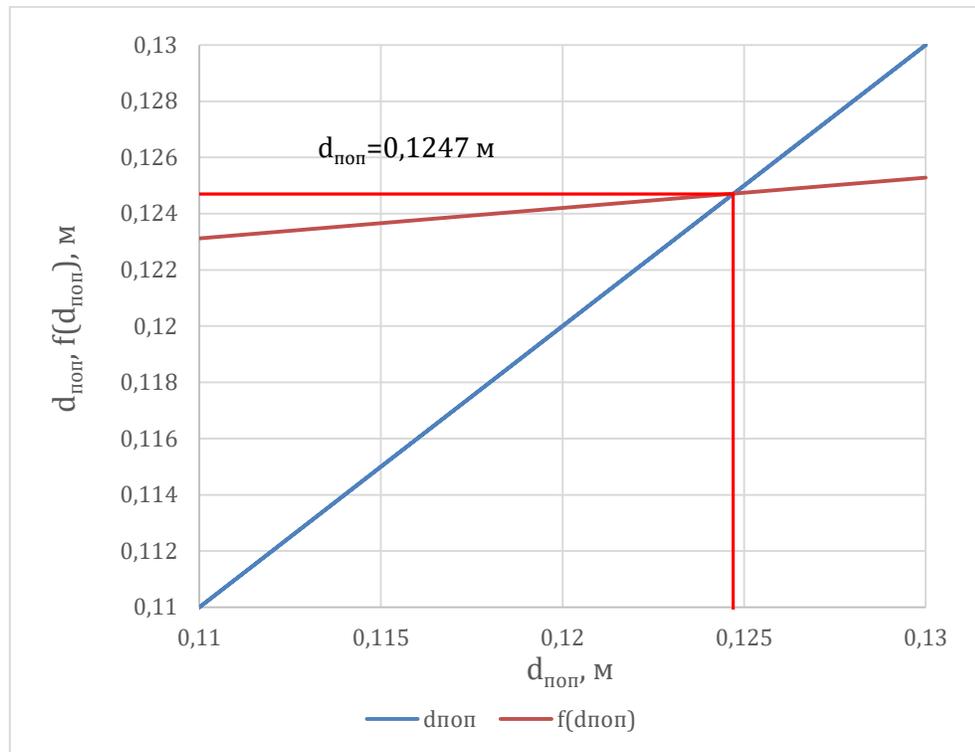


Рисунок 2.15 – Результаты графоаналитического решения уравнения (2.43)

В результате графоаналитического решения уравнения (2.43') получаем значение диаметра поплавка $d_{\text{поп}}=125$ мм, обеспечивающее предельное равновесие опорожнённого подвижного короба, при котором гребень поплавка будет находиться на уровне воды в нижнем бьефе при опорожнённом водовыпуске.

2.5.2. Гидростатические расчёты плавания подвижного короба при его заполнении водой и отсутствии перелива

При пуске насосного агрегата начнётся заполнение водой напорного трубопровода и телескопического водовыпуска. По мере подъёма воды в камере подвижного короба будет возникать выталкивающая Архимедова сила, действующая на его стенки. Максимальной величины она достигнет при подъёме уровня воды в коробе до уровня гребня поплавка. При этом одновременно с появлением выталкивающей силы, действующей на стенки короба, исчезнет добавочная выталкивающая гидроста-

тическая сила давления воды, действующая на четверть поплавок, прикрепленного к коробу.

Уравнение равновесия подвижного короба в этом случае будет также иметь вид, определяемый в общем виде уравнением (2.34).

Раскрывая это уравнение, скорректированными уравнениями (2.40) и (2.41), получим выражение для определения требуемого диаметра поплавок при этом расчётном режиме равновесия:

$$\begin{aligned} 4 \cdot (B - t_{\text{ст}}) \cdot t_{\text{ст}} \cdot h_{\text{к}} \cdot (\gamma_{\text{ст}} - 1) + 4 \cdot \pi \cdot (B + d_{\text{поп}}) \cdot d_{\text{поп}} \cdot t_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{поп}} + 0,002 = \\ = 4 \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{поп}}^2}{4} \cdot (B + d_{\text{поп}}) \cdot \rho, \end{aligned} \quad (2.44)$$

откуда получаем:

$$d_{\text{поп}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{(B - t_{\text{ст}}) \cdot t_{\text{ст}} \cdot h_{\text{к}} \cdot \rho'_{\text{ст}} + \pi \cdot (B + d_{\text{поп}}) \cdot d_{\text{поп}} \cdot t_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{поп}} + 0,0005}{\pi \cdot (B + d_{\text{поп}}) \cdot \rho}} \quad (2.45)$$

В уравнении (2.45) $\rho'_{\text{ст}} = \rho_{\text{ст}} - 1$ - приведенная плотность стенок поплавок с учётом взвешивающего действия воды: $\rho'_{\text{ст}} = 1,4 - 1 = 0,4$ т/м³.

Подставляя исходные данные примера в уравнение (2.39), получаем численное выражение для определения диаметра поплавок:

$$\begin{aligned} d_{\text{поп}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{(2,4 - 0,006) \cdot 0,006 \cdot 1,2 \cdot 0,4 + 3,14 \cdot (2,4 + d_{\text{поп}}) \cdot d_{\text{поп}} \cdot 0,006 \cdot 1,4 + 0,0005}{3,14 \cdot (2,4 + d_{\text{поп}}) \cdot \rho}} = \\ = \sqrt{\frac{0,0241 + 0,0452 \cdot (2,4 + d_{\text{поп}}) \cdot d_{\text{поп}} + 0,0005}{3,14 \cdot (2,4 + d_{\text{поп}})}}. \end{aligned} \quad (2.45')$$

На рисунке 2.16 приведено графоаналитическое решение уравнения (2.45) для рассмотренного примера.

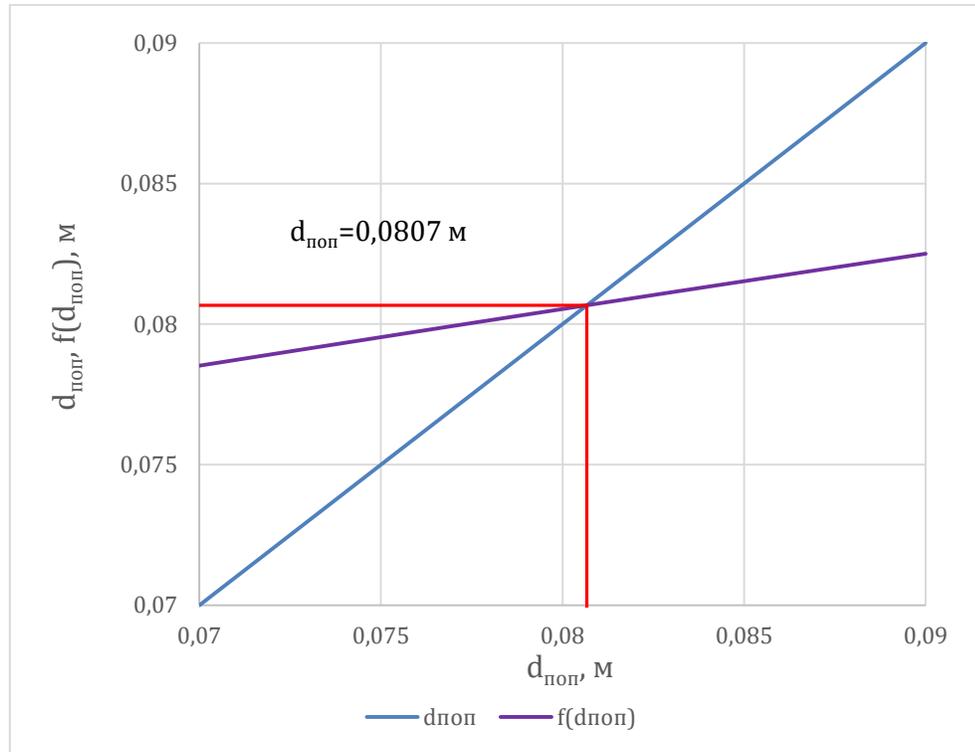


Рисунок 2.16 – Графоаналитическое решение уравнения (2.45)

Графо-аналитическое решение уравнения (2.45) даёт требуемое значение диаметра поплавка $d_{\text{поп}} = 80,7$ мм при заполнении подвижного короба до гребня поплавка.

Как видно из приведенного примера, пригрузка поплавка со стороны подвижного короба имеет меньшее влияние на его плавучесть, чем появление взвешивающего действия воды на стенки подвижного короба.

2.5.3. Гидродинамические расчёты плавания короба при изливе из него воды через круглоцилиндрический поплавок

При изливе воды из плавающего короба действующие на него силы изменятся следующим образом:

- изменится виртуальный вес короба в связи с полным погружением его стенок в воду, при котором виртуальный удельный вес материала стенок станет равной $\rho_{ст}' = \rho_{ст} - 1 = 0,4 \text{ т/м}^3$;

- уменьшится подъёмная сила поплавок за счёт того, что поплавок будет полностью погружен в воду и объём вытесняемой им воды станет равен объёму поплавок:
 $W = \pi \cdot d_{поп}^2 \cdot l_{поп} / 4 = 4 \pi \cdot (B + d_{поп}) \cdot d_{поп}^2 / 4 = \pi \cdot (B + d_{поп}) \cdot d_{поп}^2$;

- появляется пригрузка поплавок весом G_w слоя воды, переливающейся через гребень поплавок.

С учётом изменившихся сил выражение (2.37) для определения диаметра поплавок примет вид:

$$d_{поп} = 2 \cdot \sqrt{\frac{(B - t_{ст}) \cdot t_{ст} \cdot h_k \cdot \gamma' + \pi \cdot (B + d_{поп}) \cdot d_{поп} \cdot t_{п} \cdot \rho_{поп} + G_w + 0,0005}{3,14 \cdot (B + d_{поп}) \cdot \rho}}. \quad (2.46)$$

Таким образом, для решения уравнения (2.41) необходимо определить величину пригрузки G_w поплавок весом слоя переливающейся воды.

2.5.4. Определение величины пригрузки G_w поплавок весом слоя переливающейся воды

При изливе воды из подвижного короба поплавок начнёт работать как водослив практического профиля [53, 93, 94], как вакуумный водослив с круглоцилиндрическим оголовком. На гребне оголовка установится критическая глубина, которой соответствует минимум энергии сечения. Во всех учебниках гидравлики и справочной литературе [2, 26, 34, 48, 51, 72, 73, 79, 80, 81] приводится вывод критической глубины потока, подчиняющегося законам медленно изменяющегося движения. Формула для определения этой критической глубины имеет вид:

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{\alpha \cdot Q^2}{g \cdot B^2}}, \quad (2.47)$$

где: α – коэффициент Кориолиса; Q – расход, $\text{м}^3/\text{с}$; B – длина сливного фронта, м ; g – ускорение свободного падения $\text{м}/\text{с}^2$.

Однако при переливе воды через круглоцилиндрический гребень поплавка в потоке будут развиваться силы гидродинамического давления, благодаря которым уравнение полной энергии H_o потока относительно плоскости сравнения, проходящей через дно потока на гребне водослива, примет вид:

$$H_o = h + \kappa_{\text{ср}} \cdot \frac{V^2}{g} \cdot h + \alpha \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}, \quad (2.48)$$

где: h – глубина потока, м ; V – скорость потока, $\text{м}/\text{с}$; $\kappa_{\text{ср}}$ – среднее значение кривизны потока в рассматриваемом сечении.

Среднее значение кривизны потока $\kappa_{\text{ср}}$ можно определить как [76]:

$$\kappa_{\text{ср}} = \frac{\kappa_{\text{вн}} + \kappa_{\text{п}}}{2}, \quad (2.49)$$

где: $\kappa_{\text{вн}} = \kappa_{\text{поп}} = 1/r_{\text{поп}} = 2/d_{\text{поп}}$ кривизна внутренних донных струй на гребне поплавка;

$\kappa_{\text{п}} = 1/R_{\text{п}}$ – кривизна поверхностных внешних струй потока на гребне поплавка, имеющих радиус кривизны $R_{\text{п}}$.

По С.М. Слисскому, при криволинейном очертании дна водовода и искривлении потока в вертикальной плоскости [60] можно принимать радиус кривизны наружных струй потока как $R_{\text{п}} = r_{\text{поп}} + h = d_{\text{поп}}/2 + h$, с учётом чего будем иметь:

$$\kappa_{\text{ср}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{2}{d_{\text{поп}}} + \frac{2}{d_{\text{поп}} + 2 \cdot h} \right) = 2 \cdot \frac{d_{\text{поп}} + h}{d_{\text{поп}} \cdot (d_{\text{поп}} + 2 \cdot h)}. \quad (2.50)$$

Поток на гребне водослива имеет выпуклую форму, которой соответствует отрицательное значение кривизны в (2.48). Подставив из (2.49) значение средней кривизны с обратным знаком в (2.48) и заменив $V=q/h$, получим:

$$H_o = h - 2 \cdot \frac{d_{\text{поп}} + h}{d_{\text{поп}} \cdot (d_{\text{поп}} + 2 \cdot h)} \cdot \frac{q^2}{g \cdot h} + \alpha \cdot \frac{q^2}{2 \cdot g \cdot h^2}. \quad (2.51)$$

Минимальное значение выражения (2.51) будет при $h=h_{кр}$. Продифференцировав (2.51) по h , получим выражение для определения критической глубины $h_{кр}$ с учётом наличия кривизны струй в вертикальной плоскости:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_o}{\partial h_{кр}} = 0 = 1 - 2 \frac{1}{d_{поп} \cdot (d_{поп} + 2 \cdot h_{кр})} \cdot \frac{q^2}{g \cdot h_{кр}} + 4 \cdot \frac{d_{поп} + h_{кр}}{d_{поп} \cdot (d_{поп} + 2 \cdot h_{кр})^2} \cdot \frac{q^2}{g \cdot h_{кр}} \\ + 2 \cdot \frac{d_{поп} + h_{кр}}{d_{поп} \cdot (d_{поп} + 2 \cdot h_{кр})} \cdot \frac{q^2}{g \cdot h_{кр}^2} - \frac{\alpha \cdot q^2}{g \cdot h_{кр}^3}. \end{aligned} \quad (2.52)$$

Решив (2.52) относительно h^3 (для упрощения записи нижний индекс “кр” опущен), получим выражение для определения критической глубины потока на гребне поплавка:

$$\begin{aligned} h^3 = 2 \frac{h^2}{d_{поп} \cdot (d_{поп} + 2 \cdot h)} \cdot \frac{q^2}{g} - 4 \cdot \frac{d_{поп} + h}{d_{поп} \cdot (d_{поп} + 2 \cdot h)^2} \cdot \frac{q^2}{g} \cdot h^2 - \\ - 2 \cdot \frac{d_{поп} + h}{d_{поп} \cdot (d_{поп} + 2 \cdot h)} \cdot \frac{q^2}{g} \cdot h + \frac{\alpha \cdot q^2}{g}, \end{aligned} \quad (2.53)$$

из которого, после соответствующих преобразований, получаем:

$$\begin{aligned} h_{кр.кр} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \cdot \\ \cdot \sqrt[3]{\alpha + \frac{2 \cdot h_{кр}^2 \cdot [1 - 2 \cdot (d_{поп} + h_{кр})]}{d_{поп} \cdot (d_{поп} + 2 \cdot h_{кр})} - 2 \frac{d_{поп} + h_{кр}}{d_{поп} \cdot (d_{поп} + 2 \cdot h_{кр})^2} \cdot h_{кр}^2}. \end{aligned} \quad (2.54)$$

Уравнение (2.54) не имеет общего решения и решается графоаналитическим способом. Как видно по уравнению (2.54), при его решении необходимо знать диаметр поплавка, который по (2.41) в свою очередь зависит от величины пригрузки переливающимся слоем воды. Для оценки влияния кривизны потока на величину критической глубины, определим критическую глубину при диаметре поплавка $d_{поп}=0,20; 0,25; 0,30; 0,4$ м.

В этом случае, для рассмотренного выше примера с диаметром трубопровода и ширине подвижного короба под $V=2D=2,4$ м с расходом $Q=3$ м³/с для плоского пото-

ка с коэффициентом Кориолиса $\alpha=1.05$ Графическое решение уравнения (2.54) для этих диаметров поплавка приведено на рисунке 2.17.

Соответственно получаем следующие значения величин критической глубины с учётом кривизны потока: $h_{кр.крив.} = 0,1875, 0,1865, 0,1856$ и $0,1836$ м. Относительная величина критической глубины к напору H_0 для приведенных диаметров поплавка составляет $h_{кр.крив.}/H_0$ $0,730, 0,736, 0,744$ и $0,751$.

Как видно по приведенным расчётам, предварительно можно принять диаметр поплавка $d=0,4$ м и критическую глубину $h_{кр.крив.} = 0,1836$ м.

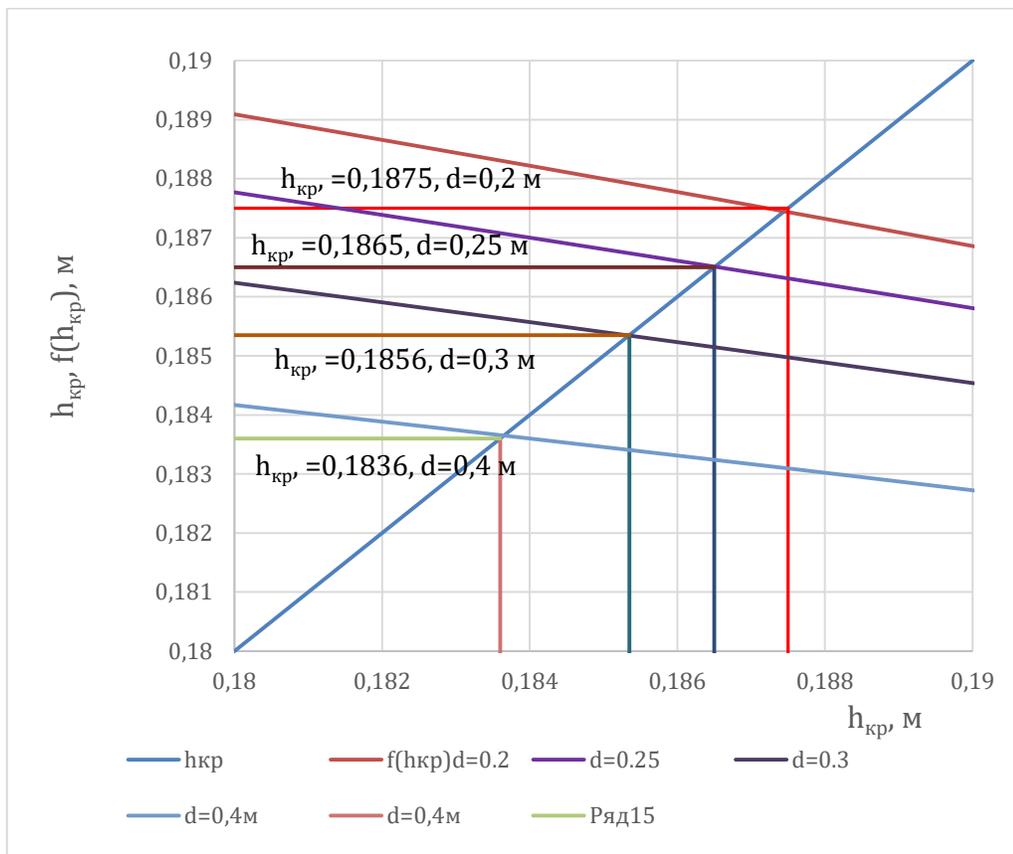


Рисунок 2.17 – Результаты графоаналитического решения уравнения (2.54)

Максимальная пригрузка поплавка переливающимся слоем воды будет при неподпёртом со стороны нижнего бьефа режиме истечения воды через гребень поплавка. В первом приближении, осреднённую толщину слоя переливающейся воды на

проекции диаметра поплавка можно принять равной изменяющейся от величины H_0 на переднем конце диаметра гребня поплавка и равной критической глубине $h_{кр. крив.}$ и за гребнем поплавка, как это показано на схеме рисунка 2.18.



Рисунок 2.18 – Расчётная схема пригрузки поплавка переливающимся слоем воды

По схеме рисунка 2.5 пригрузка поплавка переливающимся слоем составит:

$$\begin{aligned}
 G_w &= 4 \cdot \rho \cdot (B + d_{поп}) \cdot \left(\frac{H + h_{кр}}{2} + h_{кр} \right) \cdot \frac{d_{поп}}{2} = \\
 &= \rho \cdot d_{поп} \cdot (B + d_{поп}) \cdot (H + 3 \cdot h_{кр}).
 \end{aligned}
 \tag{2.55}$$

Как следует по исследованиям Н. П. Розанова [46], при принятой схеме перелива воды через гребень поплавка, он будет работать как вакуумный водослив. Предварительно приняв значение коэффициента расхода $m=0,49$ при неподтопленном переливе через гребень поплавка, получаем:

$$Q = m \cdot 4 \cdot (B + d_{п}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_0^3},
 \tag{2.56}$$

откуда получаем величину расчётного напора H_0 для рассматриваемого примера:

$$H_o = \left(\frac{Q}{4 \cdot m \cdot (B + d_{\text{п}}) \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \right)^{2/3} = \left(\frac{3,0}{4 \cdot 0,49 \cdot (2,4 + 0,4) \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \right)^{2/3} = 0,245 \text{ м}$$

Принимая во внимание ранее вычисленное значение критической $h_{\text{кр}}=0,192$ м, получаем относительную величину критической глубины $h_{\text{кр}}:H=0,1836:0,245=0,75$, что даёт средне гидродинамического давления переливающегося потока на гребень оголовка поплавка $(H+3 h_{\text{кр}})=(1+3 \cdot 0,75)H=3,25H$, с учётом чего (2.56) примет вид:

$$G_w = \gamma \cdot 3,35 \cdot d_{\text{поп}} \cdot (B + d_{\text{поп}}) \cdot H,$$

и формула для определения требуемого диаметра поплавка при переливе через него воды из подвижного короба при максимальном расходе воды трубопровода примет вид:

$$d_{\text{поп}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{(B - t_{\text{ст}}) \cdot t_{\text{ст}} \cdot H_{\text{к}} \cdot \rho' + \pi \cdot (B + d_{\text{поп}}) \cdot d_{\text{поп}} \cdot t_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{поп}} + \rho \cdot 0,8125 \cdot d_{\text{поп}} \cdot (B + d_{\text{поп}}) \cdot H + 0,0005}{3,14 \cdot (B + d_{\text{поп}}) \cdot \rho_{\text{в}}}}}. \quad (2.57)$$

Подставляя в (2.56) параметры рассматриваемого примера, получим выражение для определения диаметра поплавка при переливе максимального расхода, обеспечивающего его непотопляемость при положении гребня поплавка на уровне воды в приёмном канале, что после соответствующих преобразований даёт:

$$d_{\text{поп}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,069 + 0,066 \cdot (B + d_{\text{поп}}) \cdot d_{\text{поп}} + 0,8125 \cdot d_{\text{поп}} \cdot (B + d_{\text{поп}}) \cdot H + 0,0005}{3,14 \cdot (B + d_{\text{поп}})}}}. \quad (2.58)$$

Подставляя в (2.57) параметры рассматриваемого примера, получим выражение для определения диаметра поплавка при переливе максимального расхода, обеспечивающего его непотопляемость при положении гребня поплавка на уровне воды в приёмном канале, что после соответствующих преобразований даёт

$$d_{\text{поп}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,0965 + 0,181 \cdot (B + d_{\text{поп}}) \cdot d_{\text{поп}} + 0,817 \cdot d_{\text{поп}} \cdot (B + d_{\text{поп}}) \cdot H + 0,0005}{3,14 \cdot (B + d_{\text{поп}})}}}. \quad (2.58')$$

Графоаналитическое решение уравнения (2.58) приведено на рисунке 2.19, в соответствии с которым расчётный диаметр поплавка при переливе максимального расхода $Q=3 \text{ м}^3/\text{с}$ должен равняться $0,3155 \text{ м}$.

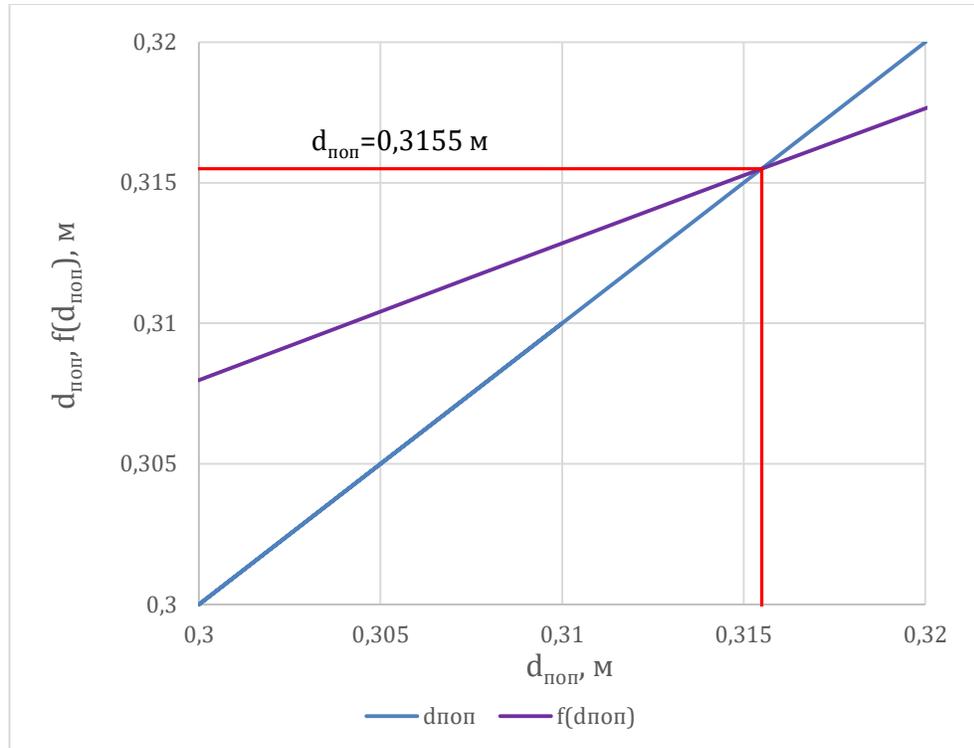


Рисунок 2.19 – Результаты графоаналитического решения уравнения (2.58)

Для данного конкретного случая имеется возможность использовать стандартные трубы из ПВХ [20], ближайший больший стандартный наружный диаметр имеет $d_{em}=355,0 \text{ мм}$, что на 40 мм превосходит требуемый диаметр, а это, соответственно на $0,04 \text{ м}$ увеличивает геодезический напор насосного агрегата и увеличивает потребление энергии.

Перерасход потребляемой энергии определяется по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{E} &= \frac{9,81 \cdot \Delta h_r}{\eta_{н.а}} \cdot Q \cdot T = \frac{9,81 \cdot \Delta h_r}{\eta_{н.а}} \cdot \frac{W}{3600} = \frac{9,81 \cdot 0,04}{0,7} \cdot \frac{W}{3600} = \\ &= 187 \cdot 10^{-6} \cdot W \text{ кВтч} . \end{aligned} \quad (2.59)$$

В формуле (2.59) принято $\eta_{н.а.}=0,7$ – кпд насосного агрегата [9, 15, 32, 33, 45, 16] и увеличение геодезического напора $\Delta h=0,04$ м. При подаче насосным агрегатом воды за поливной период $T=9$ мес= 6480 часов, объём подачи с расходом $3\text{ м}^3/\text{с}$ составит $W=3*6480*3600=7*10^6\text{ м}^3$, а перерасход электроэнергии будет $\Delta\mathcal{E}=7*10^{-6}*16880*10^6=13077$ кВт ч за поливной период.

Таким образом, для трёх рассмотренных гидравлических вариантов работы подвижного короба с круглоцилиндрическим поплавком для рассмотренного параметра трубопровода насосной станции получены следующие расчётные диаметры поплавка; $d_{\text{поп}}=125$ мм, $d_{\text{поп}}=80.7$ мм и $d_{\text{поп}}=315$ мм. Как видно из приведенных расчётов, определяющим диаметр поплавка является режим с переливом через него воды при подаче максимального расхода трубопровода.

Учитывая необходимость использования труб большего диаметра по сравнению с расчётной величиной, более универсальным представляется применение поплавков с квадратным поперечным сечением, которые можно без труда изготовить в условиях механических мастерских строительных организаций.

2.6. Расчёт параметров подвижного короба с квадратным поплавком

2.6.1. Конструктивные схемы соединения подвижного короба с квадратным поплавком

Выполнение поплавка с круглым поперечным сечением с заданными расчётными размерами весьма сложно как в натуральных условиях, так и на модели. Более технологично выполнение поплавка с квадратным поперечным сечением. В отличие от конструкции подвижного короба с круглоцилиндрическим поплавком, конструктивное выполнение подвижного короба с поплавком квадратного сечения предполагает наличие трёх конструктивных вариантов исполнения:

1. Подвижный короб с изолированными от поплавка стенками зазором Δ , как это показано на схеме рисунка 2.20.

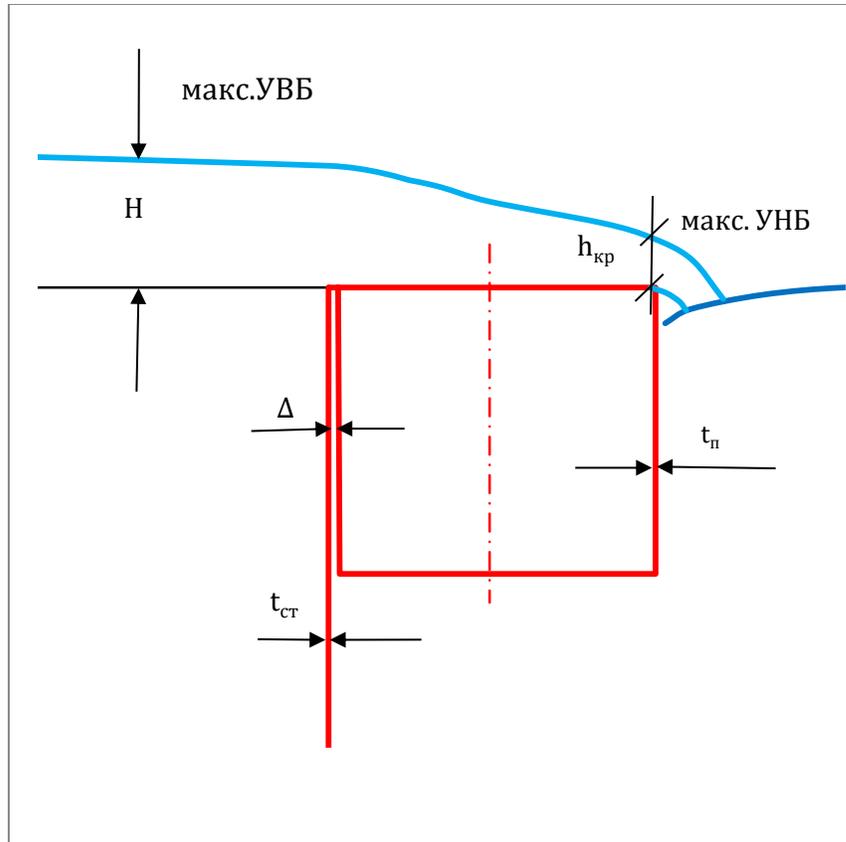


Рисунок 2.20 – Подвижный короб с изолированными от поплавка стенками

2. Подвижный короб с плотным прилеганием стенок короба и поплавка, как это показано на схеме рисунка 2.21.

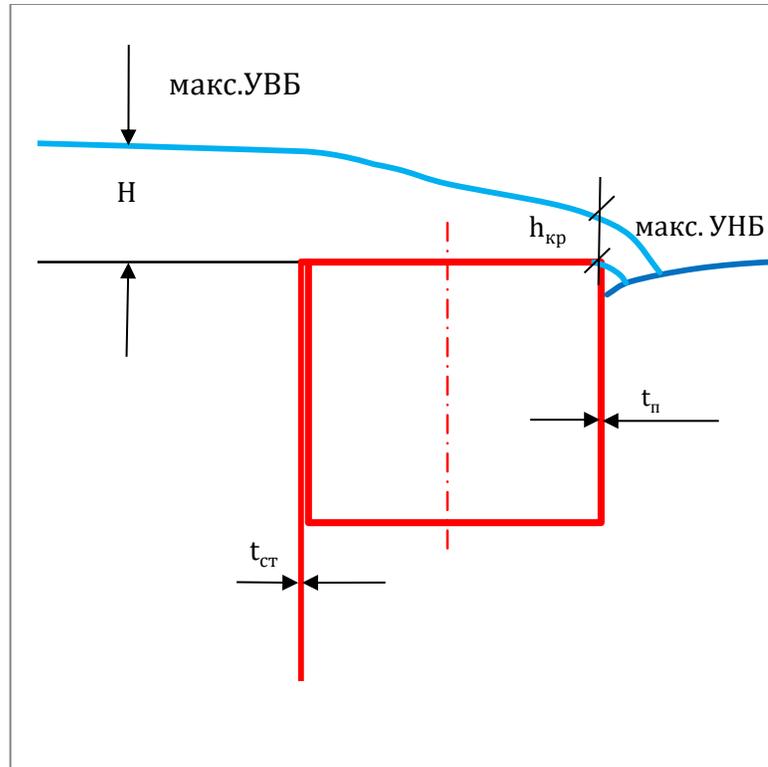


Рисунок 2.21 – Подвижный короб с плотным прилеганием стенок короба и поплавка

3. Подвижный короб со стенками, являющимися продолжением внутренних стенок поплавка, как это показано на схеме рисунка 2.22.

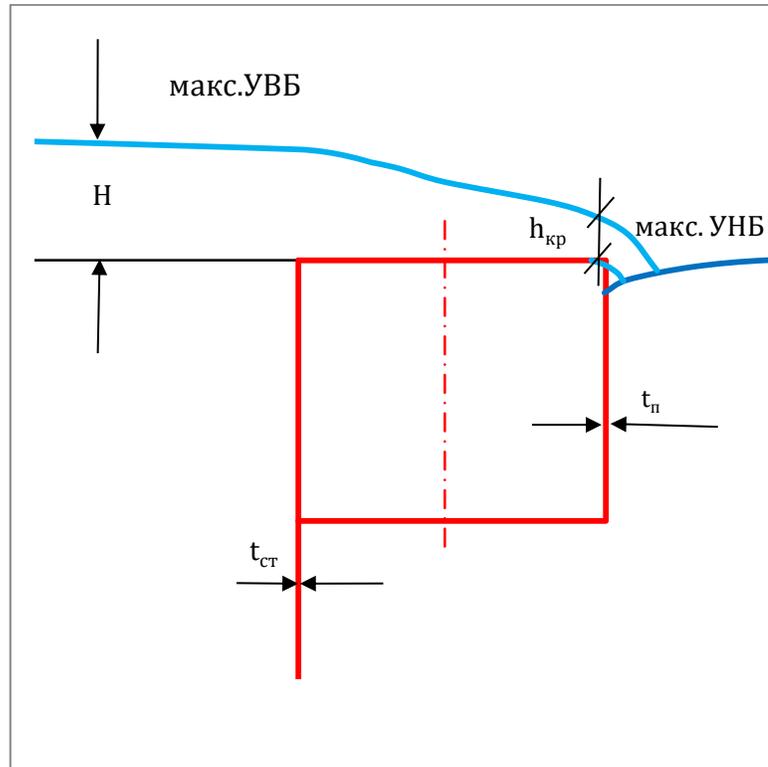


Рисунок 2.22 – Подвижный короб со стенками, являющимися продолжением внутренних стенок поплавка

В соответствии с приведенными на рисунках 2.20...2.22, конструктивными схемами соединения подвижного короба с поплавком квадратного поперечного сечения необходимо рассмотреть три гидравлические схемы равновесия подвижного короба. Однако, как видно из предыдущих расчётов, определяющим условием работоспособности водовыпуска телескопического типа будет снабжение подвижного короба поплавком, параметры которого получены из условия его плавания при переливе воды при пропуске максимального расхода. Поэтому требуемые расчётные размеры поплавка с квадратным поперечным сечением для трёх приведенных выше конструктивных схем соединения подвижного короба и поплавка с квадратным поперечным сечением определим для этого гидравлического режима.

2.6.2. Назначение параметров элементов подвижного короба с квадратным поплавком

При расчётах будем иметь в виду, что по технологии изготовления подвижного короба его стенки и стенки поплавка изготавливаются из листового полиэтилена. При этом предполагаем, что поплавок крепится к внешнему габариту подвижного короба верхней гранью заподлицо с верхним ребром подвижного короба, как показано на рисунках 2.20...2.22.

Грани поплавка между собой также крепятся на тепловой сварке. С гидравлической точки зрения такая конструкция поплавка представляет собой водослив практического профиля с горизонтальным порогом, коэффициент расхода которого можно принять равным $m=0,42$ [34, 2, 51, 12, 61, 75, 5, 7, 18, 22, 38, 25].

Для дальнейших расчётов примем следующие обозначения:

- примем квадратное поперечное сечение короба с размерами по внешнему обводу $B \times B$;

H_k – высота бортов подвижного короба;

$t_{ст}$ – толщина стенок подвижного короба;

$\rho_{ст}$ – плотность материала стенок;

G_k – вес стенок подвижного короба;

b – внешний размер поперечного сечения поплавка;

$t_{п}$ – толщина стенок поплавка;

$\rho_{п}$ – плотность материала стенок поплавка;

$G_{п}$ – вес поплавка;

G_v – вес переливающегося слоя воды на поплавке;

Δ – минимальный зазор между внутренними стенками поплавка и стенками подвижного короба, обеспечивающее их свободное омывание водой и применимость закона Архимеда плавания тел, как показано на схеме рисунка 2.20.

2.6.3. Гидродинамические расчёты плавания короба при переливе из него воды через оголовок со свободным омыванием стенок

Гидравлическая схема перелива воды из подвижного короба через поплавок с квадратным поперечным сечением приведена на рисунке 2.20, со свободным омыванием его стенок.

За предельное равновесие подвижного короба примем условие его плавания при переливе расчётного расхода через гребень поплавок, при котором верхняя грань поплавок будет находиться на уровне воды в магистральном канале. Условие равновесия подвижного короба в этом случае примет вид:

$$\Sigma G_B = G_K + G_{\Pi} + G_{\text{вод}} + G_{\text{плет}} = \rho \cdot W_{\Pi},$$

где: ΣG_B – сумма вертикальных сил, пригружающих поплавок, а именно:

G_K – вес стенок подвижного короба; G_{Π} – вес поплавок; $G_{\text{вод}}$ – вес воды на гребне поплавок; W – объём вытесняемый поплавок воды; ρ – удельный вес воды; $G_{\text{плет}}$ – вес петель, стабилизирующих положение подвижного короба.

Вес стенок подвижного короба G_K будет определяться по (2.37).

Вес поплавок будет определяться по зависимости:

$$G_{\Pi} = \rho_{\text{ст.п.}} \cdot 4 \cdot (B + b) \cdot 4 \cdot b \cdot t_{\Pi} \quad (2.60)$$

При расчётах будем иметь в виду, что грани поплавок между собой также крепятся на тепловой сварке, образуя горизонтальный гребень кольцевой формы. С гидравлической точки зрения такая конструкция поплавок представляет собой водослив практического профиля с горизонтальным порогом.

На гребне устанавливается кривая спада с глубиной H_0 на входе и критической глубиной $h_{\text{кр}}$ на выходе из порога, с почти прямолинейной свободной поверхностью в соответствии со схемой рисунка 2.20 [51, 65].

В соответствии с принятой схемой истечения, вес воды на гребне поплавок G_B может быть определён по зависимости:

$$G_B = \rho \cdot 4 \cdot \frac{H_0 + h_{\text{кр}}}{2} \cdot b \cdot (B_K + b). \quad (2.61)$$

По исследованиям многих авторов, в конце плоского прямолинейного водослива практического профиля при неподтопленном истечении устанавливается критическая глубина порядка $h_{кр} \approx 0,6H_0$ [11,12,13,83,51,75,], с учётом чего получаем для натуре величину расчётного напора H_0 при коэффициенте расхода $m=0,42$:

$$H_0 = \left(\frac{Q}{4m \cdot (B_K + b) \sqrt{2g}} \right)^{2/3} = 0,262 \cdot \left(\frac{Q_H}{B_K + b} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (2.62)$$

Подставив значение H_0 из (2.61) в (2.60), получим вес пригрузки поплавок при пропуске расхода в натуре Q_H :

$$G_B = \rho \cdot 4 \cdot \frac{H_0 \cdot (1 + 0,6)}{2} \cdot b \cdot (B_K + b) = \gamma \cdot 0,838 \cdot Q_H^{\frac{2}{3}} \cdot b \cdot (B_K + b)^{\frac{1}{3}}. \quad (2.63)$$

Подъёмная сила поплавок с квадратным поперечным сечением будет определяться по зависимости

$$\rho \cdot W = \rho \cdot 4 \cdot (B_K + b) \cdot b^2 \quad (2.64)$$

Сопоставляя уравнения (2.64), (2.60) и (2.63), получим расчётное уравнение гидродинамического равновесия подвижного короба при выпуске из него расчётного расхода:

$$\rho \cdot 4 \cdot (B_K + b) \cdot b^2 = (\rho_K - 1) \cdot 4 \cdot (B_K - t_{CT}) \cdot H_{K^*} \cdot t_{CT} + \\ + \rho_{II} \cdot 16 \cdot (B_K + b) \cdot (b - t_{II}) \cdot t_{II} + \rho \cdot 0,838 \cdot Q_H^{\frac{2}{3}} \cdot b \cdot (B_K + b)^{\frac{1}{3}} + 0,002. \quad (2.65)$$

Решая (2.65) относительно ширины поплавок b , получим:

$$b = \sqrt{\frac{(\rho_K - 1) \cdot (B_K - t_{CT}) \cdot H_{K^*} \cdot t_{CT} + \rho_{II} \cdot 4 \cdot (B_K + b) \cdot (b - t_{II}) \cdot t_{II}}{\rho \cdot (B_K + b)}} + \\ + \sqrt{\frac{\rho \cdot 0,21 \cdot Q_H^{\frac{2}{3}} \cdot b \cdot (B_K + b)^{\frac{1}{3}} + 0,0005}{\rho \cdot (B_K + b)}} \quad (2.66)$$

Уравнение (2.66) не решается в общем виде даже для конкретных конструктивных параметров устройства, входящих в это уравнение, решается графоаналитиче-

ским способом. Подставляя в (2.66) значения физических констант материалов, получим окончательное выражение для определения ширины поплавка

$$b = \sqrt{\frac{0,4 \cdot (B_k - t_{ст}) \cdot H_k \cdot t_{ст} + 5,6 \cdot (B_k + b) \cdot (b - t_{п}) \cdot t_{п} + 0,21 \cdot Q^{\frac{2}{3}} \cdot b \cdot (B_k + b)^{\frac{1}{3}} + 0,0005}{(B_k + b)}} \quad (2.67)$$

Графоаналитическое решение уравнения (2.67) для расхода напорного трубопровода $Q=3 \text{ м}^3/\text{с}$ при расчётной ширине подвижного короба $B=2,4 \text{ м}$ приведено на рисунке 2.10.

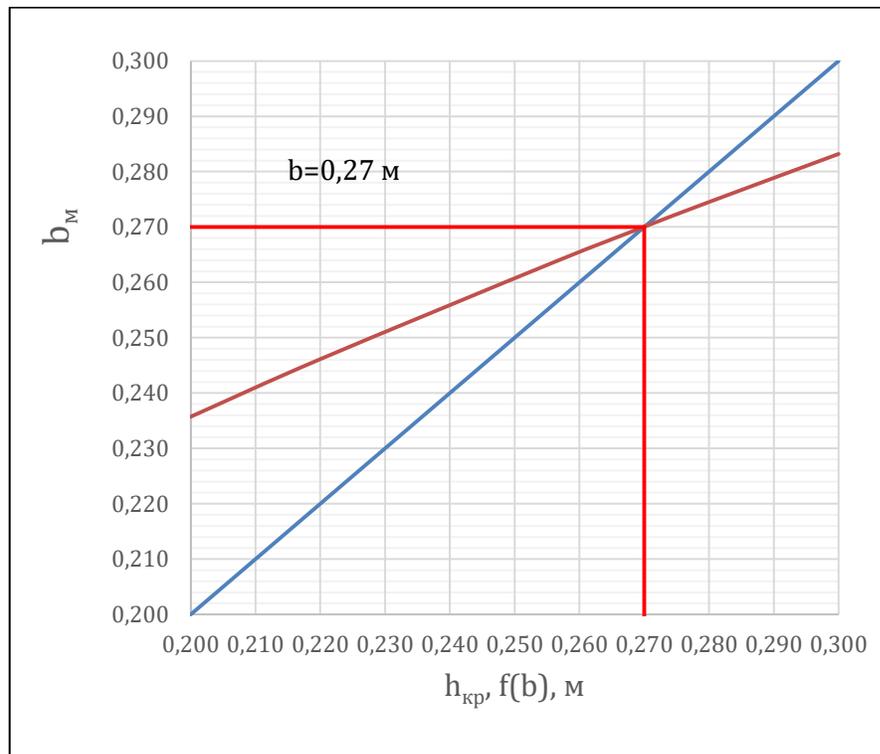


Рисунок 2.23 – Графоаналитическое решение уравнения (2.67)

Согласно этому решению, для обеспечения положения подвижного короба с отметкой порога поплавка на уровне воды в приёмном канале, требуется подвижной короб снабдить поплавком с квадратным поперечным сечением, имеющим сторону квадрата по внешнему обводу $b=270 \text{ мм}$.

2.6.4. Гидродинамические расчёты плавания короба при переливе из него воды через оголовок с плотным прилеганием стенок короба и поплавок

Гидравлическая схема перелива воды из подвижного короба через поплавок с квадратным поперечным сечением при плотном прилегании стенок короба и поплавок приведена на рисунке 2.21.

Гидравлическая схема движения воды через гребень поплавок будет та же, что и по схеме рисунка 2.20 для подвижного короба, полностью омываемого водой. Различие по сравнению со схемой рисунка 2.20 будет заключаться в том, что архимедова сила будет действовать только на участке стенок подвижного короба, расположенные ниже стенки поплавок, в связи с чем действующие силы на поплавок будут определяться по следующим зависимостям:

- виртуальный вес подвижного короба будет определяться по зависимости:

$$G_K = 4 \cdot [\rho_{CT} \cdot b + (\rho_{CT} - 1) \cdot (H_K - b)] \cdot (B_K - t_{CT}) \cdot t_{CT}, \quad (2.68)$$

- напор на гребне поплавок H_o :

$$H_o = \left(\frac{Q}{4 \cdot 0,42 \cdot 4,43 \cdot (B_K + b)} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,262 \cdot \left(\frac{Q}{(B_K + b)} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (2.69)$$

- уравнение равновесия подвижного короба:

$$\begin{aligned} & \rho \cdot 4 \cdot (B_K + b) \cdot b^2 = \\ & = 4 \cdot [(\rho_{CT} - 1) \cdot b \cdot (B_K - b) \cdot t_{CT} + (\rho_{CT} - 1) \cdot (H_K - b)] \cdot (B_K - t_{CT}) \cdot t_{CT} \\ & + \\ & + \rho_{II} \cdot 16 \cdot (B_K + b) \cdot (b - t_{II}) \cdot t_{II} + \rho \cdot 0,262 \cdot 4 \cdot Q^{\frac{2}{3}} \cdot b \cdot (B_K + b)^{\frac{1}{3}} + 0,002. \end{aligned} \quad (2.70)$$

С учётом (2.68) и (2.69) решение (2.70) относительно ширины поплавок b , даёт расчётное уравнение:

$$b = \sqrt{\frac{[\rho_{CT} \cdot b + (\rho_{CT} - 1) \cdot (H_K - b)] \cdot (B_K - t_{CT}) \cdot t_{CT} + \rho_{II} \cdot 4 \cdot (B_K + b) \cdot (b - t_{II}) \cdot t_{II} + \rho \cdot 0,262 \cdot Q^{\frac{2}{3}} \cdot b \cdot (B_K + b)^{\frac{1}{3}} + 0,0005}{\rho \cdot (B_K + b)}} \quad (2.71)$$

$$b = \sqrt{\frac{[\rho_{\text{CT}} \cdot b \cdot (B_{\text{K}} + b) + (\rho_{\text{CT}} - 1) \cdot (H_{\text{K}} - b)] \cdot (B_{\text{K}} - t_{\text{CT}}) \cdot t_{\text{CT}} + \rho_{\text{II}} \cdot 4 \cdot (B_{\text{K}} + b) \cdot (b - t_{\text{II}}) \cdot t_{\text{II}} + \rho \cdot 0,262 \cdot Q^{\frac{2}{3}} \cdot b \cdot (B_{\text{K}} + b)^{\frac{1}{3}} + 0,0005}{\rho \cdot (B_{\text{K}} + b)}} \quad (2.72)$$

Подставляя в (2.72) значения физических констант материалов, получим окончательное выражение для определения ширины поплавок b :

$$b = \sqrt{\frac{[b + 0,583 \cdot (2,4 - b)] \cdot (B_{\text{K}} - t_{\text{CT}}) \cdot 0,0144 + 0,0594 \cdot (B_{\text{K}} + b) \cdot (b - t_{\text{II}}) + 0,21 \cdot Q^{\frac{2}{3}} \cdot b \cdot (B_{\text{K}} + b)^{\frac{1}{3}} + 0,0005}{(2,4 + b)}} \quad (2.73)$$

Графоаналитическое решение уравнения (2.73) для расхода напорного трубопровода $Q=3 \text{ м}^3/\text{с}$ при расчётной ширине подвижного короба $B=2,4 \text{ м}$ приведено на рисунке 2.24.

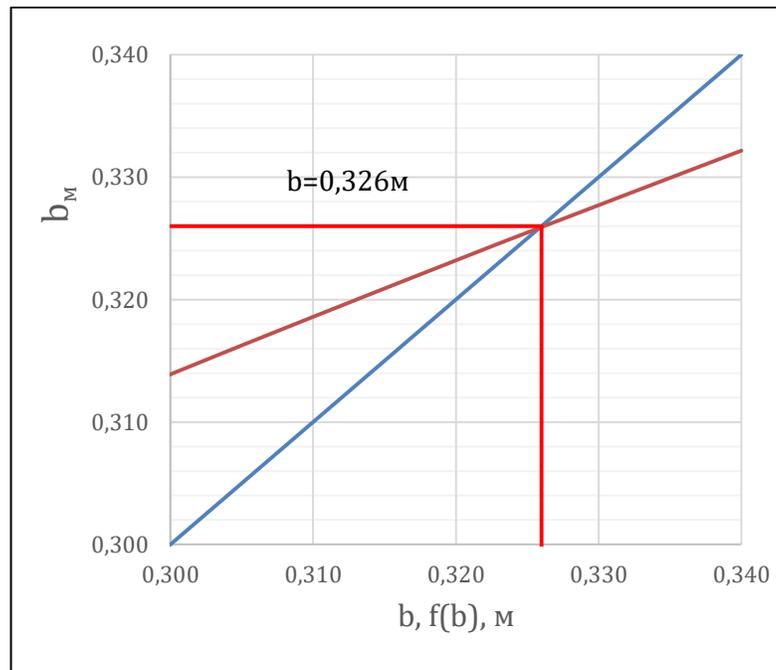


Рисунок 2.24 – Графоаналитическое решение уравнения (2.73)

Согласно этому решению, для обеспечения положения подвижного короба с отметкой порога поплавок на уровне воды в приёмном канале, требуется подвижной

короб снабдить поплавком с квадратным поперечным сечением, имеющим сторону квадрата по внешнему обводу $b=326$ мм.

2.6.5. Гидродинамические расчёты плавания короба со стенками, являющимися продолжением внутренних стенок поплавка

Гидравлическая схема перелива воды из подвижного короба через поплавок с квадратным поперечным сечением при плотном прилегании стенок короба и поплавка приведена на рисунке 2.22.

Гидравлическая схема движения воды через гребень поплавка будет та же, что и по схеме рисунка 2.20 для подвижного короба, полностью омываемого водой. Различие по сравнению со схемой рисунка 2.20 будет заключаться в том, что внутренняя стенка поплавка будет одновременно являться и стенкой подвижного короба, в связи с чем вес поплавка будут создавать только три грани – верхняя, наружная и нижняя:

$$G_{\text{п}} = \rho_{\text{ст.п.}} \cdot 4 \cdot (B + b) \cdot 3 \cdot (b - t_{\text{п}}) \cdot t_{\text{п}}, \quad (2.74)$$

с учётом чего уравнение (2.74) примет вид:

$$b = \sqrt{\frac{(\rho_{\text{к}} - 1) \cdot (B_{\text{к}} - t_{\text{ст}}) \cdot (H_{\text{к}} - b) \cdot t_{\text{ст}} + \rho_{\text{п}} \cdot 3 \cdot (B_{\text{к}} + b) \cdot (b - t_{\text{п}}) \cdot t_{\text{п}} + \rho \cdot 0.21 \cdot Q^{\frac{2}{3}} \cdot b \cdot (B_{\text{к}} + b)^{\frac{1}{3}} + 0,0005}{\rho(B_{\text{к}} + b)}}. \quad (2.75)$$

Графоаналитическое решение уравнения (2.75) для расхода напорного трубопровода $Q=3$ м³/с при расчётной ширине подвижного короба $B=2,4$ м приведено на рисунке 2.25. Согласно этому решению, для обеспечения положения подвижного короба с отметкой порога поплавка на уровне воды в приёмном канале, требуется подвижной короб снабдить поплавком с квадратным поперечным сечением, имеющим сторону квадрата по внешнему обводу $b=261$ мм.

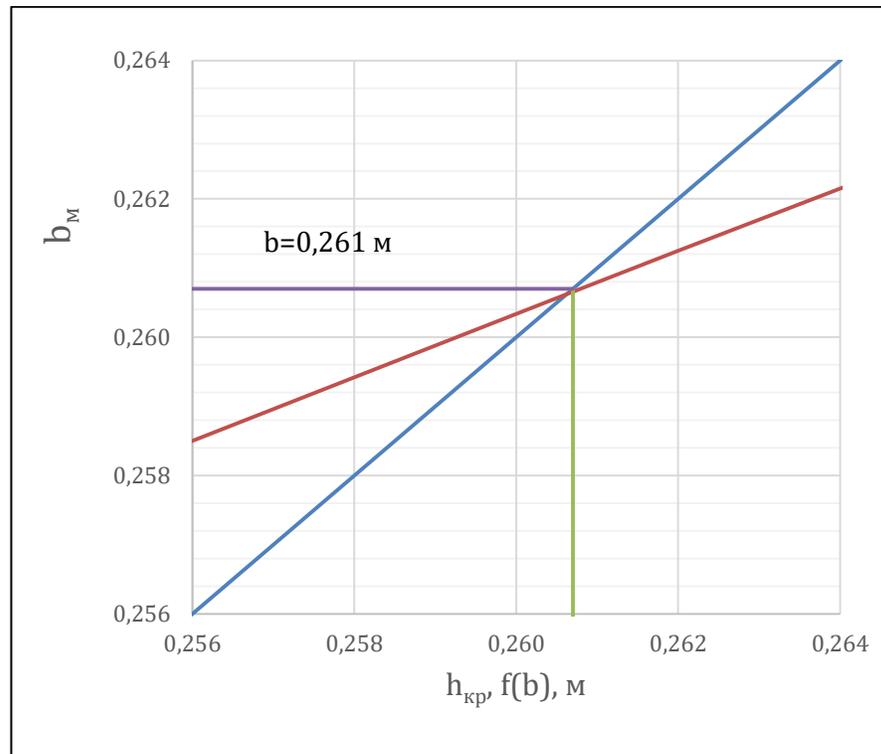


Рисунок 2.25 – Графоаналитическое решение уравнения (2.75)

Таким образом получаем, что для рассмотренных трёх вариантов исполнения поплавок с квадратным поперечным сечением, наибольшие габариты поплавок по внешнему обмеру получаются при плотном примыкании внутренних стенок поплавок к стенкам подвижной камеры - $b_{п}=326$ мм, а минимальные размеры поплавок - $b_{п}=261$ мм в варианте, когда верхняя часть стенок подвижной камеры одновременно являются внутренними стенками поплавок.

Выводы по главе II

1. Гидравлическая схема работы рассматриваемого варианта водовыпускного устройства мелиоративной насосной станции телескопического типа представляет собой вертикальную восходящую струю.
2. Относительная высота подъёма струи H/s_0 увеличивается с уменьшением напора $s_0=V_0^2/2g$ на выходе из сопла.
3. При малых величинах скоростного напора $s_0 \leq d$ насадка, ствол струи исчезает, корона превращается в кольцевой водослив с острой кромкой.
4. Установлено, что при уменьшении начальной скорости струи V_0 значение скоростных напоров s_0 и s_h сокращаются и в сечении на высоте h от створа сопла.
5. Гидростатический расчёт подвижного короба заключается в определении размеров поплавка, обеспечивающего равновесие вертикальных сил.
6. Для рассмотренных гидравлических режимов работы подвижного короба с круглоцилиндрическим поплавком, при диаметре трубопровода насосной станции $D=1,2$ м, получены следующие расчётные диаметры поплавка: $d_{\text{поп}}=0,128$ м, $d_{\text{поп}}=0,081$ м и $d_{\text{поп}}=0,305$ м. Определяющим диаметр поплавка считается диаметр с гидравлическим переливом и максимальным расходом в трубопроводе насосной станции.
7. По результатам расчётов получены, при рассмотрении трёх вариантов исполнения поплавка с квадратным поперечным сечением, максимальные габариты по внешнему периметру при плотном примыкании внутренних стенок подвижной камеры - $b_{\text{п}}=326$ мм, и минимальные - $b_{\text{п}}=261$ мм в варианте, когда верхняя часть стенок подвижной камеры одновременно является внутренней стенкой поплавка.

ГЛАВА III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ВЫВОДОВ

3.1. Цель и задачи экспериментальных исследований модели водовыпуска

Выполненные во второй главе теоретические расчёты подвижного короба заключаются в определении размера поплавка, обеспечивающего равновесие его подъёмной силы и сил, действующих вертикально вниз. Целью исследований является экспериментальное подтверждение теоретического обоснования рассчитанных, экономически обоснованных геометрических размеров и гидравлических параметров элементов водовыпускного сооружения телескопического типа.

В соответствии с поставленной целью в задачи исследований входит:

- рассмотрение соответствия рассчитанных в разделе 2 размеров поплавка, с квадратным поперечным сечением, модели телескопического водовыпуска для необходимости обеспечения плавания подвижного короба с переливом при максимальном расходе в водовыпуске;
- экспериментальное определение коэффициентов расхода (m) и гидравлического сопротивления ζ водовыпускного сооружения;
- разработка практических рекомендаций для возможности использования исследуемого водовыпуска в натуральных условиях.

3.2. Параметры элементов модели водовыпуска телескопического типа

Приведенные выше расчёты параметров поплавка подвижного короба показали, что расчётным диаметром поплавка, обеспечивающим работоспособность конструкции при всех гидравлических режимах, будет поплавок с параметрами, полученными из условия плавания короба при изливе из него воды.

Недостатком конструкции подвижного короба с поплавком с круглым поперечным сечением является сложность его изготовления как в натуральных условиях, так и на модели. По этой причине для модельных исследований работы подвижного короба принята конструкция водовыпускного сооружения с подвижным коробом, снабжённым поплавком с квадратным поперечным сечением.

Как видно из приведенных расчётов параметров подвижного короба, невозможно выполнить его неискажённое моделирование. При этом следует учесть, что моделировать необходимо две независимые системы:

- моделирование гидравлических процессов;
- моделирование конструктивных элементов.

Если гидравлическое моделирование не представляет проблем, и может быть выполнено по общепринятой методике, изложенной, например, в [2, 39, 41, 55, 83], то линейное пропорциональное моделирование конструктивных элементов не поддается по причине невозможности обеспечить физико-механические параметры модели, соответствующие параметрам натуре. Так при гидравлически разумном масштабе модели, например, 1:25 натуральной величины, для моделирования стенок поплавка толщиной в натуре, например, $t_{ст} = 0,006$ м, для изготовления модели требуется материал толщиной $t_{ст.мод.} = 0,006:25 = 0,00024$ м = 0,24 мм. Поэтому материал для изготовления конструктивных элементов принимается на основе возможностей лаборатории, а затем основные параметры поплавка определяются с использованием соответствующих расчётных формул.

3.3. Параметры элементов модели коробов

В качестве примера выполним расчёты поплавок модели с квадратным поперечным сечением для варианта его работы с переливом воды при неподтопленном режиме.

В качестве исходных используем следующие параметры модели:

- гидравлический масштаб модели $M=1:25$;
- материал для изготовления конструктивных элементов – оргстекло;
- плотность стенок короба и поплавок – $\rho_{ст} = 2,4 \text{ кг/дм}^3$;
- плотность воды – $\rho = 1,0 \text{ кг/дм}^3$;
- ширина подвижного короба по наружному обводу – $B=0,6 \text{ дм}$;
- высота стенок короба $H=1,0 \text{ дм}$;
- ширина сечения поплавок b ;
- толщина стенок подвижного короба и поплавок $t=3 \text{ мм}=0,03 \text{ дм}$;
- расчётный расход модели $q_m = Q/M^{5/2} = 3000/25^{5/2} = 0,96 \text{ л/с}$;
- предварительно приняв ширину поплавок $b=0,4 \text{ дм}$, получим величину пери-

метра P гребня поплавок: $P = 4 \cdot (B_k + b) = 4 \cdot (0,6 + 0,4) = 4,0 \text{ дм}$.

Расчётный расход модели Q_m составит: $Q_m = Q_n : M^{5/2} = 3000 : 25^{5/2} = 0,96 \text{ л/с}$.

Удельный расход на гребне поплавок q : $q = \frac{Q}{P} = \frac{0,96}{4,0} = 0,24 \text{ л/с}$.

Напор на гребне поплавок H_o для модели (размерность в л/с и дм):

$$H_o = \left(\frac{Q_m}{4 \cdot t \cdot (B_k + b) \cdot \sqrt{2g}} \right)^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{Q_m}{4 \cdot 0,03 \cdot (B_k + b) \cdot 14} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,122 \cdot \left(\frac{Q_n}{B_k + b} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \text{дм}$$

Выполним расчёты параметров модели поплавок для двух вариантов конструкции:

- конструкция подвижного короба с плотным прилеганием стенок короба и поплавок по схеме рисунка 2.21;

- конструкция подвижного короба со стенками, являющимися продолжением внутренних стенок поплавок по схеме рисунка 2.22.

Для определения параметров поплавок для конструкции с плотным прилеганием стенок поплавок и подвижного короба, воспользуемся формулой (2.72).

Подставив предварительно принятые параметры модели (в дм и кг) в (2.72), получим для модели:

$$b_m = \sqrt{\frac{[\rho_{ст} \cdot b + (\rho_{ст} - 1) \cdot (H_k - b)] \cdot (B_k - t_{ст}) \cdot t_{ст} + \rho_{п} \cdot 4 \cdot (B_k + b) \cdot (b - t_{п}) \cdot t_{п} + \gamma \cdot 0,0975 \cdot Q^{\frac{2}{3}} \cdot b \cdot (B_k + b)^{\frac{1}{3}} + 0,0005}{\rho \cdot (B_k + b)}}. \quad (3.1)$$

На рисунке 3.1 представлено графоаналитическое решение уравнения (3.1).

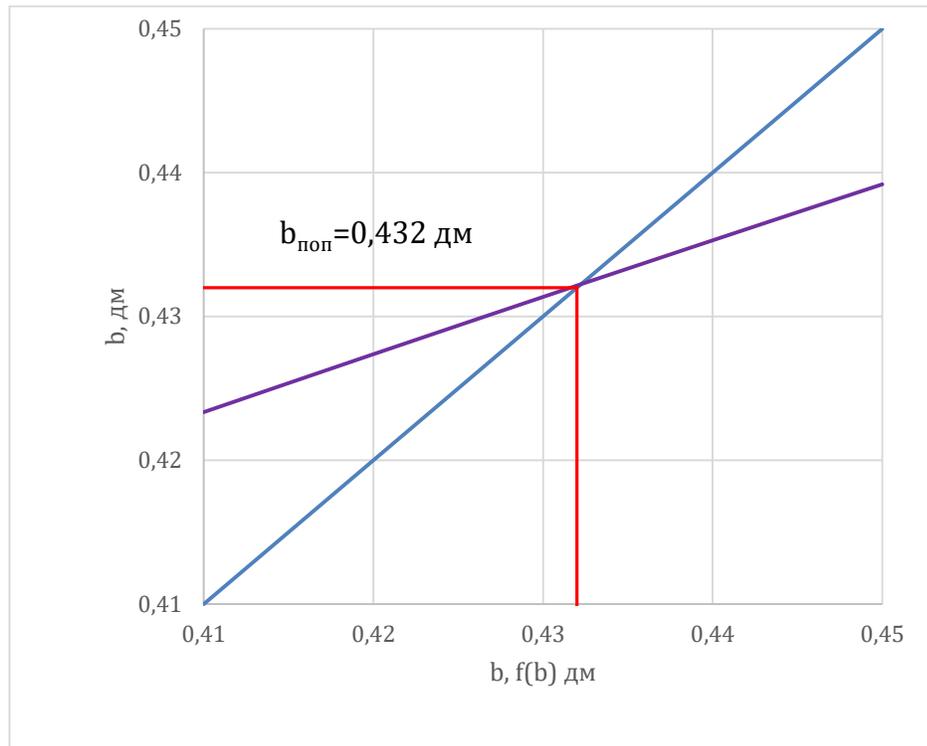


Рисунок 3.1 – Графоаналитическое решение уравнения (3.1)

В соответствии с решением этого уравнения для обеспечения плавания подвижного короба при переливе через него максимального расхода потребуется поплавок с наружными габаритами поперечного сечения $b \times b = 43 \times 43$ мм. Такие параметры по-

плавка обеспечат положение его верховой грани на уровне воды в отводящем канале.

Полученные расчётные поперечные размеры поплавка, практически, соответствуют предварительно принятым размерам.

Конструкция модели подвижного короба телескопического водовыпуска с поплавком с квадратным поперечным сечением с изливом воды из короба представлена на рисунке 3.2.

Таким образом, для рассмотренного примера масштаб конструкции модели поплавка $m_{\text{констр.}}=326:43=7,6$, что в 7,6 раза крупнее гидравлической модели.

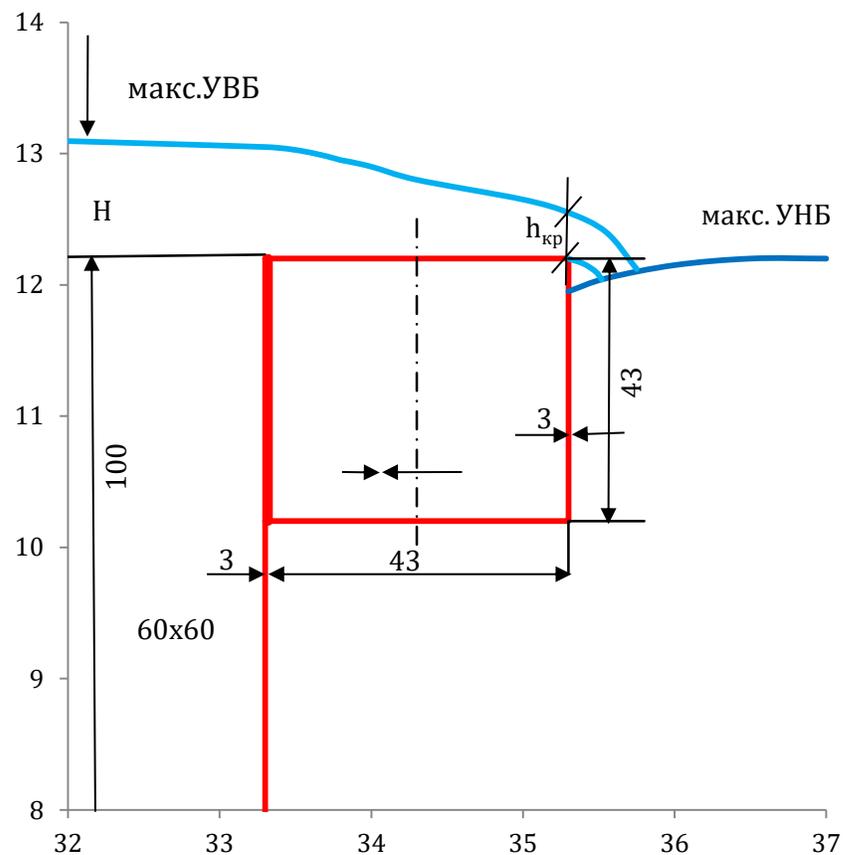


Рисунок 3.2 – Конструкция модели подвижного короба с поплавком с квадратным поперечным сечением. Схема излива воды из короба. Размеры даны в мм.

Для определения параметров поплавка для конструкции подвижного короба со стенками, являющимися продолжением внутренних стенок поплавка, воспользуемся формулой (2.75).

Подставив предварительно принятые параметры модели (в дм и кг) в (2.75), получим для модели:

$$b = \sqrt{\frac{(\rho_k - 1) \cdot (B_k - t_{ст}) \cdot H_k \cdot t_{ст} + \rho_n \cdot 3 \cdot (B_k + b) \cdot (b - t_n) \cdot t_n + \rho \cdot 0,0975 \cdot Q^{\frac{2}{3}} \cdot b \cdot (B_k + b)^{\frac{1}{3}} + 0,0005}{\rho \cdot (B_k + b)}} \quad (3.2)$$

На рисунке 3-3 представлено графоаналитическое решение уравнения (3.2).

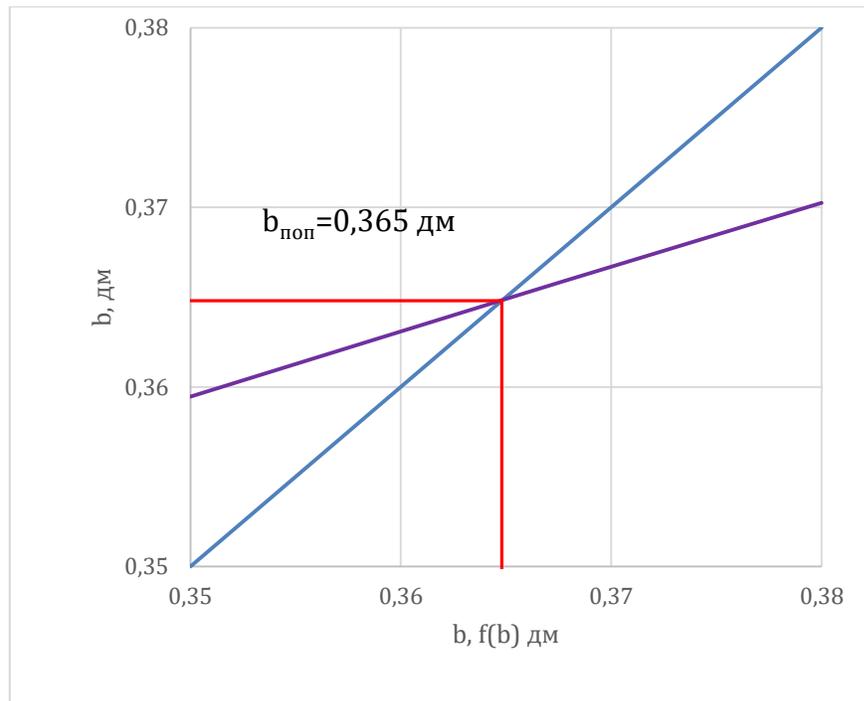


Рисунок 3.3 – Графоаналитическое решение уравнения (3.2)

В соответствии с решением этого уравнения для обеспечения плавания подвижного короба при переливе через него максимального расхода потребуется поплавок с наружными габаритами поперечного сечения $b \times b = 37 \times 37$ мм. Такие параметры поплавок обеспечат положение его верховой грани на уровне воды в отводящем канале.

Полученные расчётные поперечные размеры поплавок, практически, соответствуют предварительно принятым размерам.

Конструкция модели подвижного короба телескопического водовыпуска с поплавком с квадратным поперечным сечением с изливом воды из короба представлена на рисунке 3.4.

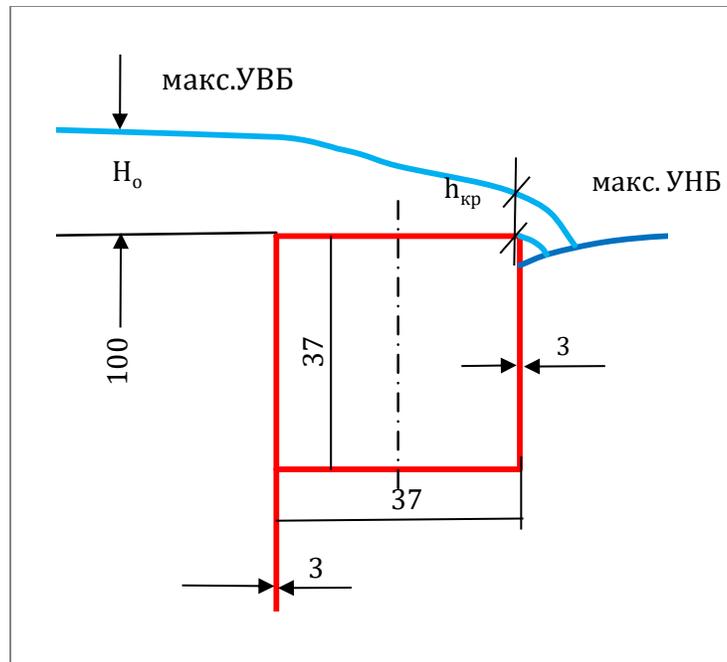


Рисунок 3.4 – Конструкция подвижного короба со стенками, являющимися продолжением внутренних стенок поплавка. Схема излива воды из короба. Размеры даны в мм

Таким образом, для рассмотренного примера масштаб конструкции модели поплавка $m_{\text{констр.}} = 261:37 = 7$, что в 7 раз крупнее гидравлической модели.

3.4. Модель установки, технология проведения исследований

Поставленные в разделе 3 задачи исследований гидравлических условий работы концевых частей телескопического водовыпуска решаются проведенными лабораторными испытаниями. В составе экспериментальных испытаний использован стальной гидравлический лоток лаборатории водопропускных сооружений кафедры гидротехнических сооружений ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», показанный на рисунке 3.5.

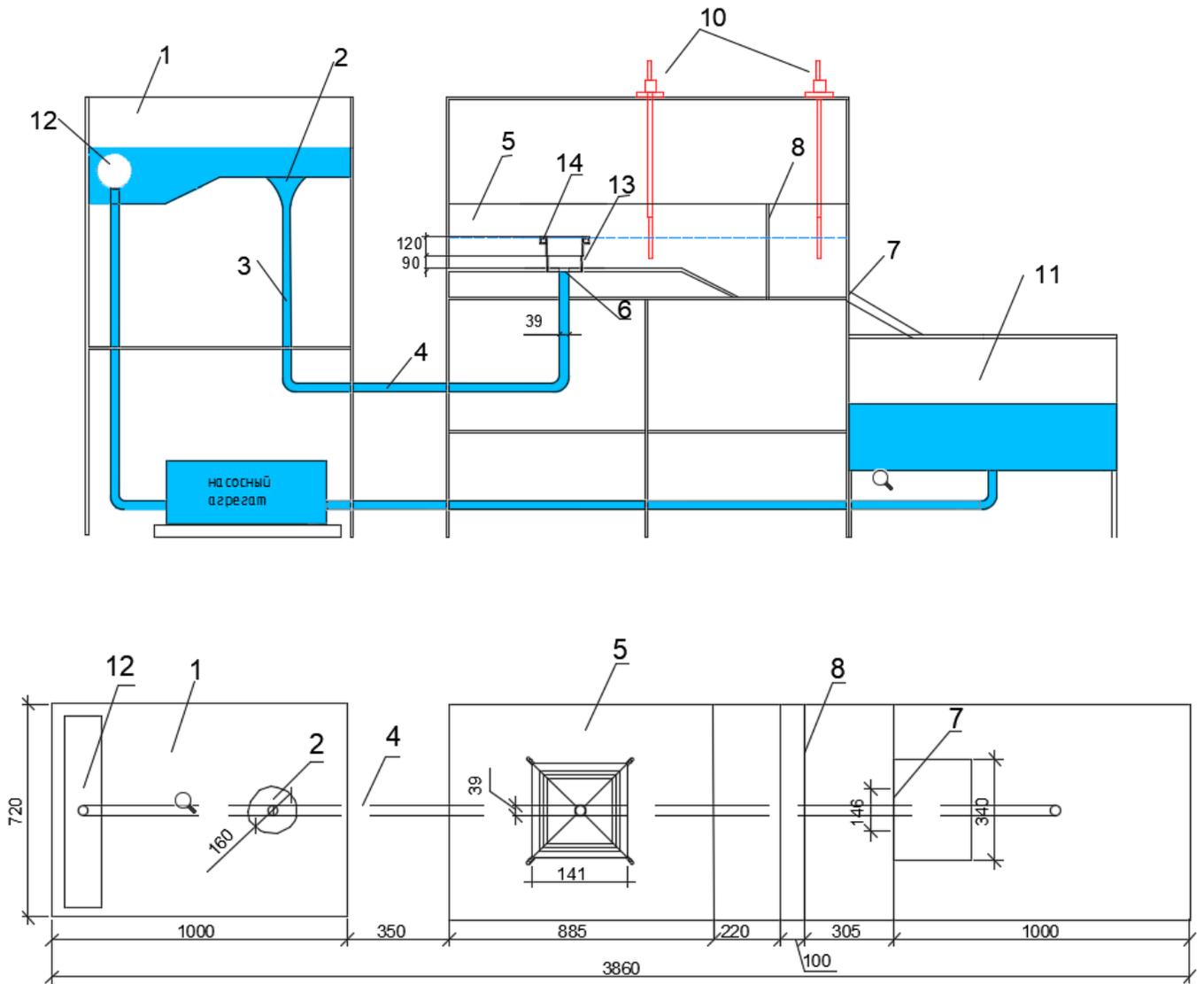


Рисунок 3.5 – Схема модельной установки:

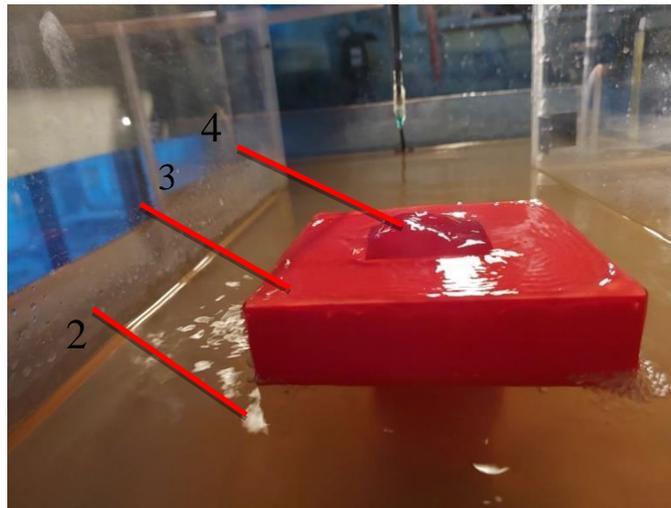
1 – верхний резервуар; 2 – входной оголовок в виде круговой воронки; 3 – вертикальная цилиндрическая шахта; 4 – транзитная часть водовода; 5 – средний резервуар; 6 – выходное сечения вертикального водовыпуска телескопической конструкции; 7 – мерный водослив треугольного профиля; 8 – успокоительная решетка; 9 – жалюзийные заграждения; 10 – шпитцен-масштабы для измерения отметок поверхности воды; 11 – нижний резервуар; 12 – успокоительный водовыпуск-гаситель

напорного трубопровода насосной установки; 13 – конструкция концевого участка; 14 – поплавков

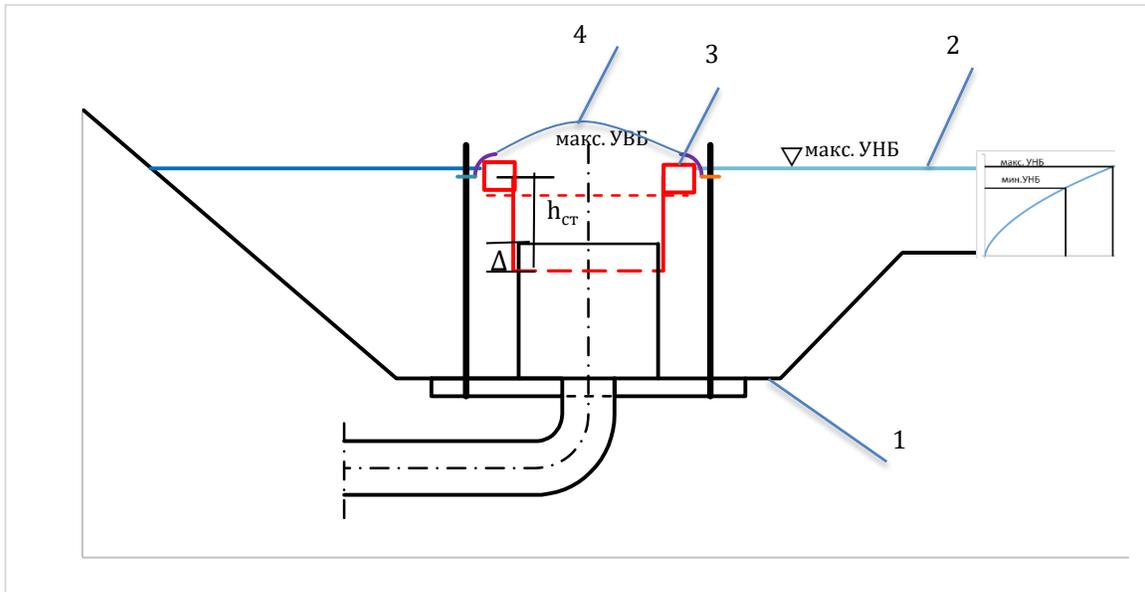
Исследования проводились на модели, представляющую автономную замкнутую систему водоснабжения, состоящую из: верхнего резервуара 1 длиной 1200 мм, высотой 300 мм, шириной 710 мм, представляющего фрагмент верхнего бьефа с установленным в нём входным оголовком водопропускного сооружения, водоприёмным устройством шахтного типа, выполненного в виде круговой воронки 2 с диаметром 160 мм, и вертикальной цилиндрической шахты 3, сопряжённой с транзитной частью трубопровода 4, диаметром 39 мм. Трубопровод имеет вертикальный выход в лоток нижнего бьефа 5 длиной 1500 мм и шириной 710 мм. Над выходным сечением вертикально восходящего концевого участка модели напорного трубопровода насосной станции диаметром $D=39$ мм установлен водовыпуск телескопической конструкции 6, состоящей из неподвижно закреплённого внутреннего короба 5 и подвижного внешнего короба 13, соединённого с возможностью телескопического перемещения относительно неподвижного короба 6. В конце лотка расположен треугольный мерный водослив. Перед водосливом дно лотка понижалось для возможности измерения расхода потока независимо от глубины наполнения нижнего бьефа. Перед мерным водосливом были установлены успокоительные решётки 8. На выходе из отводящего канала установлены жалюзийные заграждения 9, используемые для регулирования глубины потока в отводящем русле. Для измерения отметок поверхности воды в отводящем канале и превышения над уровнем воды, над мерным водосливом использовались шпигельмасштабы 10. Отводящий канал сформирован лотком нижнего резервуара 11. Успокоительный водовыпуск-гаситель 12 напорного трубопровода насосной установки установлен в верхнем резервуаре. Перелив воды проводится через мерный водослив, в нижний резервуар 11.

Первым этапом исследований была проведена оценка возможности применения предлагаемой конструкции водовыпускного сооружения телескопического типа

в практике гидротехнического строительства, для чего проверено соответствие размеров поплавок, с предварительно принятым размером, модели подвижного короба телескопического водовыпуска с поплавком и квадратным поперечным сечением подвижного короба при переливе с максимальным расходом. При выходе воды из подвижного короба поплавок используется как водослив, в связи с чем, ставилась задача определения коэффициентов расхода и гидравлического сопротивления выпускного сооружения. На рисунке 3.6 показан общий вид экспериментальной установки с переливом воды из подвижного короба через гребень поплавок. Модель представляет собой конструкцию водовыпуска телескопического типа насосной станции, состоящую из двух коробчатых конструкций, соединённых с возможностью телескопического перемещения. Расходы Q , глубина в нижнем бьефе h и напор воды на поплавке Δh изменялись подачей насоса в водовыпуск (рисунок 3.6).



a)



б)

Рисунок 3.6 – Принципиальная конструкция водовыпуска телескопического типа: а – Общий вид экспериментальной установки с переливом воды из подвижного короба через гребень поплавка; б – продольный разрез положения водовыпуска при максимальном уровне воды в водоприёмном бассейне: 1– отметка дна; 2– отметка поверхности воды в приемном бассейне; 3– отметка гребня; 4– отметка поверхности воды в выпускном сооружении

При выполнении экспериментов измерялись: напор – H , на гребне поплавка и на мерном водосливе, и глубина в отводящем канале.

Отметки поверхности воды на выходе из выпускного сооружения и в отводящем канале измерялись шпитценмасштабом. На расстоянии более трёх максимальных напоров измерялись отметки поверхности воды для определения напора на мерном водосливе, величина напора вычислялась как разница между отметкой поверхности воды и отметкой “нуля” водослива. Измерялись отметка поверхности воды на выходе из сооружения - 4 и отметка гребня поплавка – 3.

Напор воды на гребне поплавка определяли как разницу между отметкой поверхности воды на выходе из выпускного сооружения - 4 и отметкой гребня поплавка – 3.

Расход определялся по напору на треугольном водосливе и рассчитывался по формуле [30, 33, 34, 35, 61]:

$$Q_B = 1.4H_B^{2.5} \text{ м}^3/\text{с}; \quad (3.3)$$

где Q_B – расход, $\text{м}^3/\text{с}$; H_B – напор на водосливе, м.

Напор воды на треугольном водосливе определялся как разница между отметкой поверхности воды на мерном водосливе и отметкой нуля водослива.

По данным экспериментов, проведенных на модели, в зависимости от значений напора, измеренного над порогом треугольного мерного водослива, построен график $Q=f(H)$, представленный на рисунке 3.7.

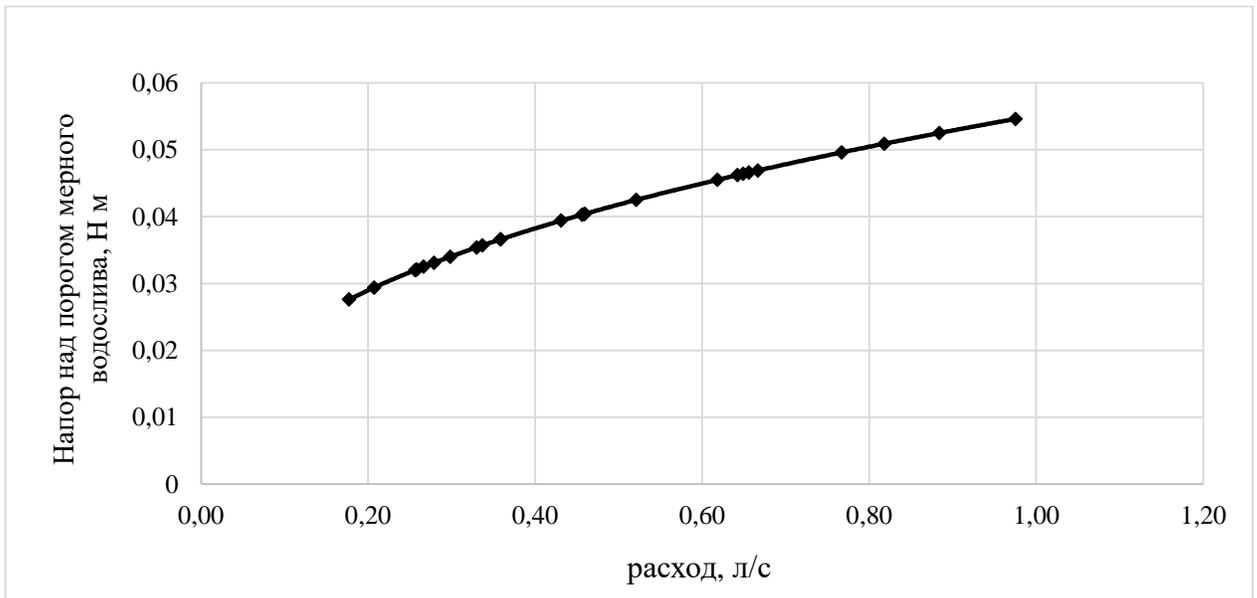


Рисунок 3.7– Тарировочный график треугольного мерного водослива

Коэффициент расхода m на гребне поплавок вычислялся из уравнения расхода водослива (3.4). При известном значении расхода Q , он определялся по зависимости (3.5):

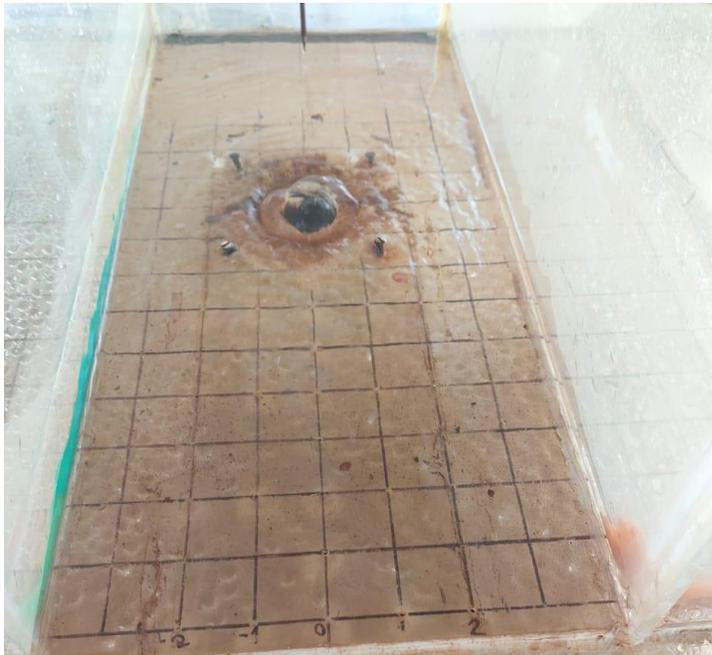
$$Q = m \cdot p \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{1.5}, \quad (3.4)$$

$$m = \frac{Q}{p \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{1.5}}; \quad (3.5)$$

С целью выяснения связи гидравлических потерь энергии водовыпускных сооружений напорных водоводов с величиной скоростного напора проведены исследования для испытанных режимов:

- первого, при определении скоростного напора с учётом скорости в выходном сечении напорного трубопровода, при отсутствии самого водовыпускного сооружения.
- второго, при определении скоростного напора по скорости в выходном сечении верхнего короба.

Общий вид экспериментальной установки для двух вариантов истечения, при исследованных режимах, показан на рисунке 3.8.



а)



б)

Рисунок 3.8 – Общий вид экспериментальной установки

- а) при истечении воды из напорного трубопровода, при отсутствии водовыпускного сооружения;
- б) с переливом воды из подвижного короба через гребень поплавка

3.5. Достоверность измерений

В процессе модельных гидравлических исследований телескопического водовыпуска проведена оценка точности определения расхода.

Одним из основных критериев, при определении качества модельных исследований, является точность определения гидравлических измерений потока. Для качественной оценки замера следует исследовать его фактические результаты. Замер может быть безошибочным, в случае, когда замеряется величина дискретная, принимающая отдельные изолированные величины. При любых измерениях разделяют три категории ошибок [21, 82]:

- систематические ошибки, имеющие в замере постоянную или изменяющуюся величину;
- случайные ошибки, вызываемые неизбежными, многочисленными и разнообразными явлениями;
- грубые ошибки, вызываемые нарушениями методики замера.

С целью определения достоверности результатов измерений проверялось наличие систематических погрешностей, которые могли быть вызваны ошибками в методике измерений напоров и расходов.

При оценке возможных случайных относительных ошибок измерений и полученных результатов, абсолютная ошибка при измерениях шпитценмасштабом принимается равной точности отсчета по нониусу – 0,1 мм, при больших расходах и возрастающих колебаниях уровней воды возростала абсолютная ошибка, измеряемые глубины также увеличивались, вследствие чего принималось среднее значение.

Минимальная глубина, измеренная шпитценмасштабом, принята 160 мм. Максимальная относительная ошибка при этом составляла $0.1/160 \cdot 100 = 0.06 \%$.

Относительная ошибка измерения расхода треугольным водосливом равна [3, 54]

$$\Delta Q/Q = K \cdot \Delta H/H$$

При коэффициенте $k = 2.47$ и минимальном опытном расходе $Q = 0.18$ л/с, соответствующем напору $H = 11$ мм, имеем

$$\Delta Q/Q = 2.47 \cdot 0.1/11 = 2.2\% .$$

Ранее отмечено, что рассмотрены максимальные относительные ошибки измерений и расчетов, соответствующие однократным измерениям и выполняемым на их основе расчетам. Учитывая, что экспериментальные исследования моделей телескопического водовыпуска проводились при переменном расходе и во многих случаях повторялись, точность полученных результатов существенно увеличивалась.

При проведении экспериментальных исследований возможны грубые и систематические ошибки. Для исключения грубых ошибок, регистрация уровней свободной поверхности потока выполнялась многократно и в журнал измерений заносились средние значения.

Наличие систематических ошибок обусловлено односторонним внешним воздействием, которые не трудно поддаются обнаружению и исключению. Учитывая данный факт, полученные результаты во всех случаях сравнивались с данными литературных источников [78].

3.6. Методика проведения и обработки результатов опытных данных

Экспериментальные исследования, как отмечено выше, проводились при разных гидравлических режимах, при разных значениях подаваемого насосом расхода. После того, как режим устанавливался, регистрировались отметки на выходе из короба, над поплавком, в отводящем канале и на мерном водосливе.

По полученным в ходе экспериментов данным измерений, на модели с помощью Microsoft Excel построены линии тренда, определены уравнения зависимостей и коэффициенты детерминации R^2 . Последние показывают, насколько изменение исследуемых параметров объясняется изменениями аргументов заданных функций [61].

Выведенные уравнения и значения коэффициентов по построенным графикам исследуемых величин представлены в разделе 4.

ГЛАВА IV. РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Результаты экспериментальных данных

В настоящем разделе рассмотрены результаты проведённых исследований, в соответствии с поставленными задачами. По результатам экспериментальных данных проверено соответствие размеров поплавка с квадратным поперечным по предварительно принятым размерам модели подвижного короба телескопического водовыпуска.

Исследование включало эксплуатацию модели с переливом из подвижного короба через гребень поплавка, с целью получения исходных данных для расчёта коэффициента расхода водовыпуска (таблица 4.1)

Таблица 4.1 – Исходные данные для расчёта коэффициента расхода водовыпуска при ширине водослива 4.3 см

Q л/сек	H, см	S, см	S/H
1	2	3	4
0.18	1.09	4.3	3.9
0.21	1.36	4.3	3.2
0.26	1.5	4.3	2.9
0.26	1.64	4.3	2.6
0.27	1.88	4.3	2.3
0.28	1.64	4.3	2.6
0.30	1.79	4.3	2.4
0.33	2.27	4.3	1.9
0.34	2.74	4.3	1.6
0.36	2.77	4.3	1.6
0.36	3.07	4.3	1.4

Продолжение Таблица 4.1.

1	2	3	4
0.43	3.19	4.3	1.3
0.46	4.08	4.3	1.1
0.46	3.05	4.3	1.4
0.46	3.33	4.3	1.3
0.52	3.69	4.3	1.2
0.62	4.25	4.3	1.0
0.64	4.51	4.3	1.0
0.65	4.45	4.3	1.0
0.66	4.03	4.3	1.1
0.67	4.65	4.3	0.9
0.77	4.64	4.3	0.9
0.82	5.57	4.3	0.8
0.88	5.76	4.3	0.7
0.98	6.09	4.3	0.7

По величине отношения ширины водослива к напору S/H , показанной в таблице 4.1, видно изменение в диапазоне 0.7 - 3.9, что соответствует истечениям через водосливы с широким порогом [17, 2, 74, 54].

4.1.1. Коэффициент расхода модели водовыпускного сооружения

Ранее отмечено, что измерения проводились на физической модели для случая 3-го режима (перелив воды осуществлялся из подвижного короба через гребень поплавка).

По первому этапу исследований проведена оценка возможности применения предлагаемой конструкции водовыпускного сооружения насосной станции в практике гидротехнического строительства, показан график изменений коэффициента рас-

хода поплавка (рисунок 4.1) определяемого по зависимостям 4.1-4.2 при разных гидравлических режимах.

$$Q = m \cdot p \cdot \sqrt{2g} \cdot H_{гр}^{1.5} \quad (4.1)$$

$$m = \frac{Q}{p \cdot \sqrt{2g} \cdot H_{гр}^{1.5}} \quad (4.2)$$

$H_{гр}$ - напор воды на гребне водослива; p - периметр выходного сечения верхнего подвижного короба.

Результаты определения значений коэффициент расхода m в зависимости от значений расхода и напор воды на гребне поплавка показан на рисунке 4.1.

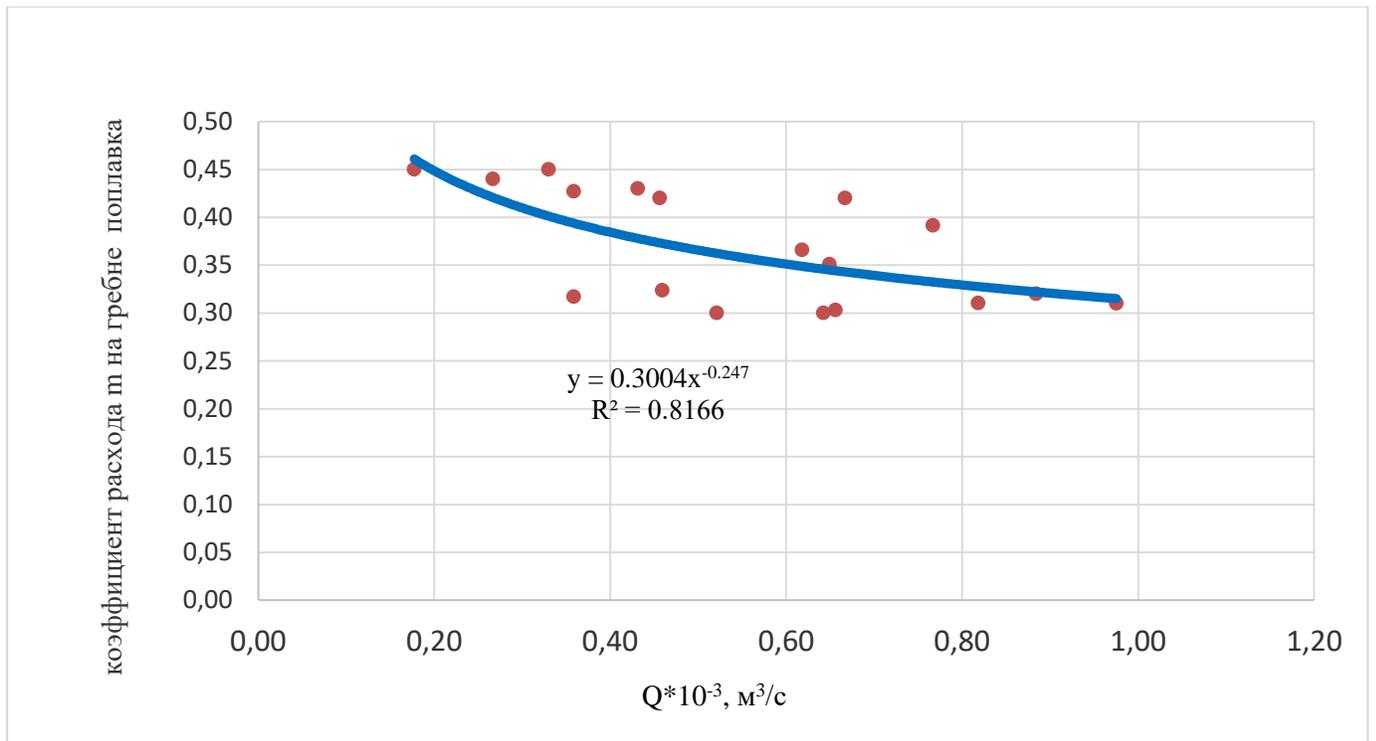


Рисунок 4.1 – График зависимости коэффициент расхода m на гребне поплавка от расхода Q

Из графика видно, что имеется некоторое уменьшение коэффициента расхода для исследованного диапазона расходов. Значения коэффициента расхода изменялись от 0.31 до 0.45.

4.1.2. Экспериментальная зависимость расхода от напора на гребне поплавка-водослива

В результате проведенных экспериментов на физической модели водовыпускного сооружения телескопического типа построен график зависимости расхода от напора на гребне поплавка, представленный на рисунке 4.2.

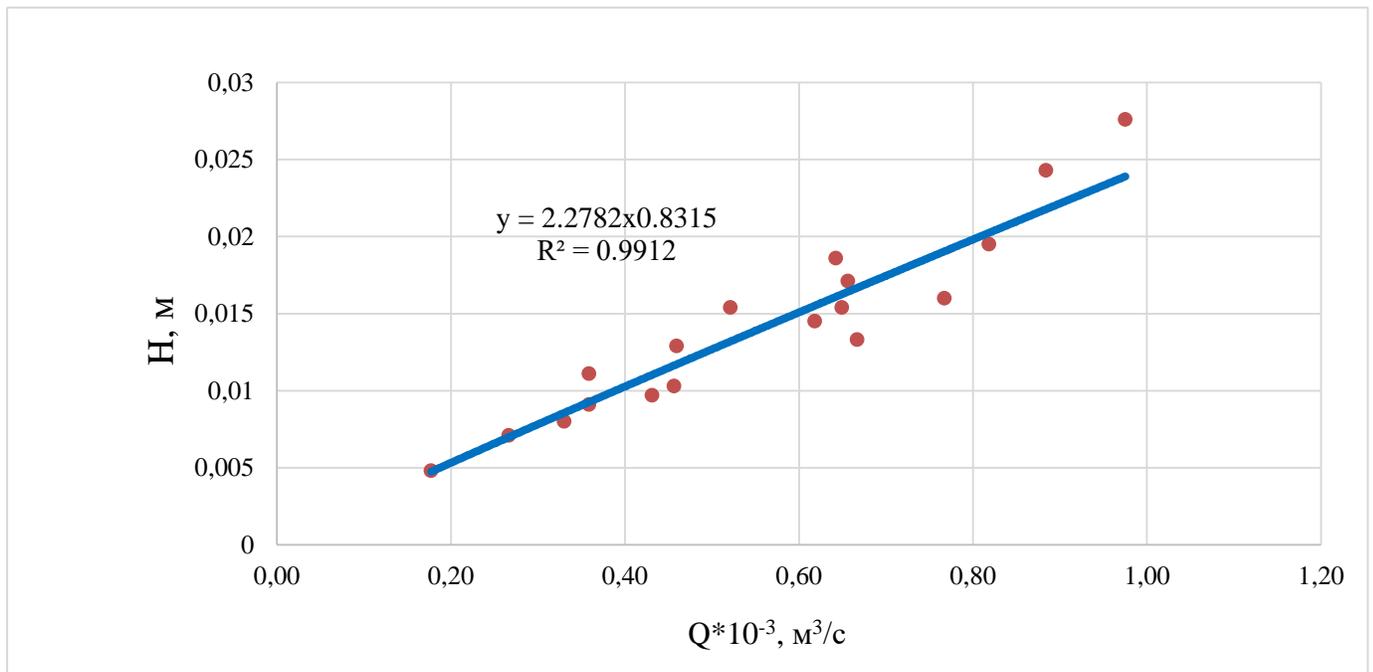


Рисунок 4.2 – График зависимости расхода Q от напора на гребне поплавка-водослива

4.1.3. Экспериментальная высота подъёма поплавка

Проведёнными исследованиями установлено, что при подъёме уровня воды в канале, поплавок перемещается, следуя за изменением уровня воды в канале, при опускании уровня воды в канале подъёмная сила поплавка уменьшается и под действием собственного веса верхний короб опускается до установления плавучести короба. С целью подтверждения проведённых теоретических расчётов параметров по-

движного короба с квадратным поплавком и обеспечения подвижного короба в плавсостоянии при переливе через него максимального расхода, проведена дополнительная серия экспериментов и построен график зависимости высоты подъёма поплавка Δh от расхода, график представлен на рисунке 4.3.

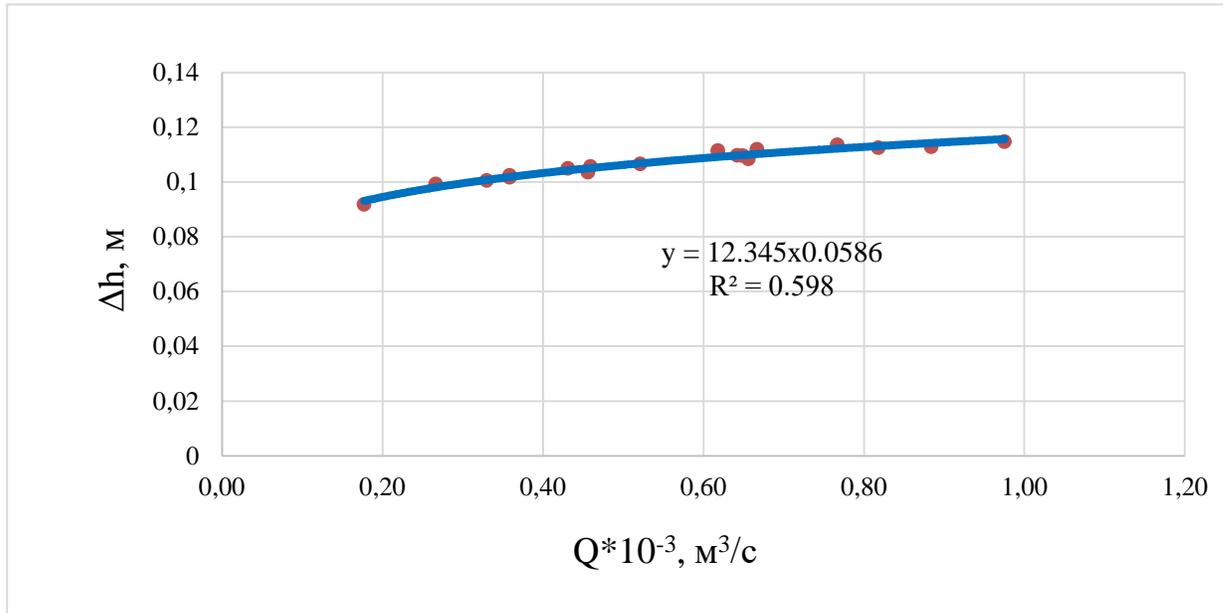


Рисунок 4.3 – График зависимости высоты подъёма поплавка Δh в зависимости от расхода

Из рисунка 4.3, видно, что при увеличении расхода, при постоянном уклоне канала, увеличивается уровень воды, и соответственно отметка поплавка и верхнего короба.

4.1.4. Экспериментальные параметры скоростного напора

Телескопическое водовыпускное сооружение с точки зрения определения гидравлического сопротивления представляет собой сложную конструкцию, при движении потока в границах которой возникает совокупность сопротивлений по длине и местных сопротивлений на сравнительно небольшом участке водопроводящего

тракта. При движении потока вдоль поверхностей концевой участка возникают сопротивления по длине.

Общий вид экспериментальной установки для двух вариантов истечения, при исследованных режимах показан на рисунке 4.4.

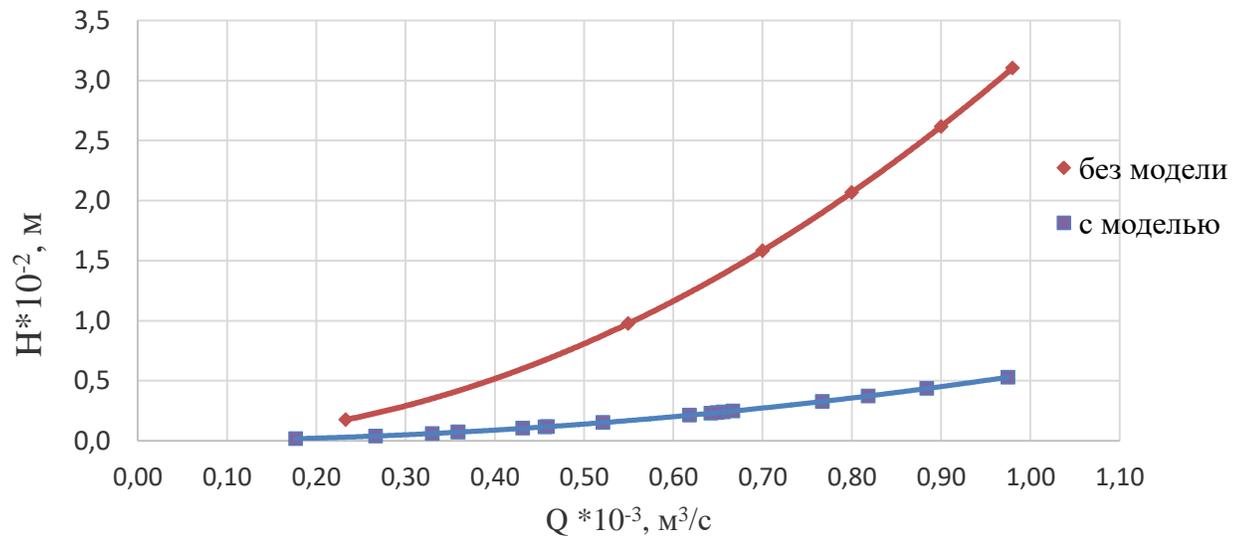


Рисунок 4.4 – График зависимости скоростного напора от расхода

Из сравнения скоростных напоров испытанных режимов видно, что при выпуске расхода из модели выпускного сооружения скоростной напор меньше, что объясняется наличием гидравлических потерь в сооружении и увеличенным сечением выходного верхнего короба.

4.5. Экономическое сравнение гидравлических параметров исследуемого водовыпуска с существующими сооружениями

4.5.1. Техничко-экономическое сравнение сопоставляемых вариантов

Техничко-экономические расчеты обосновывают целесообразность и рентабельность проектируемых сооружений и систем. На основе этих расчетов принимают решение о строительстве объекта, выбирают вариант технического решения по гидроузлу машинного водоподъема в целом и по отдельным входящим в него сооружениям [69].

В практике водохозяйственного строительства [69] применяются два вида технико-экономических расчётов:

- общей (абсолютной) экономической эффективности, которая определяет рентабельность запроектированного объекта;
- сравнительной экономической эффективности, которая показывает насколько один вариант технических решений эффективнее другого.

С целью проверки достоверности работы предлагаемого телескопического водовыпускного сооружения с минимальными потерями, что соответственно даёт экономический эффект за счет снижения энергопотребления и обеспечивающего минимальные капиталовложения, было предложено определить потери напора на исследуемом водовыпускном сооружении и существующих аналогичных сооружениях.

Водовыпускные сооружения с механическими запорными устройствами

Определяют потери напора в водовыпускные сооружения с механическими запорными устройствами как сумму потерь напора для разных сечений.

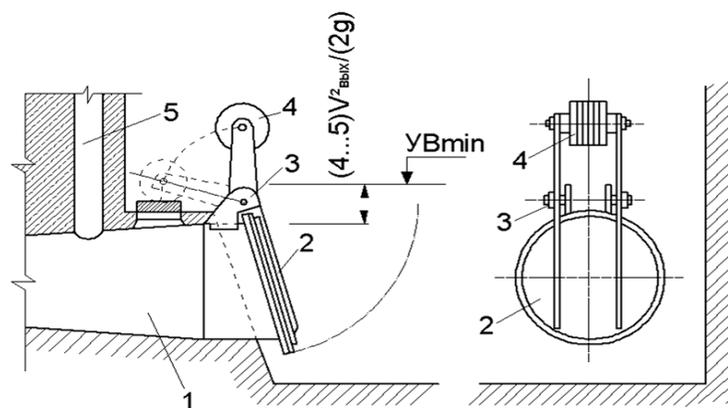


Рисунок 4.5 – Схема однодискового обратного клапана-захлопки: 1- выходной диффузор трубопровода; 2– диск; 3 – шарнир; 4 – противовес; 5 –воздушная труба

Для определения потерь напора для данной конструкции были определены коэффициенты сопротивления при разных скоростях [4, 56, 70, 71]:

- в обратном клапане, коэффициент сопротивления клапана $\zeta_{ок} = 0.5$;
- в выходном диффузоре, $\zeta_{диф} = 0.2$;
- на выходе из трубопровода, $\zeta_{вы} = 1$;
- в бассейне водовыпуска, $\zeta_{бас} = 0.8 \dots 1$.

Результаты определения коэффициента сопротивления в водовыпускном сооружении с механическими запорными устройствами представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Величины коэффициента сопротивления в водовыпускном сооружении с механическими запорными устройствами

$\zeta_{ок}$	$\zeta_{диф}$	$\zeta_{вы}$	$\zeta_{бас}$	$\sum \zeta$	v м/с
0.5	0.2	1	0.9	2.6	0-3

Сооружения сифонного типа

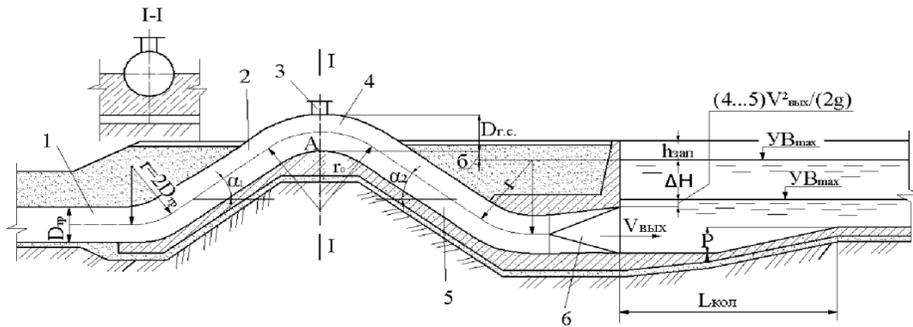


Рисунок 4.6 – Схема типовой конструкции сифонного водовыпуска:

1 – напорный трубопровод; 2 и 5 – восходящая и нисходящая ветви сифона; 3 – люк для установки клапана срыва вакуума; 4 – горло сифона; 6 – выходной диффузор

Определим потери напора в сифоне водовыпуска. Суммарный коэффициент сопротивления составит примерно 1 относительно скоростного напора в горловом сечении [56, 71]:

- потери напора в сифоне $\zeta_{сиф} = 1$;
- потери напора в бассейне водовыпуска $\zeta_{бас} = 0.9$.

Результаты определения коэффициента сопротивления в сифоне водовыпуска приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Величины коэффициента сопротивления в сифоне водовыпуска

$\zeta_{сиф}$	$\zeta_{бас}$	$\Sigma \zeta$	v м/с
1	0.9	1.9	0-3

Предлагаемый вариант выпускного сооружения телескопического типа

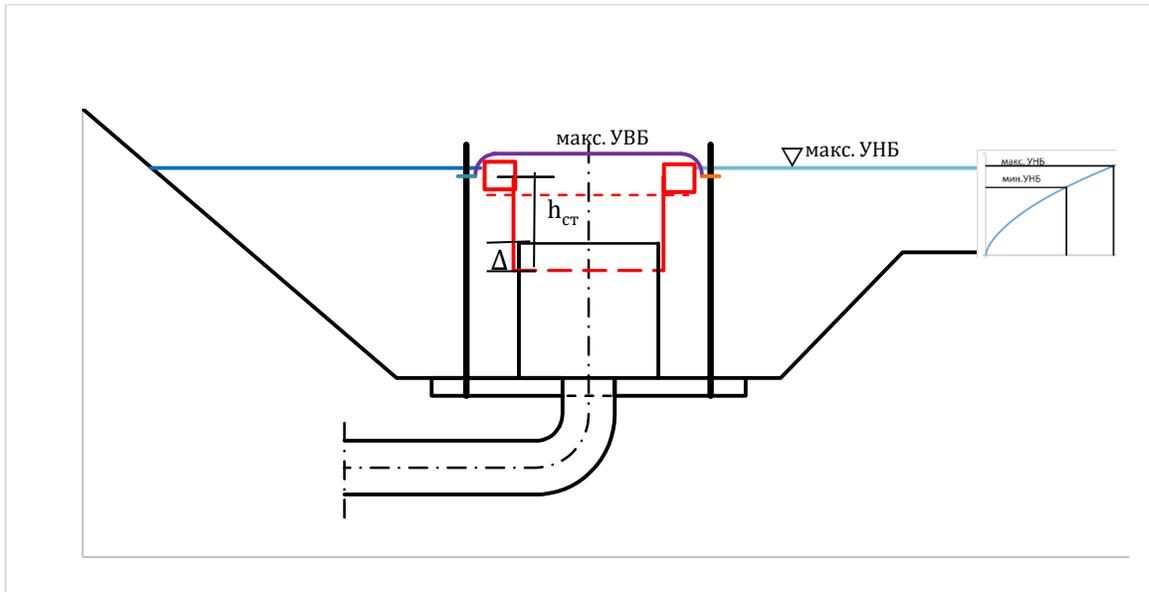


Рисунок 4.7 – Принципиальная конструкция водовыпуска телескопического типа

Течение на гребне поплавка является неподтопленным, так как отметка гребня выше отметки максимального уровня воды в отводящем канале, однако сопряжение потока, переливающегося через гребень, с потоком в отводящем канале должно быть в виде надвинутого гидравлического прыжка.

Потери напора в сооружении складываются из потерь напора в колене в трубопроводе и на выходе из него:

- в колене в трубопроводе $\zeta_{\text{ВЫХ}} = 0.9$;
- на выходе из трубопровода, $\zeta_{\text{ВЫХ}} = 0.5$.

Для определения потерь напора на каждом элементе конструкции были произведены расчеты значений коэффициентов гидравлического сопротивления при различных скоростях и результаты сравнения расчетов потерь в различных конструкциях сооружений показано в таблице 4.4 и рисунке 4.8.

Таблица 4.4 – Результаты сравнения расчетов потерь телескопического водовыпуска с существующими аналогичными сооружениями

$\Sigma\zeta_{\text{мех}}$	$\Sigma\zeta_{\text{сиф}}$	$\Sigma\zeta_{\text{тел}}$	V м/с	$V^2/2g$	hf _{мех}	hf _{сиф}	hf _{тел}
2.6	1.9	1.4	0	0.00	0.00	0.00	0.00
2.6	1.9	1.4	0.2	0.00	0.01	0.00	0.00
2.6	1.9	1.4	0.4	0.01	0.02	0.02	0.01
2.6	1.9	1.4	0.6	0.02	0.05	0.03	0.03
2.6	1.9	1.4	0.8	0.03	0.08	0.06	0.05
2.6	1.9	1.4	1	0.05	0.13	0.10	0.07
2.6	1.9	1.4	1.2	0.07	0.19	0.14	0.10
2.6	1.9	1.4	1.4	0.10	0.26	0.19	0.14
2.6	1.9	1.4	1.6	0.13	0.34	0.25	0.18
2.6	1.9	1.4	1.8	0.17	0.43	0.31	0.23
2.6	1.9	1.4	2	0.20	0.53	0.39	0.29
2.6	1.9	1.4	2.2	0.25	0.64	0.47	0.35
2.6	1.9	1.4	2.4	0.29	0.76	0.56	0.41
2.6	1.9	1.4	2.6	0.34	0.90	0.65	0.48
2.6	1.9	1.4	2.8	0.40	1.04	0.76	0.56

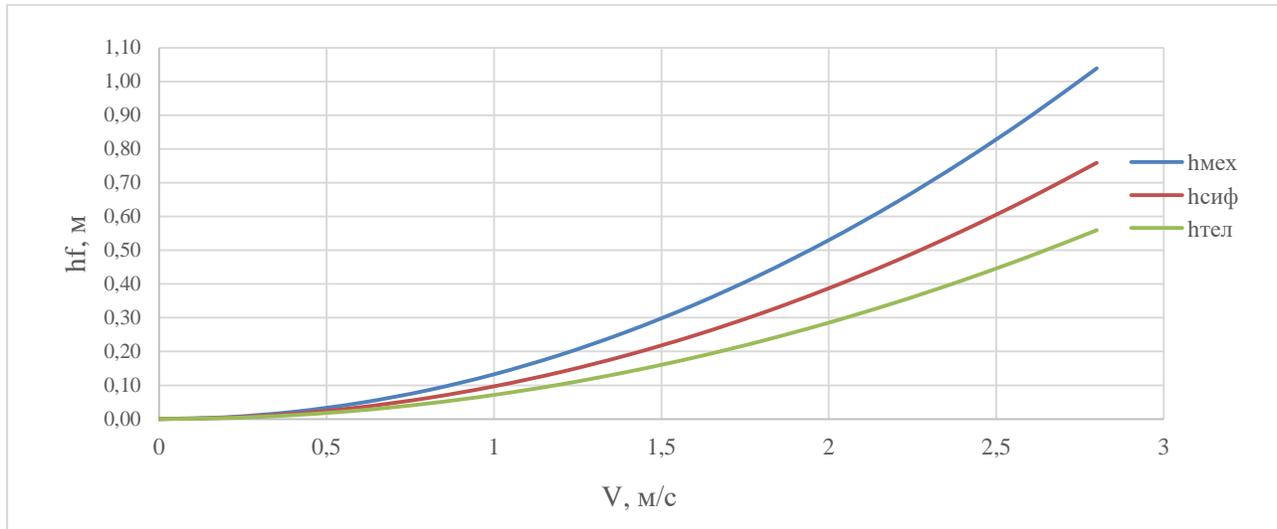


Рисунок 4.8 – Результаты сравнения расчётов потерь телескопического водовыпуска с существующими аналогичными сооружениями

Полученные результаты сравнения потерь напора показывают, что предлагаемая конструкция телескопического водовыпускного сооружения работает с минимальными потерями, обеспечивающими снижение потребного напора насосной станции и стоимости потребляемой электроэнергии в соответствии с фактическим уровнем воды в канале, определяемым графиком подачи воды насосной станцией на орошение гидромелиоративной системой.

Выводы по главе IV

- Относительная ширина исследуемого водослива (0,7 – 3,9) соответствует относительной ширине водосливов с широким порогом и водосливов практического профиля;

- полученные результаты сравнения потерь напора показывают, что предлагаемая конструкция телескопического водовыпускного сооружения работает с минимальными потерями, обеспечивающего снижение потерь напора насосной станции в

среднем на 10-30% и стоимости потребляемой ею электроэнергии в соответствии с фактическим уровнем воды в канале, определяемым графиком подачи воды насосной станцией на орошение гидромелиоративной системой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложенная к рассмотрению конструкция телескопического водовыпуска обладает простотой обратного клапана, надёжностью и минимальными потерями сифонного водовыпуска.
2. Исследования показали, что в зависимости от материала, технологии производства работ и стоимости электроэнергии, экономически наивыгоднейшая скорость составляет 3 м/с, что соответствует скоростному напору $s_o=0,46$ м. При диаметре напорных трубопроводов $d_o=0,2...2,0$ м, отношение s_o/r_o находится в пределах - 4,6...0,46.
3. Для трёх рассмотренных гидравлических режимов работы подвижного короба с круглоцилиндрическим поплавком, для рассмотренного диаметра трубопровода насосной станции, получены следующие расчётные диаметры поплавка; $d_{\text{поп}}=128$ мм, $d_{\text{поп}}=81$ мм и $d_{\text{поп}}=305$ мм. Определяющим диаметр поплавка является режим с переливом через него воды при подаче максимального расхода трубопровода. Также получаем, что для рассмотренных трёх вариантов исполнения поплавка с квадратным поперечным сечением, наибольшие габариты поплавка по внешнему обмеру получаются при плотном примыкании внутренних стенок поплавка к стенкам подвижной камеры - $b_{\text{п}}=326$ мм, а минимальные размеры поплавка - $b_{\text{п}}=261$ мм в варианте, когда верхняя часть стенок подвижной камеры одновременно являются внутренними стенками поплавка.
4. Лабораторные экспериментальные исследования подтвердили правильность теоретических расчетов параметров подвижного короба с квадратным поплавком. Эксперименты показали, что при исследованных в лаборатории гидравлических режимах, гребень поплавка работает как водослив с широким порогом и как водослив практического профиля, относительная ширина исследуемого водослива изменялась от 0,7 до 3,9, а значения коэффициента расхода от 0,31 до 0,45.

5. Полученные результаты сравнения потерь напора показывают, что предлагаемая конструкция телескопического водовыпускного сооружения работает с минимальными потерями, обеспечивающего снижение потерь напора насосной станции и стоимости потребляемой ею электроэнергии в среднем на 10-30% в соответствии с фактическим уровнем воды в канале, определяемым графиком подачи воды насосной станцией на орошение гидромелиоративной системой.

Рекомендации производству

1. При проектировании водовыпуска необходимо особое внимание уделить стыковке подвижных элементов сооружения для исключения возможности увеличения расхода водовыпускного сооружения без использования подвижного короба.

2. Монтаж напорного трубопровода насосной станции с неподвижной бетонной плитой необходимо выполнить с использованием компенсатора с целью исключения возможной расгерметизации стыка в процессе эксплуатации.

Перспективы дальнейшей разработки темы

При дальнейшей разработке темы необходимо предусмотреть расчёт максимально возможного расхода в напорном трубопроводе для исключения возможности несоответствия размеров элементов водовыпуска и подачи насосной станции.

Условные обозначения

$D_{\text{вых}}$ – диаметр выходе отверстия напорного трубопровода;

$B_{\text{вых}}$ – ширина выходного отверстия трубопровода;

$H_{\text{вых}}$ – высота выходного отверстия трубопровода;

ΔH – амплитуда колебаний уровней воды в водоприемнике, м;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

m – коэффициент расхода;

$Q_{\text{тр}}$ – максимальный расход трубопровода, $\text{м}^3/\text{с}$;

$h_{\text{пк}}$ – высота стенок подвижного короба;

$H_{\text{пк}}$ – полная высота подвижного короба;

$h_{\text{мк}}$ – максимальная глубина магистрального канала;

$d_{\text{п}}$ – диаметр поплавка;

Δ – зазор между стенками неподвижного и подвижного коробов;

$R_0 = d/2$ – радиус сопла и начального сечения струи;

V_0 – начальная скорость струи;

s_0 – скоростной напор струи на выходе из сопла;

h – высота ствола струи;

$H = h + a$ – полная высота фонтанной струи;

$\Sigma G_{\text{к}}$ – сумма весов подвижного короба с поплавком;

W – объём вытесняемый поплавком воды;

ρ – плотность воды;

α – коэффициент Кориолиса;

$\kappa_{\text{ср}}$ – среднее значение кривизны потока в рассматриваемом сечении;

$H_{\text{к}}$ – высота бортов подвижного короба;

$t_{\text{ст}}$ – толщина стенок подвижного короба;

$\rho_{\text{ст}}$ – плотность материала стенок;

$G_{\text{к}}$ – вес стенок подвижного короба;

$t_{\text{п}}$ – толщина стенок поплавка;

$\rho_{\text{п}}$ – плотность материала стенок поплавка;

$G_{\text{п}}$ – вес поплавка;

$G_{\text{в}}$ – вес переливающегося слоя воды на поплавке.

Библиографический список

1. Абрамович, Г.Н. Теория турбулентных струй/ Г.Н Абрамович. – М.: Фитматгиз, 1984 – 716 с.
2. Агроскин И.И. Гидравлика:/ И.И Агроскин., Г.Т Дмитриев. Ф.И Пикалов. – М-Л.: Госэнергоиздат, 1954. – 484 с.
3. Алтунин В.И. Гидравлические исследования сооружений с гладкими и гофрированными трубами: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.14.09 - М.: 1977. – 23 с.
4. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления / А.Д. Альтшуль. – М.: Недра. 1982. – 224 с.
5. Альтшуль, А. Д. Примеры расчетов по гидравлике / А. Д. Альтшуль. – М.: Стройиздат, 1982. – 255 с.
6. Баль Б.А. Гидравлическое устройство для срыва вакуума на сифонных водовыпусках / Б.А . Баль., О.Я. Гловацкий ., Р.А. Очиллов . – Гидротехника и мелиорация. – 1980. - № 3.
7. Батук, Б. О. Гидравлика / Б. О. Батук. – М.: Высшая школа, 1962.– 450 с.
8. Бегляров, Д.С Насосы и насосные станции. Учебное пособие/ Д.С. Бегляров и др. М: Изд-во РГАУ-МСХА, 2015. 342 с..
9. Бегляров Д.С., Резуг Л. Эффективность водовоздушных баков на насосных станциях закрытых оросительных систем/ Д.С. Бегляров, Л. Резуг // Мелиорация и водное хозяйство. - 2000, - №1. - С. 29-30.
10. Беляев Н.М. Сопротивление материалов / Н.М. Беляев. – М.: «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1965. – 716 с.
11. Березинский А.Р. Пропускная способность водослива с широким порогом / А.Р. Березинский. – М.: ВОДГЕО, 1950. – 187 с.
12. Богомолов А. И., Высокоскоростные потоки со свободной поверхностью / А.И Богомолов, В.С Боровков, Ф. Г. Майрановский. - М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.

13. Богомолов, А. И. Примеры гидравлических расчетов / А. И. Богомолов, Н.М. Константинов. – М.: Транспорт, 1984. – 526 с.
14. Большаков, В.А. Справочник по гидравлике / В.А. Большаков // Изд. объединение «Вища школа». – Киев, 1977. – С. 277.
15. Вишневский К.П. Расчет переходных процессов в напорных трубопроводах насосных станций/ К.П. Вишневский // Гидротехника и мелиорация. — 1987. — № 5.-С. 20-23.
16. Высоцкий, Л.И. Гидравлический расчёт дорожных водопропускных и водоотводящих сооружений: учеб. пособие для вузов / Л.И. Высоцкий, Ю.А. Изюмов, И.С. Высоцкий. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2010. – 56 с.
17. Гидравлика. Учебник для вузов. /Д. В. Штеренлихт. – М.: Энергоатомиздат. 1984. – 640 с
18. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: справочное пособие / под ред. Д. Д. Лаппо. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 624 с.
19. Гловацкий О.Я. Совершенствование мелиоративных насосных станций/ О.А. Головацкий // Мелиорация и водное хозяйство. – 1990. - № 1
20. ГОСТ 32413-2013 Межгосударственный стандарт: трубы и фасонные части из не пластифицированного поливинилхлорида для систем наружной канализации. Технические условия.
21. Грановский, В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях: учебник / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 287 с.
22. Гришин, М. М. Гидротехнические сооружения / М. М. Гришин. – М.: Госстройиздат, 1962. – 763 с.
23. Гурьев А.П. Гидравлическое обоснование работы телескопического водовыпускного сооружения в незатопленном режиме / А.П. Гурьев, Н.В. Ханов, Хаек Бушра, А.И. Новиченко // М.: Природообустройство. – 2022. – №5. – С. 114-120

24. Гурьев А.П. теоретические расчёты параметров телескопического водовыпуска мелиоративной насосной станции / А.П Гурьев, Н. В Ханов , Б Хаек //.: Сб. научн. Тр. – М.: МГСУ, 2021. – Т.1. – 110-112.
25. Железняков, Г. Гидротехнические сооружения: Справочник проектировщика / Г. Железняков, Ю. Ибадзаде, П. Иванов, и др.; под ред. В. П. Недриги. – М.: Стройиздат, 1983. – 543 с.
26. Зуйков А. Л. Гидравлика. Электронный ресурс: учебник: в 2 т. Т.2. Напорные и открытые потоки. Гидравлика сооружений / М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. Гос. Строит. Ун-т; авт.: А. Л. Зуйков, Л. В. Волгина (гл.12). – 2-е изд.(эл). – Электрон. Текстовые дан. ! файл pdf : 426 с. : ил.). _ М.: Издательство МИСИ – МГСУ, 2017.
27. Идельчик И.Е. Гидравлические сопротивления/ И.Е. Идельчик. М.: «Энергия».– 1954. –315с.
28. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 463 с.
29. История фонтанов мира. Шошин, В. И. Гидротехнические мелиорации (Часть I. Гидрология, гидрометрия, гидравлика): методические указания к выполнению практических занятий / В. И. Шошин, А. В. Прутской. // Брянск: БГИТА, 2011. – 26 с.
30. Калицун, В.И. Гидравлика, водоснабжение и канализация: уч. пособие / В.И. Калицун, В.С. Кедров, Ю.М. Ласков. - М.: Стройиздат, 2002. - 397 с.
31. Карелин, В. Я., Минаев А. В. К 22 Насосы и насосные станции: Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп./ В.Я. Карелин, А.В. Минаев. М.: Стройиздат, 1986.-320 с: ил.
32. Картвелишвили, Н.А. Динамика напорных трубопроводов/ Н.А. Картвелишвили - М.: Энергия, 1979-224 с
33. Каталог. Гидротехническая трубопроводная арматура. Задвижки и затворы / Минводхоз СССР. - М.: ЦБНТИ, 1982. - 82 с.

34. Киселёв П. Г. Справочник по гидравлическим расчётам/П. Г. Киселев М., Энергия, 1972, с. 312.
- 35., Кошумбаев, М.Б. Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений / М.Б. Кошумбаев. – М.: Инфра-Инженерия, 2018. – 240 с..
36. Костяков А.Н. Основы мелиораций / А.Н. Костяков. – М.:1960. Сельхозгиз. с. 662.
37. Кох, А. Основы практической гидродинамики: Книги / А. Кох, М. Карстаньен. - Москва.: Ленинград , 1933.195 с.
38. Кузнецов, С. К. Теория и гидравлические расчеты нижнего бьефа / С.К. Кузнецов. – Львов: Изд-во при Львов. Ун-те, 1983. –176 с.
39. Леви, И.И. Моделирование гидравлических явлений / И.И.Леви. – Л.: Энергия, 1967. – 235 с.
40. Ляпичев, Ю.П. Гидрологическая и техническая безопасность гидросооружений: уч. пособие / Ю.П. Ляпичев - М.: РУДН, 2008. – 222 с.
41. Лятхер, В. М. Гидравлическое моделирование / В. М. Лятхер, А.М. Прудовский. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 392с.
42. Мвуйекуре, Ж. К. Гидравлические условия работы концевых участков водовыпусков, оборудованных гасителями ударного действия / Ж. К. Мвуйекуре // Природообустройство. – 2014. – №5. – С. 55– 59.
43. мелиоративные системы и сооружения. насосные станции. нормы проектирования ВСН 33-2.2.12-87 министерство мелиорации и водного хозяйства ссср москва 1988
44. Мирцхулава, Ц. Е. Надежность гидромелиоративных сооружений / Ц. Е. Мирцхулава. – М.: Колос, 1974. – 278 с.
45. Мороз А.Н. Переходные гидравлические процессы в трубопроводах, оборудованных средствами защиты. Дис... канд. техн. наук — М. — 1991.

46. Розанов, Н.П. Вакуумные водосливы; Рекомендации по расчёту прямых водосливов / Н.П. Розанов Научно исследовательский институт ирригации и водных проблем (НИИИВП) .Ташкент, Узбекистан. -1997.-344 с.
47. Павловский Н.Н. “Гидравлический справочник” / Н.Н. Павловский. – Л.-М.: ОНТИ. НКТП. СССР, 1937. – 866 с.
48. Рассказов, Л. Н. Гидротехнические сооружения. Часть 1. / под редакцией Л.Н. Рассказова. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов. – 2008. – 576 с.
49. Расуанандрасана, М.Ж. Гидравлическое обоснование методов расчета и проектирования концевых участков напорных водопропускных сооружений с вертикально восходящим выходом потока: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.07, 05.23.16 / М.Ж. Расуанандрасана, – М., 2010. – 24 с..
50. Рекомендации по гидравлическому расчёту водосливов. Часть I. Прямые водосливы. Л.: “Энергия”, 1974. 58 с, Чугаев Р.Р. Гидравлика. Л.: Энергия, 1971. 552с.
51. Справочник по гидротехнике. М.: Госиздат литературы по строительству и архитектуре, 1955. 828 с. Смыслов В.В.
52. Розанов Н.П. Вакуумные водосливы / Н.П. Розанов. – М.: ВОДГЕО, 1956. – 192с.
53. Розанов, Н.П. Гидравлические расчеты водопропускных труб: уч. пособие / Н.П. Розанов. - М.: МГМИ, 1979. - 68 с.
54. Розанова, Н. Н. Моделирование работы гидротехнических сооружений: учебное пособие / Н. Н. Розанова. – М. : Изд-во Рос.ун-та дружбы народов, 1998. – 108 с.
55. Рычагов В.В. Насосы и насосные станции / В.В. Рычагов ., М. М. Флоринский .- М.: 1975. Сельхозизд. с. 427.
56. Сифонный водовыпуск насосной станции : пат. 1617084 Рос. Федерация МПК Е 02 В 7/18/ В.А.Гурми, Ю.П. Евреенко, заявитель и патентообладатель Украинский институт инженерров водного хозяйства. – № 1296676 ; заявл. 20.07.88 ; опубл. 30.12.90, Бюл. № 48. – 2 с.

57. Сифонный водовыпуск: пат. 1013554 Рос. Федерация МПК Е 02 В 7/18/ А.А.Ниберг, И.С. Румянцев, заявитель и патентообладатель Московский ордена Трудового Красно знамени научно-исследовательский институт ирригации В.Д.Журина. – № 679689 ; заявл. 27.11.81 ; опубл. 23.04.83, Бюл. № 15. – 2 с.
58. Сифонный водовыпуск: пат. 1016417 Рос. Федерация МПК Е 02 В 7/18/ Е.Ф.Павов, В.В. Прохоров, заявитель и патентообладатель Украинское отделение всесоюзного ордена ленина проектно-изыскакогои научно-исследовательсим"Гидропроект"им. С.Я.Жука. – № 632797 ; заявл. 08.05.81 ; опубл. 07.05.83, Бюл. № 17. – 4 с.
59. Слиссский С.М. Гидравлические расчёты высокоскоростных гидротехнических сооружений /С.М. Слиссский.– М.: Энергоатомиздат, 1986. – 304 с.
60. Снежко, В.Л. Современные способы обработки данных гидравлического эксперимента: Монография / В.Л. Снежко. – М.: Издательство РГАУ-МСХА, 2015. – 141 с.
61. ТЭО гидроузла «Северный Кебир в САР». М.: «Союзгипроводхоз». Арх. №13246-Г. 1977.
62. Устройство для срыва вакуума в сифонном водовыпуске насосной станции: пат. 479847 Рос. Федерация МПК Е 02 В 7/18/ Б.И.Белесков, Т.И. Мамышев, заявитель и патентообладатель среднеазиатский ордена трудового красного знамени научно-исследовательский институт ирригации В.Д.Журина. – № 1695067/30-15 ; заявл. 20.08.71 ; опубл. 05.08.75, Бюл. № 29. – 2 с.
63. Устройство и гидравлический расчет фонтана (Электронный ресурс). lektsii.com/2-8708.html;
64. Ухин, Б. В. Инженерная гидравлика: Учебное пособие / Б. В. Ухин, Ю.Ф. Мельников; под редакцией Б. В. Ухина. – М.: Издательство АСВ, 2011. – 344 с.
65. Фонтаны: Описание, конструкции, расчет. / П. А. Спышнов. — Москва: Государственное издательство архитектуры и градостроительства, 1950. — 172 с., ил

66. Хаек Б.А. Теоретическое обоснование оптимальных параметров водовыпускного сооружения мелиоративных насосных станций/ Б. А.Хаек / Сб. научн. Тр – М.: РГАУ - МСХА им. К. А. Тимирязева, 2020. – Т.2. – 385-362
67. Хаек, Б. Теоретическое обоснование параметров телескопического водовыпускного сооружения с круглоцилиндрическим поплавком/ Б. А.Хаек // М.: Природообустройство. – 2023. – №1. – С. 47-53.
68. Чебаевски, В.Ф. Проектирование насосных станций и испытание насосных установок / В.Ф. Чебаевски., Е.И. Дубинчик .- М.: Колос. – 1982. –249 с.
69. Чебаевский В.Ф. Проектирование насосных станций и испытание насосных установок: Учебное пособие / В.Ф . Чебаевский ., К.П . Вишневский ., Н.Н. Накладов .- М.: Колос, 2000.376с.
70. Чебаевский В.Ф. //Насосы и насосные станции/ В.Ф. Чебаевский., Н.Н. Вишневский., В.В. и др.,- М.: Агропромиздат, 1989.416с.
71. Чертоусов М.Д. Гидравлика, специальный курс / М.Д. Чертоусов. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1972. – 616с.
72. Чертоусов М.Д. Гидравлика. Специальный курс / М.Д. Чертоусов. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 630 с.
73. Чугаев Р.Р. Гидравлика / Р.Р. Чугаев. – Л.: Энергия, 1971. – 552 с.
74. Чугаев, Р.Р. Гидротехнические сооружения. Учеб. пособие для студ. гидротехн. спец. вузов. В 2-х ч. Ч. II. Водосливные плотины / Р.Р. Чугаев; 2-е изд. – М.: Агропромиздат, 1985. – 302 с.
75. Шахтный водосброс / Гурьев А.П., Афанасьев А.Ю. // Патент №2250951 РФ на изобретение. – бюлл. “Открытия. Изобретения. Пром. Образцы. Товарные знаки”. – № 12, 27.04.2004.
76. Шеренков И. А. Прикладные плановые задачи гидравлики спокойных потоков /Шеренков И. А. М.: Энергия, 1978. «240 с.;

77. Ширченко, В.А. Пропускная способность труб при частично-напорном режиме // Гидравлика дорожных водопропускных сооружений: сб. тр. МАДИ, вып. 121. - М.: МАДИ, 1976.
78. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг .- М.: "Наука", 1974. – 658 с.
79. Штеренлихт Д.В. Гидравлика /Д.В. Штеренлихт М.: “Колосс”, 2004. –650 с.
80. Штеренлихт Д.В. Гидравлика/ Д.В. Штеренлихт – М.: Энергия, 1999.–639 с.
81. Щапов, Н. М. Гидрометрия гидротехнических сооружений и гидромашин / Н. М. Щапов. – М.: Л.: Госэнергоиздат, 1957 – 238с.
82. Эйсер Ф. Моделирование гидравлических явлений / Ф. Эйсер.- ОНТИ, 1937. С
83. Электронный ресурс <http://www.anion-msk.ru>
84. Электронный ресурс hims.ru >Каталог> [ПВХ](#) ПВХ листовой от компании «Химсырье».
85. Электронный ресурс <https://books.google.ru> > books. Гидротехнические мелиорации 2-е изд., испр. и доп. Учебник. /В. Теодоронский, Е. Сабо, А. Золотаревский·2021г;
86. Электронный ресурс <https://studme.org> > geografiya > raschet_struy. Расчет струй. - Гидротехнические мелиорации, и др.
87. Электронный ресурс <https://www.fontan.city> > istoriya-fontanostroeniya.
88. Freedman. Verhandlungen der American Soecityof civil Engineers, New York, Nov 1890. Hütte. Справочник для инженеров, техников и студентов. Том 1. М-Л.: Глав. Ред. Лит. по машиностроению и металлообработке. 1936, 912 с
89. Форхгеймер в [Forhgeimer F. Hydraulic. Leipzig-Berlin. Druck und Verlag von B. G. Teubner. 1914. 566 s. Форхгеймер Ф. Гидравлика. М.; Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1935.
90. A Comprehensive Ductile Iron Pipeline System / Pont-A-Mousson, Imprime en France, 12, 1988. – 570 p.

91. Hydraulics Manual. Washington State Department of Transportation. M 23-03 January 1997.
92. Lenau, C. W. Flow through spillway flip bucket // C. W. Lenau, J. J. Cassidy // Journal for hydraulics division. – 1969. – Vol. 95, № 2. – P. 633 – 648.
93. Sinniger, R. O. Constructions hydrauliques / R. O. Sinniger, W.H. Hager// Ecoulements stationnaires. –Lausanne: Presses polytechniques romandes. – 1988. – 437 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А


ЭКОГИДРОПРОЕКТ®

ИНЖЕОТЕХ

ПРОЕКТСТРОЙСТАНДАРТ


111396, г. Москва, Свободный проспект, д. 20,
подъезд 1, этаж 10, офис 10/1
Тел./факс: +7 (495) 648-85-94

www.ecohydroproject.ru / www.ecohp.ru / info@ecohp.ru

ИНН 7715883290 КПП 773301001 р/с 40702810738000047552 в ОАО «Сбербанк России» г. Москва

от 19.09.2023 г. № Исх.132/2023

на № _____ от _____

СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ В ПРОИЗВОДСТВО РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Насосные станции (НС) для снабжения водой гидромелиоративных систем являются самыми крупными насосными системами, напоры которых могут превосходить сто метров, расходы могут достигать более 50 м³/с, а объемы перекачиваемой воды достигать десятков миллионов кубических метров в год. Для обеспечения этих насосных станций электричеством требуется большое количество энергии. Стоимость электроэнергии очень высокая, в связи с чем, при проектировании мелиоративных насосных станций, особое внимание необходимо уделять вопросу снижения потребления электроэнергии системы водоподачи, которое может быть обеспечено уменьшением гидравлических потерь на всех конструктивных элементах водоподачи. Одним из значимых источников гидравлических потерь, влияющих на потребление электроэнергии, являются водовыпускные сооружения.

В диссертационной работе Хаек Бушра рассматривалась проблема повышения надежности работы насосных станций и разработана конструкция водовыпуска телескопического типа, обеспечивающего минимальные капиталовложения и затраты электроэнергии.

Предлагаемые результаты исследований, оформленные в виде рекомендаций, показали, что возможно использовать предлагаемую конструкцию водовыпуска при любом колебании уровня воды в канале. Предварительный анализ теоретических и экспериментальных исследований показал, что предлагаемое водовыпускное сооружение телескопического типа работает при минимальных гидравлических потерях в сравнении с существующими аналогичными сооружениями, что даёт существенный экономический эффект за счет снижения энергопотребления.

Генеральный директор
ООО «ЭКОГИДРОПРОЕКТ» _____

/Шагапов А.Т./

