

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО,
ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 626.823.9

doi: 10.31774/2712-9357-2023-13-3-296-313

**Гидравлический расчет регулирующего сооружения,
расположенного в ильменной части Прикаспийской низменности**

**Татьяна Дмитриевна Картузова¹, Наталья Алексеевна Шелестова²,
Александр Александрович Ткачев³, Дмитрий Федорович Третьяков⁴**

^{1, 2, 3, 4}Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск, Российская Федерация

¹tkartuzowa@list.ru

²na.shele@yandex.ru

³prof_al@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8060-620X>

⁴tretyakov.dmitriy@yandex.ru

Аннотация. Цель: на примере выполнения одной из задач по разработке сооружения для регулирования водного режима ильменной части дельты Волги решить проблему сохранения и воспроизводства рыбных запасов ценных промысловых видов рыб в естественных водоемах. С использованием общеизвестных формул гидравлики, научных разработок ученых в области гидротехники и априорной информации необходимо установить основные параметры регулирующего сооружения, расположенного на водоеме рыбохозяйственного назначения в Астраханской области. **Материалы и методы:** осуществлен поэтапный гидравлический расчет трубчатого регулирующего сооружения, выполняющего функции водовыпуска: определена пропускная способность сооружения при эксплуатации в напорном режиме; фильтрационным расчетом установлены основные нагрузки, действующие на подземный контур сооружения; выполнен прочностной расчет флютбета на сдвиг. **Результаты.** Разработано сооружение для регулирования водного режима ильменной части дельты Волги, ильменей, которые являются местами естественных нерестилищ промысловых рыб Астраханского региона. В задачу гидротехнического расчета входит выяснение условий продвижения фильтрационного потока под сооружением с определением давления в характерных точках и установление минимальных размеров флютбета, устойчиво воспринимающих создаваемые этим потоком нагрузки. **Выводы.** Расчетом установлены основные размеры флютбета (длина, ширина сооружения – 46,0; 4,65 м; длина, толщина понура – 4,54; 0,3 м; длина, толщина водобоя – 4,8; 0,9 м; глубина, ширина зубьев водобоя – 1,19; 0,40 м; длина, толщина рисбермы – 20,36; 0,6 м; длина трубчатой части регулятора – 16,3 м) с учетом размещения затворов, служебных и проезжих мостов. Установлена устойчивость на сдвиг флютбета и сооружения в целом.

Ключевые слова: дельта Волги, ихтиофауна, регулятор-водовыпуск, флютбет, понур, водобой, фильтрация, взвешивающее давление, устойчивость на сдвиг

Для цитирования: Гидравлический расчет регулирующего сооружения, расположенного в ильменной части Прикаспийской низменности / Т. Д. Картузова, Н. А. Шелестова, А. А. Ткачев, Д. Ф. Третьяков // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 3. С. 296–313. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-296-313>.

HYDRAULIC ENGINEERING,
HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

Original article

**Hydraulic design of the control structure,
located in the ilmen area of the Caspian lowland**

**Tatyana D. Kartuzova¹, Natalya A. Shelestova², Alexander A. Tkachev³,
Dmitry F. Tretyakov⁴**

^{1, 2, 3, 4}Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, Russian Federation

¹tkartuzowa@list.ru

²na.shele@yandex.ru

³prof_al@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8060-620X>

⁴tretyakov.dmitriy@yandex.ru

Abstract. Purpose: to solve the problem of conservation and reproduction of fish stocks of valuable commercial fish species in natural reservoirs, on the example of performing one of the tasks of developing a facility for regulating water regime of the ilmen part of the Volga delta. Using the well-known formulas of hydraulics, scientific developments of scientists in the field of hydraulic engineering and a priori information, it is necessary to determine the main parameters of a control structure located on a fishery reservoir in Astrakhan region.

Materials and methods: a stage-by-stage hydraulic calculation of a tubular control structure that performs the functions of a water outlet was performed: the carrying capacity of the facility during operation in a pressure mode was determined; the main loads influencing the structure underground contour were determined by filtration calculation; a strength calculation of the floor for shear was performed. **Results.** A facility to regulate the water regime of the ilmen area of the Volga delta, ilmen, which are places of natural spawning grounds for commercial fish in Astrakhan region has been developed. The task of hydraulic calculation is to determine the conditions for the advancement of the filtration flow under the structure determining the pressure at characteristic points and to define the minimum dimensions of the floor that perceive stably the loads created by this flow. **Conclusions.** The calculation determined the main dimensions of the floor (length, width of the structure – 46.0; 4.65 m; length, thickness of the apron – 4.54; 0.3 m; length, thickness of the water apron – 4.8; 0.9 m; depth, water apron teeth width – 1.19; 0.40 m; length, thickness of the rear apron – 20.36; 0.6 m; length of the tubular part of the regulator – 16.3 m) taking into account the placement of gates, service and road bridges. The shear stability of the floor and the structure as a whole was determined.

Keywords: the Volga delta, ichthyofauna, regulator-water outlet, floor, apron, water apron, filtration, uplift pressure, shear stability

For citation: Kartuzova T. D., Shelestova N. A., Tkachev A. A., Tretyakov D. F. Hydraulic design of the control structure, located in the ilmen area of the Caspian lowland. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023;13(3):296–313. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-296-313>.

Введение. В настоящее время перед региональными властями, водохозяйственными, проектными и строительными организациями остро стоит проблема восстановления биоценоза подстепных ильменей дельты Волги. Они расположены в западной части р. Бахтемир. Система пресных и

солончатых озер находится на территории Лиманского, Наримановского и Икрянинского районов Астраханской области.

Гидрологический режим подstepных ильменей зависит от стока р. Волги. В период половодья они подтапливаются через протоки и ерики. В межень и на спаде половодья направление течений изменяется, происходит отток воды в рукав Бахтемир. В результате наиболее удаленные от рукава водоемы отшнуровываются и пересыхают. Антропогенное воздействие на окружающую среду оказывают здесь техногенные факторы: строительство дамб, автомобильных и железных дорог и т. д.

Снижение поступления воды вследствие заиления, зарастания и осолонения водотоков привело к негативным последствиям, в частности, потере естественных нерестилищ, изменению биоценоза, ихтиофауны (исчезновению частиковых видов рыб), что также затрудняет многоцелевое использование ильменей [1–5].

Для сохранения этих уникальных угодий программой регионального проекта «Оздоровление Волги» предложено строительство на ильменях шлюзов-регуляторов. В настоящее время обеспечение водности ильменей является первоочередной задачей, и ее решение может быть осуществлено регулирующими сооружениями.

Объект предполагаемого строительства размещен южнее села Янго-Аскер, в южной части Наримановского района между ильменем Большой Бугас и ильменем Япрык, в пределах западной ильменно-бугровой равнины, являющейся частью Прикаспийской низменности, на берегу безымянного ерика к востоку от ильменя Парпост (рисунок 1).

Класс проектируемого гидротехнического сооружения определен в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации¹.

¹Об утверждении критериев классификации гидротехнических сооружений [Электронный ресурс]: Постановление Правительства Рос. Федерации от 5 окт. 2020 г. № 1607. URL: https:64.mchs.gov.ru/uploads/resource/2022-05-17/3-1-3-postanovleniya-pravitelstva-rossiyskoy-federacii_16527697791268534982.pdf (дата обращения: 08.05.2023).

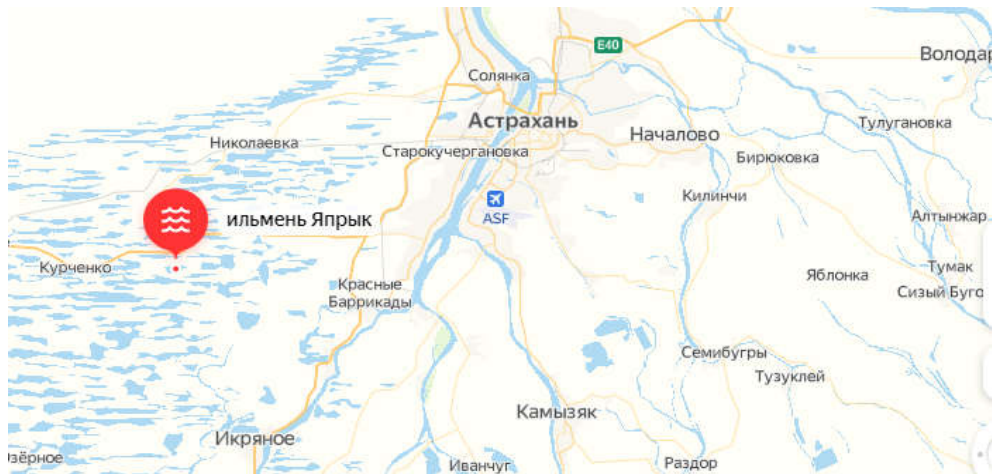


Рисунок 1 – Обзорная схема расположения объекта («Яндекс-карта»)
Figure 1 – Overview layout of the object (“Yandex-map”)

В соответствии с п. 1, если учитывать критерий классификации гидротехнических сооружений № 1 «Классы гидротехнических сооружений в зависимости от их высоты и типа грунта оснований», для сооружения (дамбы), предназначенного для использования водных ресурсов, при грунтах основания песчаных и глинистых в твердом или полутвердом состоянии (тип Б), при высоте гидротехнического сооружения 5,8 м (менее 15,0 м) класс гидротехнического сооружения составляет IV при высоте напорной части 4,54 м.

В соответствии с п. 2, если рассматривать критерий № 1 для других сооружений, участвующих в создании напорного фронта, при грунтах основания песчаных и глинистых в твердом или полутвердом состоянии (тип Б), при высоте гидротехнического сооружения 5,8 м (менее 10,0 м) класс гидротехнического сооружения составляет IV при высоте напорной части 4,54 м.

В соответствии с п. 1, если рассматривать критерий № 2 для гидротехнических сооружений мелиоративных гидроузлов, при объеме водохранилища (водный объект – ильмень Япрык) менее 50 млн м³ класс гидротехнического сооружения составляет IV. Уровень ответственности объекта по нагрузкам и воздействиям II – нормальный (в соответствии с п. 8.26²).

²Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003: СП 58.13330.2012: утв. Минрегионом России 29.12.11: введ. в действие с 01.01.13. М., 2012. 39 с.

Территория строительства сейсмически неактивна³. Фоновая сейсмическая интенсивность в баллах шкалы MSK-64 для средних грунтовых условий и трех степеней сейсмической опасности (А (10 %), В (5 %), С (1 %)) в течение 50 лет для населенного пункта Икрыное по картам ОСР-2016 А, В не регламентируется, поскольку составляет менее 5 баллов, по карте С равна 6 баллам.

В связи с этим цель настоящей работы состоит в том, чтобы на примере выполнения одной из задач по разработке сооружения для регулирования водного режима ильменной части дельты Волги решить проблему сохранения и воспроизводства рыбных запасов ценных промысловых видов рыб в естественных водоемах. С использованием общеизвестных формул гидравлики, научных разработок ученых в области гидротехники и априорной информации необходимо установить основные параметры регулирующего сооружения, расположенного на водоеме рыбохозяйственного назначения в Астраханской области.

В научной работе по нормативным источникам назначаются:

- размеры грунтовой разделительной дамбы, в теле которой расположен регулятор-водовыпуск;
- с использованием топографических, гидрологических, геологических данных по общеизвестным формулам гидротехники назначаются параметры днища сооружения и основных его частей;
- при заданных размерах основной части регулятора определяются пропускная способность трубы, размеры флютбета, его статическая устойчивость.

Материалы и методы. Водопропускное сооружение располагается в теле грунтовой разделительной дамбы, расположенной на водотоке между ильменем Большой Бугаз и ильменем Япрык.

³Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81 [Электронный ресурс]: СП 14.13330.2018: утв. М-вом стр-ва и жилищ.-комму. хоз-ва РФ 24.05.18: введ. в действие через 6 мес. со дня изд. URL: <https://base.garant.ru/71985096/> (дата обращения: 08.05.2023).

Тело грунтовой дамбы шлюза-регулятора выполнено из местного грунта⁴. Заложения откосов грунтовой дамбы из условия устойчивости составляют 1:2. Защита откосов дамбы и откосов выемки в границах входной плиты, водобойной плиты и рисбермы выполняется матрацами Рено толщиной 0,17 м. По верху дамбы организован проезд шириной 4,5 м. Покрытие проезда предусмотрено из щебня фракции 40–70 мм по ГОСТ 8267-93. Толщина покрытия 300 мм. Принято в соответствии с типовой серией 3.503-71/88 для дорог с низшим покрытием V технической категории по песчаной насыпи⁵.

Отметка верха дамбы минус 21,80 м БС, что выше расчетного уровня высоких вод (УВВ) 5% обеспеченности. Расчетная высота наката ветровой волны составляет не более 0,59 м. Отметка проектного дна подводящего и отводящего водотока принята минус 27,40 м БС, что составляет 1,5 м от уровня низких вод (УНВ) 95% обеспеченности.

Шлюз-регулятор представляет собой трубчатое двухочковое водопропускное сооружение из монолитных железобетонных труб с внутренним сечением $1,25 \times 1,5$ м, оборудованное плоскими затворами с ручным винтовым подъемником для подачи воды из подводящего канала ильменя Большой Бугас в ильмень Япрык. Шлюз-регулятор, регулирующий подачу воды в ильмень, рассчитан и запроектирован на максимальный расход $21,75 \text{ м}^3/\text{с}$ при скорости прохода воды в трубе до 5,8 м/с для монолитных железобетонных труб.

В зависимости от фактического уровня в верхнем бьефе регулирующего сооружения расход воды через одно очко сооружения равен $0,89\text{--}10,88 \text{ м}^3/\text{с}$ и через два очка – $1,77\text{--}21,75 \text{ м}^3/\text{с}$.

⁴Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87: СП 45.13330.2017: утв. М-вом стр-ва и жилищ.-коммун. хоз-ва Рос. Федерации 27.02.17: введ. в действие с 28.08.17. М., 2017. 171 с.

⁵Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85*: СП 34.13330.2021: утв. Минстроем России 09.02.21: введ. в действие с 01.07.13. М., 2012. 106 с.

Уровни воды, при которых сооружение будет работать в расчетном режиме, определяются по результатам инженерных гидрометеорологических изысканий.

Сооружение состоит:

- из монолитного железобетонного входного оголовка, общего для двух ниток водопроводящей части;
- водопроводящей части, состоящей из двух ниток монолитных железобетонных труб;
- монолитного железобетонного выходного оголовка, общего для двух ниток водопроводящей части, оборудованных затворами;
- рисбермы – железобетонной плиты, монолитной, с гасителями;
- сопрягающих частей на входе в сооружение и выходе.

Входной оголовок – монолитный железобетонный оголовок с ныряющими стенками, запроектирован из бетона В22.5, F150, W6, который оборудуется сороудерживающей съемной (приставной) металлической решеткой. Толщина стенок монолитного железобетонного оголовка равна 300 мм. Армирование стенок и днища оголовка принято из арматурных сварных сеток по ГОСТ 23279-2012 класса 500 с диаметром 16 мм, шаг арматурных стержней в сетке 200 мм. Оголовок устанавливается на щебеночную подготовку из щебня марки М800, фракции 20–40 мм, толщиной 150 мм.

Водопроводящая часть сооружения состоит из монолитных железобетонных труб размером $1,25 (b) \times 1,5 (h)$ м (внутренние габариты трубы в свету (b – ширина, h – высота трубы, м)) в две нитки, длина каждой нитки – 16,3 м.

Монолитные железобетонные трубы предусмотрены из бетона. Толщина стенок, днища и перекрытия монолитных железобетонных труб принята 300 мм.

Выходная часть – монолитный железобетонный оголовок с ныряющими стенками, запроектирован из бетона В22.5, F150, W6. Со стороны напорной части сооружения (выходной оголовок) оборудуется двумя затворами плоскими глубинными марки ГП 1250 × 1500 мм по типовой серии 3.901-12, с глубиной погружения до 6 м, с подъемником одновинтовым с ручным приводом грузоподъемностью 5 т.

Для обслуживания сооружения и обеспечения маневрирования затворов по верху сооружения предусмотрена площадка их обслуживания, перекрываемая листовой просечной сталью. По контуру площадки предусмотрено леерное ограждение высотой 1,1 м. С дамбы на площадку обслуживания затворов предусматривается металлический служебный мостик.

Результаты и обсуждение. *Определение пропускной способности трубчатого регулятора с оголовком по типу ныряющих стенок*

Исходные данные. Продольный разрез с уровнями верхнего и нижнего бьефов (рисунок 2). Отметка уровня воды в верхнем бьефе $Z_{\max} = -22,86$ м принимается в соответствии с нормативными документами⁶, уровень 5% обеспеченности УВВ для 4-го класса гидротехнических сооружений. Отметка уровня низких вод (УНВ) $Z_{\min} = -25,88$ м принимается 95% обеспеченности. Действующий напор $\Delta Z = -22,86 - (-25,88) = 3,02$ м.

Труба монолитная железобетонная. Габариты трубы по внутреннему обмеру (в свету) $1,25 \times 1,5$ м.

Площадь живого сечения трубы ω , м², равна:

$$\omega = b \times h = 1,25 \cdot 1,5 = 1,875 \text{ м}^2.$$

⁶Гидротехнические сооружения. Основные положения. СНиП 33-01-2003: СП 58.13330.2019: утв. Минстроем России 16.12.19: введ. в действие с 17.06.20. М.: Стандартинформ, 2020. 34 с.

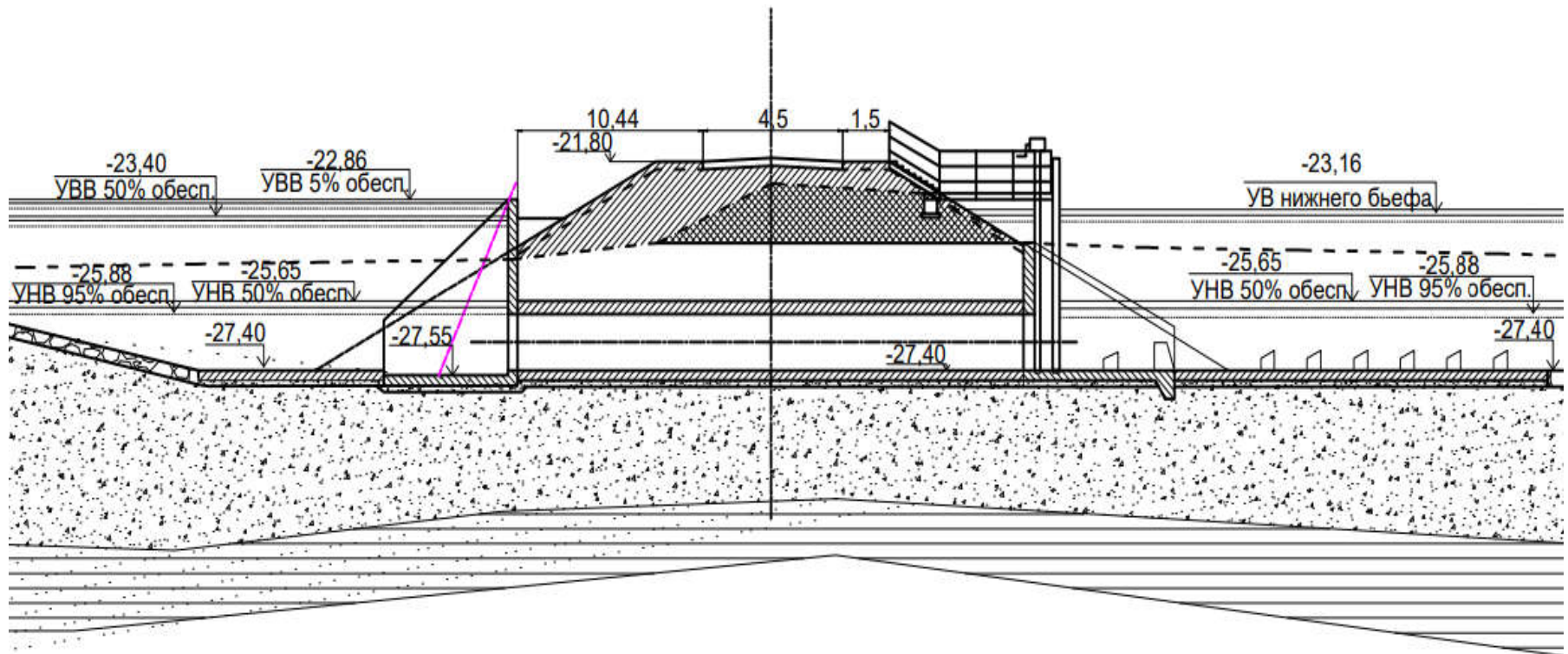


Рисунок 2 – Разрез по регулятору-водовыпуску
Figure 2 – Section along the regulator-water outlet

Расход сооружения Q , м³/с, определяется по формуле:

$$Q = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta Z},$$

где коэффициент расхода $\mu = 1 / \sqrt{\xi_{\text{вх}} \cdot \xi_{\text{тр.}} \cdot \xi_{\text{вых}}} = 1 / \sqrt{0,5 \cdot 0,26 \cdot 1,0} = 0,754$;

$\xi_{\text{вх}} = 0,5$ – коэффициент сопротивления на входе при острых кромках оголовка;

$\xi_{\text{тр.}} = 0,26$ – коэффициент сопротивления на трение по длине трубы водовыпуска:

$$\xi_{\text{тр.}} = L_{\text{тр.}} \cdot \lambda / d = 16,3 \cdot 0,025 / 1,543 = 0,26,$$

где $L_{\text{тр.}} = 16,3$ – длина трубчатой части сооружения, м;

$\lambda = 0,025$ – коэффициент гидравлического сопротивления при турбулентном течении;

$d = 1,543$ – осредненный (в свету) размер железобетонной трубы, м;

$\xi_{\text{вых}} = 1,0$ – коэффициент сопротивления на выходе при острых кромках оголовка;

$g = 9,81$ – ускорение свободного падения, м/с².

Расход через одну нитку равен:

$$Q = 0,754 \cdot 1,875 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 3,02} = 10,88 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Расход через две нитки равен: $Q = 10,88 \cdot 2 = 21,76 \text{ м}^3/\text{с}$.

Расчет флютбета по методу линейно-контурной фильтрации (ЛКФ) [6–8]. Согласно этому способу, наиболее опасной следует считать фильтрацию по контакту между водонепроницаемой частью флютбета и основанием, т. е. по линии подземного контура флютбета, длина которого от точки 0 до точки 6 используется в расчете (рисунок 3).

Достоверность принятой длины подземного контура по способу ЛКФ определяется по эмпирической зависимости:

$$L_{\text{факт.}} \geq L_{\text{доп.}} = C \cdot H,$$

где $L_{\text{факт.}} = 39,5$ – развернутая длина подземного контура флютбета, м;

$L_{\text{доп.}} = 27,24$ – критическая длина подземного контура флютбета, м;

C – уклонный коэффициент, определяемый в зависимости от рода грунта в основании, принят равным 6,0 (грунт – мелкий песок) [8];

$H = -22,86 - (-27,40) = 4,54$ – действующий напор при отсутствии воды в нижнем бьефе, м.

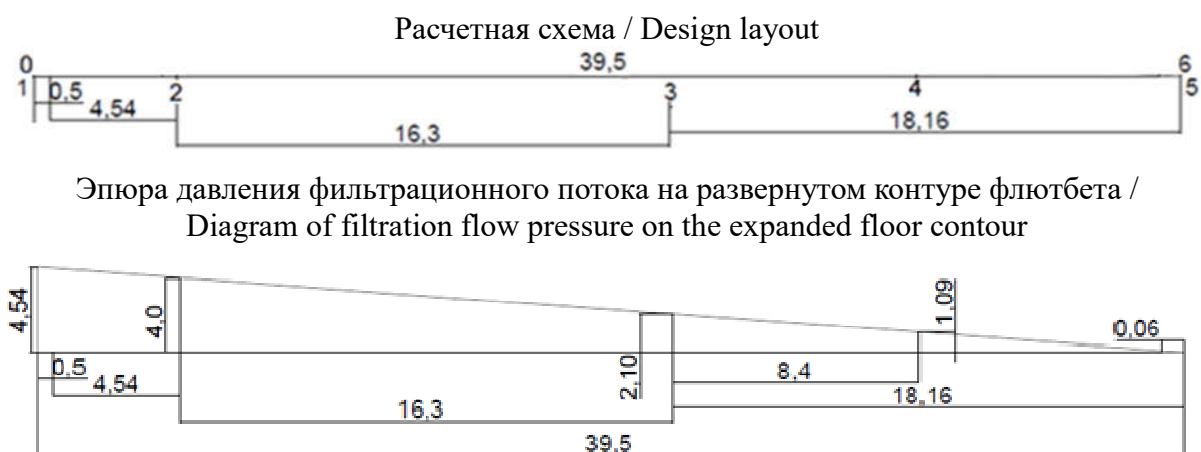


Рисунок 3 – Расчет флютбета
Figure 3 – Floor design

Тогда имеем $L_{\text{факт.}} = 39,5 \text{ м} \geq L_{\text{доп.}} = 6,0 \cdot 4,54 = 27,24 \text{ м}$.

Фильтрационный расчет в большей части является проверочным, так как размеры сооружения, кроме того, должны удовлетворять гидравлическим условиям пропуска потока, эксплуатационным условиям и конструктивным соображениям [9]. Поэтому в фильтрационном расчете необходимо лишь выполнение условия $L_{\text{факт.}} \geq L_{\text{доп.}}$.

Для предварительных расчетов конструктивно назначается осредненная толщина всех частей флютбета $t_{\text{ср}} = 0,5 \text{ м}$.

Исходя из анализа исходных данных, с учетом нормативных требований назначается длина понура ($L_{\text{понура}}$, м), водобоя ($L_{\text{водобоя}}$, м) и рисбермы ($L_{\text{рисбермы}}$, м):

$$L_{\text{понура}} = 1,0H_1 = 1,0 \cdot 4,54 = 4,54 \text{ м},$$

$$L_{\text{водобоя}} = 4,0H_1 = 4,0 \cdot 4,54 = 18,16 \text{ м},$$

$$L_{\text{рисбермы}} = 4,0H_2 = 4,0 \cdot 1,75 = 7,0 \text{ м},$$

где H_1, H_2 – глубина воды в верхнем и нижнем бьефах, м.

В методе ЛКФ предполагается, что падение напора от H до 0 происходит по всей длине равномерно, и величины напоров в характерных точках длины подземного контура флютбета определяются построением линии пьезометрических напоров грунтовых вод (см. рисунок 3) [8]:

$$h_x = H \cdot L_x / L_{\text{факт}},$$

где h_x – напор фильтрационного потока в рассматриваемой точке, м;

L_x – расстояние от конца флютбета до рассматриваемой точки, м.

Проверяется толщина водобойной части флютбета в заданной точке по формуле:

$$t_x = n \cdot h_x \cdot \gamma / (\gamma_{\text{бет.}} - \gamma),$$

где n – коэффициент запаса, принимается в зависимости от класса сооружения (0,85–1,2), принимаем $n = 0,85$ [8, 10];

γ – объемная масса воды, $\gamma = 1,0 \text{ т/м}^3$;

$\gamma_{\text{бет.}}$ – объемная масса материала флютбета, $\gamma_{\text{бет.}} = 2,5 \text{ т/м}^3$.

Расчет толщины водобойной плиты, понура

Расчет для установления параметров фильтрационного потока приведен в таблице 1. Определяется h_x , и в масштабе строится эпюра фильтрационного давления на развернутом контуре подземной части флютбета.

Результаты вычислений сводятся в таблицу 1.

На участке 1–4 пригружающее усилие воды верхнего бьефа больше выпирающего усилия со стороны фильтрационного потока, поэтому толщина понура на этом участке принимается конструктивно с учетом условий работы этой части флютбета. На других участках уточняется толщина флютбета с учетом выполненного расчета.

Таблица 1 – Параметры фильтрационного потока

Table 1 – Filtration flow parameters

Точка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
L_x	40,1	35,56	35,41	19,11	18,66	18,26	17,96	14,65	14,24	13,86	13,27	0,5	0
h_x	4,51	4,0	3,98	2,14	2,1	2,05	2,02	1,65	1,6	1,56	1,48	0,06	0
t_x					1,19	1,14	1,13	0,92	0,89	0,87	0,71	0,03	0,0

Среднее давление потока и толщина флютбета равны:

$$h_x = (h_5 + h_{5+8,4}) / 2 = (2,1 + 1,09) / 2 = 1,6 \text{ м,}$$

где $h_5, h_{5+8,4}$ – напор фильтрационного потока в характерной точке 5 водобоя и приблизительно в серединной части флютбета – точке 5 + 8,4 м.

$$t_x = 0,85 \cdot (1,6 \cdot 1,0 / (2,5 - 1,0)) = 0,9 \text{ м.}$$

Принимаем конструктивно толщину плиты 0,9 м.

В конце водобоя устраивается низовой зуб для снижения выходных градиентов фильтрации и, следовательно, для устранения возможности развития суффозии или контактного выпора [8].

Глубина зуба S_b , м, определяется по формуле:

$$S_b = (0,02-0,05) \cdot B,$$

где B – длина флютбета, м.

$$S_b = 0,03 \cdot 39,5 = 1,19 \text{ м.}$$

Следовательно, исходя из расчета, толщина водобоя принимается равной 0,9 м, понура и рисбермы – 0,3; 0,6 м. Уточненные размеры флютбета приведены на рисунке 4.

Расчет устойчивости флютбета. При расчете флютбета на устойчивость учитываются силы, которые действуют на гидротехническое сооружение, связанные с условиями работы⁷ [8]:

W_1 – сила гидростатического давления воды верхнего бьефа, т/м;

⁷Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*: СП 20.13330.2016: утв. М-вом стр-ва и жилищ.-комму. хоз-ва Рос. Федерации 03.12.16: введ. в действие с 04.06.17. М.: Стандартинформ, 2018. 91 с.

W_2 – сила гидростатического давления воды нижнего бьефа, т/м;

P_1 – вес воды со стороны верхнего бьефа, т/м;

P_2 – вес воды со стороны нижнего бьефа, т/м;

G_B – собственный вес водобоя, т/м;

W_ϕ – сила фильтрационного давления, действующая на водобой, т/м;

$W_{взв.}$ – сила взвешивающего давления на водобой, т/м.

Графически фильтрационное и взвешивающее давление изображается в виде эпюр, построенных по линии развернутого подземного контура (см. рисунок 4). Ординаты эпюр фильтрационного давления определяются расчетом, а ординаты эпюры взвешивающего давления – глубиной погружения рассматриваемой точки под уровень воды нижнего бьефа. По эпюрам можно определить силу фильтрационного и взвешивающего давлений.

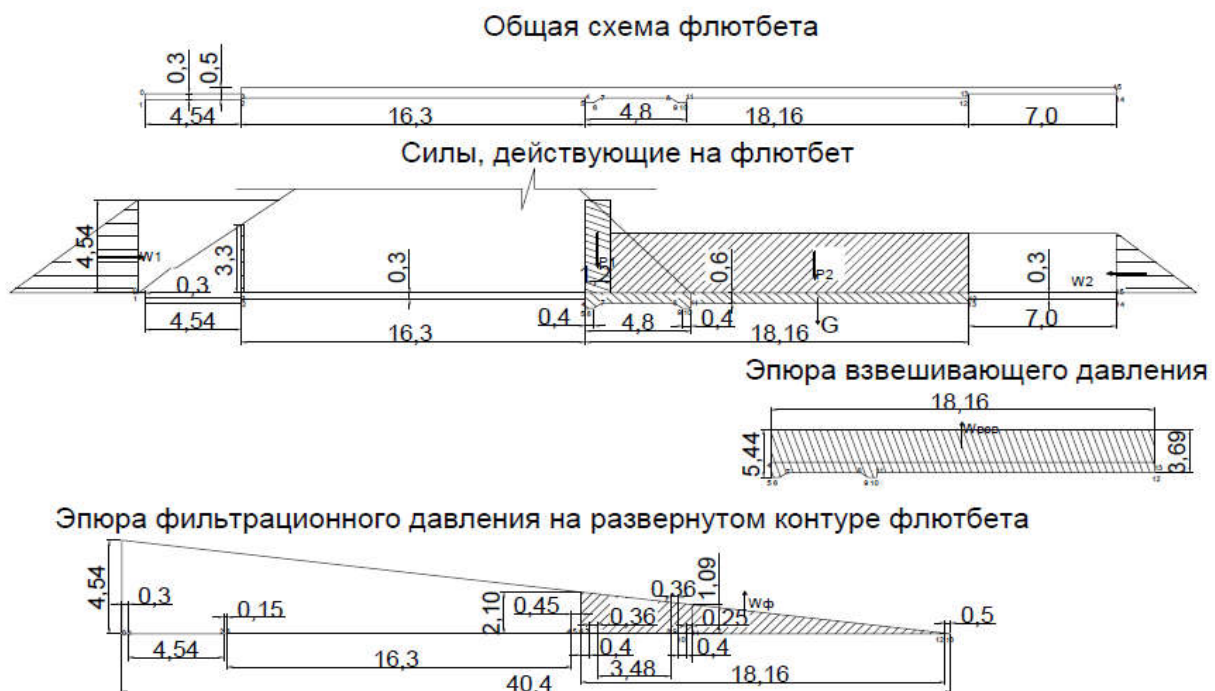


Рисунок 4 – К прочностному расчету флютбета

Figure 4 – To the strength calculation of the floor

Они равны площади эпюры на рассматриваемом участке, умноженной на удельный вес воды [8].

Определяются нагрузки, действующие на водобой:

$$- W_1 = \gamma \cdot H_1^2 / 2 = 1,0 \cdot 4,54^2 / 2 = 10,3 \text{ т/м};$$

$$- W_2 = \gamma \cdot b \cdot H_2^2 / 2 = 1,0 \cdot 1,75^2 / 2 = 1,53 \text{ т/м};$$

$$- P_1 = \gamma \cdot H_1 \cdot \omega_{P1} = 1,0 \cdot 4,54 \cdot 1,2 = 5,45 \text{ т/м};$$

$$- P_2 = \gamma \cdot H_2 \cdot \omega_{P2} = 1,0 \cdot 1,75 \cdot 18,16 = 31,78 \text{ т/м};$$

$$- G_B = \gamma_{\text{бет.}} \cdot F = 2,5 \cdot (0,9 \cdot 4,8 + 0,29 \cdot 0,4 \cdot 2 + 0,6 \cdot 13,36 + 0,3 \cdot 16,3 + 0,3 \cdot 4,54) = 47,06 \text{ т/м};$$

$$- W_{\phi} = (h_5 + h_{12}) / 2 \cdot L_{5-12} \cdot \gamma = (2,1 + 0,06) / 2 \cdot 18,16 \cdot 1,0 = 19,6 \text{ т/м};$$

$$- W_{\text{взв.}} = \omega_{\text{взв.}} \cdot \gamma = (18,16 \cdot 1,75 + 0,29 \cdot 0,4 \cdot 2) \cdot 1,0 = 32,0 \text{ т/м},$$

где ω_{P1} – площадь эпюры давления воды в верхнем бьефе, м²;

ω_{P2} – площадь эпюры давления воды в нижнем бьефе, м²;

$\gamma_{\text{бет}}$ – объемный вес материала сооружения, т/м³;

F – площадь водобоя, м²;

h_5, h_{12} – фильтрационное давление в точках 5 и 12 подземного контура флюэтбета, м;

L_{5-12} – расстояние между этими точками, м;

$\omega_{\text{взв}}$ – площадь эпюры взвешивающего давления воды, определяется по схеме (см. рисунок 4), м².

После определения всех сил, действующих на водобой, определяется коэффициент устойчивости на сдвиг [8] по формуле:

$$K_{\text{сдв.}} = (\Sigma P \cdot f + C \cdot F) / \Sigma W ,$$

где ΣP – сумма вертикальных сил, действующих на водобой, т/м;

f – коэффициент трения бетона по грунту, т/м²;

C – коэффициент сцепления грунта, т/м²;

F – площадь подошвы сооружения (водобоя), м²;

ΣW – сумма сдвигающих (горизонтальных) сил, т/м.

Коэффициент трения для песчаных грунтов составляет 0,40–0,50 т/м².

Значение удельного коэффициента сцепления для песчаных грунтов равно 0–0,5 т/м².

$$\Sigma P = (P_1 + P_2 + G) - (W_{\text{ф.}} + W_{\text{взв.}}) = (5,45 + 31,78 + 47,06) - (19,6 + 32,0) = 32,69 \text{ т/м,}$$

$$\Sigma W = W_1 + W_2 = 10,3 + (-1,53) = 8,77 \text{ т/м,}$$

$$K_{\text{сдв.}} = (\Sigma P \cdot f + C \cdot F) / \Sigma W = (32,69 \cdot 0,45 + 0,25 \cdot 18,8) / 8,77 = 2,21.$$

Коэффициент $K_{\text{сдв.}}$ сравнивается с допустимым, который зависит от класса сооружения, при этом должно выполняться условие:

$$K_{\text{сдв.}} \geq K_{\text{доп.}}$$

Допустимый коэффициент на сдвиг для сооружений IV класса составляет 1,05–1,1.

$$K_{\text{сдв.}} = 2,21 \geq K_{\text{доп.}} = 1,1.$$

Условие выполняется, следовательно, запроектированный водобой и другие элементы флютбета будут устойчивы на сдвиг [8].

Выводы. Разработано сооружение для регулирования водного режима ильменной части дельты Волги, которая является местами естественных нерестилищ ценных промысловых видов рыб Астраханского региона. Гидротехническим расчетом были оптимизированы параметры подземного контура сооружения с учетом взаимодействия их с фильтрационным потоком. Установлены основные размеры флютбета (длина, ширина сооружения $L_c = 46,0$ м, $B_c = 4,65$ м; длина, толщина понура $l_{\text{п}} = 4,54$ м, $t_{\text{п}} = 0,3$ м; длина, толщина водобоя $l_{\text{вод.}} = 4,8$ м, $t_{\text{вод.}} = 0,9$ м; глубина, ширина зубьев водобоя $t_z = 1,19$ м, $b_z = 0,40$ м; длина, толщина рисбермы $l_{\text{рис.}} = 20,36$ м, $t_{\text{рис.}} = 0,6$ м; длина трубчатой части флютбета $l_{\text{тр.}} = 16,3$ м) с учетом размещения на рисберме элементов искусственной шероховатости и гидросилового оборудования на водобое. Установлена устойчивость на сдвиг флютбета и сооружения в целом ($K_{\text{сдв.}} = 2,21 \geq K_{\text{доп.}} = 1,1$).

Список источников

1. Быстрова И. В., Смирнова Т. С., Вайчулис Г. В. Экологические проблемы западной ильменно-бугровой равнины Астраханской области // Астраханский вестник экологического образования. 2023. № 3. С. 152–158.
2. Бреховских В. Ф., Волкова З. В., Лабунская Е. Н. Экологические проблемы западных подстепных ильменей дельты р. Волги // Аридные экосистемы. 2010. Т. 17, № 3(43). С. 34–48.
3. Карабаева А. З., Быстрова И. В., Смирнова Т. С. Современные геоэкологические проблемы западных подстепных ильменей Астраханской области // Астраханский вестник экологического образования. 2012. № 3(21). С. 132–136.
4. Картузова Т. Д., Шелестова Н. А. Рыбохозяйственная гидротехника: учеб. пособие / Новочеркас. инж.-мелиоратив. ин-т Донского ГАУ. Новочеркасск: Лик, 2023. 133 с.
5. Баев О. А., Шевченко А. В. Современное состояние и условия функционирования Усть-Маньчских рыбоходных каналов // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. 2023. Т. 13, № 2. С. 334–352. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1371> (дата обращения: 20.05.2023). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-2-334-352>.
6. Проектирование сооружений на мелиоративной сети: учеб. пособие / А. А. Ткачев [и др.]. Новочеркасск, 2022. 199 с.
7. Водоподпорные и водопропускные гидротехнические сооружения: учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1 / А. А. Ткачев, А. М. Анохин, В. А. Белов, Л. В. Персикова, Н. А. Шелестова; Новочеркас. инж.-мелиоратив. ин-т Донского ГАУ. Новочеркасск, 2023. 273 с.
8. Завгородняя И. В., Иванова И. В., Островский В. Т. Расчет флютбета гидротехнических сооружений: метод. указания для практ. занятий / ФГБОУ ВПО «Кубанский ГАУ». Краснодар, 2013. 36 с.
9. Косиченко Ю. М., Баев О. А. Гидротехническое строительство. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2022. 313 с.
10. Справочник по гидравлике: учеб. для вузов / В. А. Большаков, Ю. М. Константинов, В. Н. Попов, В. Ю. Даденков; под ред. В. А. Большакова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во журн. «Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион», 1984. 343 с.

References

1. Bystrova I.V., Smirnova T.S., Vaichulis G.V., 2023. *Ekologicheskie problemy zapadnoy il'menno-bugrovoy ravniny Astrakhanskoy oblasti* [The environmental problems the western ilmen-mound plain of Astrakhan region]. *Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya* [Astrakhan Bulletin for Environmental Education], no. 3, pp. 152-158. (In Russian).
2. Brekhovskikh V.F., Volkova Z.V., Labunskaya E.N., 2010. *Ekologicheskie problemy zapadnykh podstepnykh il'meney del'ty r. Volgi* [Ecological problems of western near-steppe lakes in the Volga river delta]. *Aridnye ekosistemy* [Arid Ecosystems], vol. 17, no. 3(43), pp. 34-48. (In Russian).
3. Karabaeva A.Z., Bystrova I.V., Smirnova T.S., 2012. *Sovremennyye geoekologicheskie problemy zapadnykh podstepnykh il'meney Astrakhanskoy oblasti* [Modern geoecological problems of western substeppe ilmens of Astrakhan region]. *Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya* [Astrakhan Bulletin for Environmental Education], no. 3(21), pp. 132-136. (In Russian).
4. Kartuzova T.D., Shelestova N.A., 2023. *Rybokhozyaystvennaya gidrotekhnika: uchebnoe posobie* [Fishery Hydraulic Engineering: textbook]. NovoCherkassk Engineering and Land Reclamation Institute of the Don State Agrarian University, NovoCherkassk, Lik Publ., 133 p. (In Russian).
5. Baev O.A., Shevchenko A.V., 2023. [Current state and operating conditions of the Ust-

Manych fish passage channels]. *Melioratsiya i gidrotekhnika*, vol. 13, no. 2, pp. 334–352, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1371> [accessed 20.05.2023], <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-2-334-352>. (In Russian).

6. Tkachev A.A. [et al.], 2022. *Proektirovanie sooruzheniy na meliorativnoy seti: uchebnoe posobie* [Design of Structures of Reclamation Network: textbook]. Novocherkassk, 199 p. (In Russian).

7. Tkachev A.A., Anokhin A.M., Belov V.A., Persikova L.V., Shelestova N.A., 2023. *Vodopodpornye i vodopropusknye gidrotekhnicheskie sooruzheniya: uchebnoe posobie* [Water-Retaining and Culvert Hydraulic Structures: textbook]. In 2 parts, pt. 1, Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, 273 p. (In Russian).

8. Zavgorodnyaya I.V., Ivanova I.V., Ostrovsky V.T., 2013. *Raschet flyutbeta gidrotekhnicheskikh sooruzheniy: metod. ukazaniya dlya prakt. zanyatiy* [Floor Calculation of Hydraulic Structures: method. instructions for practical lessons]. Kuban State Agrarian University, Krasnodar, 36 p. (In Russian).

9. Kosichenko Yu.M., Baev O.A., 2022. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic Engineering]. Novocherkassk, RosNIIPM, 313 p. (In Russian).

10. Bolshakov V.A., Konstantinov Yu.M., Popov V.N., Dadenkov V.Yu., 1984. *Spravochnik po gidravlike: uchebnik dlya vuzov* [Handbook of Hydraulics: textbook]. 2nd ed., rev. and add., Moscow, "Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region" Publ., 343 p. (In Russian).

Информация об авторах

Т. Д. Картузова – доцент кафедры водоснабжения и использования водных ресурсов, кандидат технических наук, доцент;

Н. А. Шелестова – профессор кафедры гидротехнического строительства, кандидат технических наук, профессор;

А. А. Ткачев – заведующий кафедрой гидротехнического строительства, доктор технических наук, доцент;

Д. Ф. Третьяков – магистрант.

Information about the authors

T. D. Kartuzova – Associate Professor of the Department of Water Supply and Use of Water Resources, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

N. A. Shelestova – Professor of the Department of Hydraulic Engineering, Candidate of Technical Sciences, Professor;

A. A. Tkachev – Head of the Department of Hydraulic Engineering, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor;

D. F. Tretyakov – Master's Student.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.06.2023; одобрена после рецензирования 08.08.2023; принята к публикации 15.08.2023.

The article was submitted 05.06.2023; approved after reviewing 08.08.2023; accepted for publication 15.08.2023.