

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.68.1>**НАДЕЖНОСТЬ ВАРИАТИВНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЕРИВАЦИОННОГО ТРУБОПРОВОДА ЧЕРЕЗ
ВОДНЫЕ ПРЕПЯТСТВИЯ С УЧЕТОМ ЛЕДОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Научная статья

Крылова К.К.^{1,*}, Шарапов Д.А.²²ORCID : 0000-0001-8650-2375;^{1,2} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (krilova.katerina.kkk[at]mail.ru)

Аннотация

В статье поставлен актуальный инженерный вопрос, связанный с выбором оптимального способа прокладки деривационного напорного трубопровода через водные преграды на примере проектируемой Толмачевской ГЭС-4. Трассировка магистральных трубопроводов, особенно в составе гидроэнергетических объектов, является критически важным этапом, напрямую влияющим на гидравлические показатели и экономическую эффективность проекта. В данном случае трасса трубопровода пересекает три водных препятствия (реку Толмачёва и два ручья), что требует поиска технически обоснованного и экономически целесообразного инженерного решения.

В исследовании проведен сравнительный анализ трех основных методов пересечения водных преград: устройство дюкера, строительство мостового перехода и прокладка трубопровода в защитном кожухе (футляре) непосредственно через русло. Для каждого варианта выполнена детальная оценка гидравлических потерь и капитальных затрат. Гидравлический расчет дюкера проводится с целью оценки снижения расчетного напора и, как следствие, к потере установленной мощности гидроэлектростанции, что существенно влияет на энергетическую отдачу объекта.

Ключевым критерием выбора стало сравнение удельных капиталовложений на 1 кВт установленной мощности. На основе комплексного технико-экономического обоснования для условий Толмачевской ГЭС-4 рекомендован к применению метод прокладки трубопровода в защитном кожухе. В заключении отмечается необходимость дальнейшего детального расчета нагрузок на трубопровод в периоды паводка для обеспечения долговременной надежности выбранного решения.

Ключевые слова: напорный трубопровод, деривация, дюкер, гидравлические потери, мостовой переход, трассирование, защитный кожух, водные преграды.

**RELIABILITY OF VARIABLE DESIGN OF HIGH LINE CONDUIT ACROSS WATER OBSTACLES, TAKING
INTO ACCOUNT ICE IMPACT**

Research article

Krylova K.K.^{1,*}, Sharapov D.A.²²ORCID : 0000-0001-8650-2375;^{1,2} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (krilova.katerina.kkk[at]mail.ru)

Abstract

The article raises a topical engineering issue related to the selection of the optimal method for laying a diversion pressure pipeline across water obstacles on the example of the designed Tolmachevsk HPP-4. The routing of main pipelines, especially as part of hydropower facilities, is a critically important stage that directly affects the hydraulic performance and economic efficiency of the project. In this case, the pipeline route crosses three water obstacles (the Tolmacheva River and two streams), which requires a technically sound and economically viable engineering solution.

The study conducted a comparative analysis of three main methods of crossing water obstacles: the construction of a culvert siphon, the construction of a bridge crossing, and the laying of a pipeline in a protective cover (case) directly across the riverbed. A detailed evaluation of hydraulic losses and capital costs was performed for each option. The hydraulic calculation of the culvert siphon is performed to assess the reduction in design head and, as a result, the loss of installed capacity of the hydroelectric power plant, which significantly affects the energy yield of the facility.

The key selection criterion was a comparison of specific capital investments per 1 kW of installed capacity. Based on a complex technical and economic feasibility study for the conditions at Tolmachevsk HPP-4, the method of laying the pipeline in a protective cover was recommended for use. The conclusion notes the need for further detailed calculation of loads on the pipeline during flood periods to ensure the long-term reliability of the selected solution.

Keywords: pressure pipeline, diversion, culvert siphon, hydraulic losses, bridge crossing, tracing, protective cover, water obstacles.

Введение

Трубопроводы являются предпочтительным средством доставки жидких, газообразных и многофазовых сред под действием разности давлений [1]. Их применение охватывает различные сферы — от нефтегазовой промышленности до теплоэнергетики и иных сфер промышленности.

Трубопроводы экономичны с точки зрения перекачки жидкостей и газов на большие расстояния. Трассирование трубопровода является важнейшим этапом при разработке дальнемагистральных проектов. Особенно актуален данный вопрос при проектировании деривационных гидроэлектростанций с напорными водоводами в качестве водопроводящего сооружения. В зависимости от исходных данных, включающих в себя топографические, геологические, гидрологические и другие сведения, стоимость деривации может варьироваться в достаточно широких диапазонах [2].

Главные требования к трассе трубопровода — наиболее прямой и короткий путь. Увеличение длины трубопровода и числа переломов приводит к дополнительным потерям напора.

Участки трубопровода могут прокладываться в туннелях, закрытых галереях или быть выполненными в виде стальной облицовки напорного туннеля, шахты, в виде засыпанного сталежелезобетонного трубопровода в зависимости от геологических и топографических условий, в том числе при прохождении падающих камней, селевых потоков, лавин и иных явлений в зоне прокладки трубопровода.

Прокладка трубопроводов не должна производиться в ложбинах, собирающих воду со склонов гор. Защита трубопровода от подмывающего действия фильтрационных и ливневых вод должна производиться путем установки защитных стенок и отводящих траншей. В местах пересечения трассы водовода с шоссейными или железнодорожными магистралями, реками, оврагами и другими препятствиями устраивают акведуки или дюкеры [3].

На данный момент проектируются основные сооружения Толмачёвской ГЭС-4 деривационного типа. При выборе трассы напорного трубопровода были рассмотрены разные варианты. В одном из вариантов трубопровод пересекает в трех местах водные препятствия (ручьи и реку).

Целью исследования является анализ существующих методов прокладки деривационного напорного трубопровода через водные преграды и выбор наиболее предпочтительного варианта для такого объекта, как Толмачёвская ГЭС-4.

Задачами исследования являются:

1. Определение возможных способов прохождения трубопровода через водные объекты.
2. Расчет гидравлических потерь при устройстве дюкеров на пути деривационного трубопровода.
3. Анализ варианта с использованием защитных кожухов, позволяющих проложить трубопровод без изломов оси трубопровода непосредственно через водную преграду.
4. Техничко-экономическое обоснование рассмотренных вариантов.
5. Выбор оптимального способа прокладки трубопровода Толмачёвской ГЭС-4.

Методы и принципы исследования

Проектируемый деривационный трубопровод — стальной; расход $34 \text{ м}^3/\text{с}$; диаметр стального трубопровода $3,7 \text{ м}$; длина водных препятствий различна и варьируется от 30 до 42 метров; глубина реки Толмачёва и ручьев от 0,9 до 1,8 метров; грунты в основании песчано-гравийные.

Первое, что рассматривается в качестве возможной конструкции, — дюкер для преграды длиной 35 метров, глубиной 1,5 метра. Дюкер — это напорный участок трубопровода с переломом оси, зависящим от преодолеваемой преграды, состоящий минимум из двух ниток, в котором возникают достаточно большие гидравлические потери. Это имеет большое значение, так как установленная мощность здания ГЭС определяется по имеющемуся напору. Принимается число нитей дюкера $n = 2$ [4].

Второе решение по прокладке трубопровода через водные преграды — это использование мостовых переходов. Третье решение — протяжка трубопровода непосредственно через реку и ручьи с использованием защитного кожуха (футляра рабочего трубопровода опор и сальников).

Определение гидравлических потерь напора при устройстве дюкеров

Площадь поперечного сечения трубы и скорость движения воды в трубе определяются по формулам (1), (2):

$$\omega = \pi D^2 / 4 \quad (1)$$

$$v = Q / \omega \quad (2)$$

где D — диаметр трубопровода, $D = 3,7 \text{ м}$; Q — расход воды, в рабочем режиме проходит разделение расхода по двум ниткам дюкера и $Q_p = 17 \text{ м}^3/\text{с}$, в аварийном режиме через одну нить проходит полный расход $Q_{ав} = 34 \text{ м}^3/\text{с}$.

$$\omega = 3,14 \cdot 3,7^2 / 4 = 10,75 \text{ м}^2;$$

$$v_p = 17 / 10,75 = 1,58 \text{ м/с}; v_{ав} = 34 / 10,75 = 3,16 \text{ м/с}.$$

Потери напора по длине определяются по формуле Вейсбаха-Дарси [5]:

$$h_l = \lambda (L / D) (v^2 / 2g) \quad (3)$$

где λ — коэффициент гидравлического трения (зависит от режима течения жидкости и шероховатости); L — длина преграды, $L = 35 \text{ м}$.

Коэффициент гидравлического трения определяется в зависимости от режима течения жидкости, поэтому сначала определяется число Рейнольдса по формуле (4):

$$Re = v D / \nu \quad (4)$$

где ν — кинематическая вязкость воды, $\nu = 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

$$Re_p = 1,58 \cdot 3,7 / 1,01 \cdot 10^{-6} = 5,85 \cdot 10^6 > 4000;$$

$$Re_{ав} = 3,16 \cdot 3,7 / 1,01 \cdot 10^{-6} = 1,17 \cdot 10^6 > 4000.$$

Таким образом, режим течения турбулентный. Для определения гидравлических потерь по длине используется график Кольбука-Уайта [6]. Предварительно определяется относительная шероховатость по формуле (5):

$$\Delta_r = \Delta / D \quad (5)$$

где Δ — абсолютная эквивалентная шероховатость, для поверхности стальных водоводов после нескольких лет эксплуатации [6], $\Delta = 0,18$ мм.

$$\Delta_r = 0,18/3700 = 4,86 \cdot 10^{-5}.$$

Тогда $\lambda_p = 0,011$; $\lambda_{ав} = 0,012$. Таким образом, потери по длине:

$$h_{lp} = 0,011 \cdot (35 / 3,7) \cdot (1,58^2 / (2 \cdot 9,81)) = 0,013 \text{ м};$$

$$h_{ла} = 0,012 \cdot (35 / 3,7) \cdot (3,16^2 / (2 \cdot 9,81)) = 0,058 \text{ м}.$$

Далее определяются местные потери напора (на вход и выход) по формуле (6) [7]:

$$h_M = \sum \zeta_M v^2 / 2g \quad (6)$$

где $\sum \zeta_M$ — сумма коэффициентов местных сопротивлений.

Коэффициенты на входе и выходе определяются по формулам (7), (8):

$$\zeta_{вх} = 0,5 (1 - v_1 / v_2)^2 \quad (7)$$

$$\zeta_{вых} = 0,5 (1 - v_2 / v_1)^2 \quad (8)$$

где v_1, v_2 — скорости движения воды перед входом в дюкер (после выхода из дюкера) и в дюкере соответственно, м/с.

Тогда при рабочем режиме:

$$\zeta_{вх p} = 0,5 \cdot (1 - 3,16 / 1,58)^2 = 0,5; \zeta_{вх ав} = 0,5 \cdot (1 - 3,16 / 3,16)^2 = 0;$$

$$\zeta_{вых p} = 0,5 \cdot (1 - 1,58 / 3,16)^2 = 0,0125; \zeta_{вых ав} = 0,5 \cdot (1 - 3,16 / 3,16)^2 = 0.$$

Коэффициент местного сопротивления на углы поворота (резкий поворот, 45°) принимается по таблице 4,18 [6] и учитывается дважды в общей сумме, $\zeta_{пов} = 0,318$. Коэффициент местного сопротивления задвижек принимается дважды по $\zeta_z = 0,05$ при полном открытии простой задвижки в цилиндрической трубе. Также учитывается коэффициент сопротивления при разделении потоков $\zeta_{разд} = 1,0$ и слиянии $\zeta_{разд} = 3,0$ [8]. В аварийном режиме учитывается поворот при входе в одну нить (резкий поворот, 60° и 30°). $\zeta_{пов 60^\circ} = 0,555$; $\zeta_{пов 30^\circ} = 0,155$ [6].

$$\sum \zeta_{M p} = 2 \cdot (0,5 + 0,0125 + 2 \cdot 0,318) + 1 + 3 = 6,3;$$

$$\sum \zeta_{M ав} = 2 \cdot (0,555 + 0,155) + 2 \cdot 0,318 = 2,06.$$

$$h_{M p} = 6,3 \cdot 1,58^2 / (2 \cdot 9,81) = 0,802 \text{ м}; h_{M ав} = 2,06 \cdot 3,16^2 / (2 \cdot 9,81) = 1,048 \text{ м}.$$

Тогда общие потери при рабочем и аварийном режимах работы дюкера:

$$h_p = 0,013 + 0,802 = 0,815 \text{ м}; h_{ав} = 0,058 + 1,048 = 1,106 \text{ м}.$$

Таким образом, потери напора получаются наибольшими при аварийном режиме работы. Если аналогично рассчитать потери напора на двух других участках трубопровода, где предполагается устройство дюкера, то суммарные потери на устройство трех дюкеров составят 3,6 м.

Установленная мощность ГЭС определяется по формуле (9) [9]:

$$N_{ГЭС} = 9,81 Q H \eta; \quad (9)$$

где H — расчетный напор, м; η — КПД гидроагрегата, предварительно $\eta = 0,9$.

Без учета прокладки дюкеров известно, что расчетный напор $H = 20,3$ м.

Тогда установленная мощность:

$$N_{ГЭС 0} = 9,81 \cdot 34 \cdot 20,4 \cdot 0,9 = 6,1 \text{ МВт}.$$

С учетом прокладки дюкеров:

$$N_{ГЭС} = 9,81 \cdot 34 \cdot (20,4 - 3,6) \cdot 0,9 = 5,0 \text{ МВт}.$$

Ледовое воздействие

В условиях умеренного и холодного климата ледовые процессы оказывают значительное динамическое и статическое воздействие на конструкции, находящиеся как в русле водотока, так и в прибрежной зоне. Эти воздействия необходимо учитывать при проектировании, монтаже и эксплуатации трубопроводных переходов. Основными формами проявления ледового воздействия являются: давление неподвижного льда, динамические удары льдин при их перемещении, зажоры и наледи, а также подвижка ледяных полей в период весеннего ледохода. В зависимости от гидрологических условий и морфологии русла каждый из указанных факторов может вызывать значительные напряжения в теле трубопровода и его опорных конструкциях.

Давление неподвижного ледового покрова возникает в результате температурного расширения льда и может достигать значений, сопоставимых с нагрузками от водного потока. Особенно опасно оно для участков, где трубопровод располагается на малой глубине или выходит на поверхность вблизи береговой линии. В таких зонах возможны деформации верхней части трубопровода и повреждения антикоррозионного покрытия. Динамическое воздействие ледяных масс проявляется при движении льда во время весеннего вскрытия водоёмов. Удары льдин по корпусу трубопровода способны вызвать как локальные пластические деформации стенки, так и разрушение сварных швов. Согласно инженерным наблюдениям, наибольшие усилия возникают при столкновении крупногабаритных льдин в узких створах русла, где ограничено поперечное движение льда. Отдельную опасность представляет всплытие или выдавливание трубопровода, не обладающего достаточной пригрузкой. В зимний период при промерзании грунта и снижении уровня воды подъемная сила на участках с отрицательной плавучестью может привести к изменению положения трубопровода и нарушению его проектного положения в траншее. Для предотвращения подобных эффектов рекомендуется использование комбинированных мер защиты — утяжеление трубопровода гравийными или

бетонными балластами, применение анкерных креплений из нержавеющей стали, а также устройство гибких компенсаторов в зонах перехода.

С инженерной точки зрения критическим является также воздействие ледовых зажоров, при которых под ледяным покровом формируются зоны локального повышения давления и турбулентности потока [10], [11]. Такие явления могут привести к неравномерному распределению нагрузок вдоль оси трубопровода и, как следствие, к усталостным повреждениям его элементов. При проектировании переходов через водные преграды возможно проводить гидродинамическое моделирование ледовых процессов с учётом сезонной изменчивости температурного и гидрологического режимов. Основные ледовые опасности для деривационного трубопровода приведены на рисунке 1.



Рисунок 1 - Ледовые опасности для деривационного трубопровода
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.68.1.1>

Моделирование ледового воздействия на деривационные трубопроводы является важным этапом инженерного анализа, направленным на прогнозирование поведения конструкции под действием совокупности природных факторов в зимне-весенний период. Цель моделирования заключается в определении характера распределения нагрузок, возникающих при взаимодействии ледового покрова и движущихся льдин с поверхностью трубопровода, а также в оценке устойчивости и прочности элементов конструкции в реальных эксплуатационных условиях. В рамках численного моделирования ледового воздействия на трубопровод целесообразно рассматривать следующие физические процессы: Статическое давление льда, Динамическое воздействие льдин, Температурно-деформационные эффекты, Давления при зажорах и наледях. Для численного описания процессов взаимодействия льда и трубопровода широко используется метод конечных элементов. В модели трубопровод рассматривается как упругая оболочка с определёнными характеристиками материала, а лед — как вязкоупругое вещество с параметрами, зависящими от температуры и содержания включений. Контактная задача решается с учётом условий сцепления и трения на границе раздела сред.

Сценарный подход в моделировании позволяет оценить поведение трубопровода при различных гидрологических и температурных режимах. Например, моделирование может включать сценарии раннего вскрытия водоёма, образования зажоров, неравномерного таяния льда и образования наледей на береговых участках. Для каждого сценария проводится расчёт максимальных эквивалентных напряжений в стенке трубопровода и сравнение их с допускаемыми значениями, определёнными нормативами.

Для оценки нагрузок от льда на подводный трубопровод, проложенный в защитном кожухе через русло реки, используется методика, основанная на нормативных документах (СП 38.13330.2018) и инженерных рекомендациях для гидротехнических сооружений.

Давление неподвижного льда на горизонтальную конструкцию определяется по формуле:

$$P_{\text{ст}} = k \cdot \sigma_{\text{л}} \cdot h_{\text{л}}$$

где:

k — коэффициент, учитывающий форму конструкции;

$\sigma_{\text{л}}$ — предел прочности льда на сжатие.

$$P_{\text{ст}} = 0.9 \cdot 500 \cdot 0.5 = 225 \text{ кПа}$$

Сила статического давления на погонный метр трубопровода:

$$F_{\text{ст}} = P_{\text{ст}} \cdot D_{\text{к}} = 225 \cdot 4.5 = 1012.5 \text{ кН/м}$$

Использование защитного кожуха при прокладке трубопровода

Устройство мостового перехода является достаточно дорогостоящим решением ввиду большого объема железобетона, стали и других материалов, используемых при его строительстве, хотя при этом можно сохранить ось трубопровода прямолинейной — без резких изломов в вертикальной плоскости, а значит, избежать потерь напора, таких как в дюкере. Однако в данном случае необходимо задать такие уклоны по трассе трубопровода, чтобы в местах подхода к мостовым переходам трубопровод был выше водных объектов.

Таким образом, при изменении уклонов трубопровода также возникают гидравлические потери, требуется устройство анкерных опор. Но если ось трубопровода проходит непосредственно через водную преграду под уровнем воды, то в этом случае возможно применение третьего варианта — использование защитного кожуха. Сама технология предполагает использование стальных труб большего диаметра, чем у основного трубопровода. Внутри между двумя стальными трубами укладывается утеплитель. Для защиты от коррозии верхний слой футляра покрывается слоем изоляции с применением битумных или полимерных материалов. К рабочему трубопроводу, размещаемому в футляре, предъявляются повышенные требования по прочности и надежности, поэтому для него применяются трубы с

толщиной стенок на 20% толще, чем у основного трубопровода. Для прокладки трубопровода вырывается подводная траншея. На одном берег устраивается строительная площадка, где размещаются стапель и спусковая дорожка из роликовых опор. Крюк тягового троса прикрепляется к кольцу из круглой стали (приварено к заглушке, оголовку секции). Проводится протаскивание тягового троса через водоем и его вытягивание на противоположный берег [12].

Технология устройства трубопровода с использованием защитного кожуха схожа с технологией работ по устройству дюкера. Главное преимущество — это исключение значительных местных потерь напора. Недостатки — возможность всплытия, или обледенения в зимний период — что может привести к смещению трубопровода в горизонтальной и вертикальной плоскости (в худшем случае — с разрывом и перемещением вырванной секции трубопровода по течению реки/ручья) [13]. Для предотвращения указанных негативных эффектов следует предусмотреть крепление трубопровода в траншее металлическими каркасами из нержавеющей материалов и пригрузить гравийным грунтом (рисунок 2).

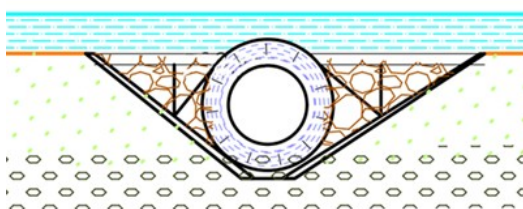


Рисунок 2 - Вариант протяжки трубопровода через ручей

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.68.1.2>

Надёжность и управление выбором

Выбор оптимального инженерного решения при проектировании деривационного трубопровода, пересекающего водные препятствия, представляет собой задачу многокритериальной оптимизации, где необходимо учитывать как технические, так и эксплуатационные параметры. Надёжность выбора определяется полнотой исходных данных, корректностью применяемых расчётных моделей и устойчивостью решения при изменении внешних условий. Управление процессом выбора инженерного решения предполагает использование формализованных методов оценки и принятия решений, включающих вероятностный анализ, методы экспертных оценок и технико-экономическое моделирование. Ключевым аспектом обеспечения надёжности выбора является учёт неопределённостей, связанных с геотехническими и гидрологическими характеристиками района строительства. Например, колебания уровня воды в реке или ручьях, сезонные изменения русловых процессов и динамика грунтового основания могут существенно повлиять на долговечность и эксплуатационную безопасность выбранного варианта. Поэтому управление выбором решения должно включать сценарный анализ, при котором для каждого возможного метода (дюкер, мостовой переход, футляр) рассматриваются альтернативные сценарии эксплуатации при различных нагрузках и климатических условиях [13], [14], [15], [16].

Надёжность принимаемого решения также определяется степенью его адаптивности — способностью проектного решения сохранять требуемые функциональные характеристики при изменении внешних воздействий. Для оценки этой характеристики целесообразно использовать интегральный показатель риска, включающий вероятность отказа и величину возможных последствий. В инженерной практике это реализуется через методики вероятностного анализа надёжности и расчёты коэффициентов запаса прочности для наиболее нагруженных элементов конструкции. С точки зрения управления процессом выбора, целесообразно использовать иерархические модели принятия решений, позволяющие структурировать критерии по уровням значимости: техническая реализуемость, стоимость, надёжность, сложность эксплуатации, экологическая безопасность. В качестве дополнительного инструмента может быть применён байесовский подход к учёту априорной информации о поведении аналогичных конструкций на схожих объектах.

Таблица 1 - Преимущества и недостатки вариантов

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.68.1.3>

Критерий	Вариант 1 (дюкеры)	Вариант 2 (мостовые переходы)	Вариант 3 (защитные кожухи)
Стоимость решения, тыс. руб	173,87	317,85	168,35
Комментарий	Отработанная технология. Высокие гидравлические потери. Защищён подземным расположением.	Сохранение напора, возможен совмещённый переход. Высокая стоимость, сложность монтажа. Требуется расчёт на обледенение	Сохранение напора, минимальные гидравлические потери. Риски от ледовых и паводковых нагрузок, всплытие. Требуется спец. мер:

Критерий	Вариант 1 (дюкеры)	Вариант 2 (мостовые переходы)	Вариант 3 (защитные кожухи)
			балласт, анкера, каркасы.

Из-за изгибов в дюкере теряется давление воды. Мост и кожух таких потерь не создают. Вариант с защитным кожухом оказался самым выгодным. Он дешевле в строительстве и не «крадёт» напор. У кожуха есть большой минус — он лежит на дне и зимой на него давит и бьёт лёд. То есть, если лёд повредит трубу, ремонт может свести на всю экономию. Чтобы кожух работал надёжно, нужно очень точно задать все нагрузки ото льда и течения, и хорошо его пригрузить балластом, заанкерить. Данный способ подходит для нешироких и неглубоких рек.

Результаты и дискуссия

Таким образом, были рассмотрены три варианта прокладки трубопроводов через водные преграды — с использованием дюкеров, мостовых переправ и защитных кожухов (футляров).

В случае использования трех дюкеров по трассе трубопровода происходит потеря 1 МВт установленной мощности здания ГЭС, это 17% от мощности, которая может быть установлена при втором и третьем вариантах.

Мостовые переправы требуют большого объема строительных материалов и изменений уклонов оси трубопровода (значительно меньших, чем при устройстве дюкеров). И если этот вариант можно считать традиционным, то вариант с использованием защитных кожухов используется не так часто, так как для него нужны подходящие условия — небольшие и неглубокие водные преграды, заглубление трубопровода под уровень воды. Иначе при достаточно глубоких и широких водоемах на трубопроводы, прокладываемые указываемым способом, действуют достаточно сильные нагрузки ото льда и течения. Требуется устройство серьезных подводных каркасов. Решение становится экономически не выгодным при больших водных препятствиях из-за стоимости материалов и строительно-монтажных работ.

Для каждого из трех вариантов были вычислены стоимости, в которые включены стоимости монолитного бетона и арматуры (анкерные опоры в местах начала и конца дюкеров; мостовые опоры), выемок, насыпей (обратных засыпок); в случае дюкера — устройство второй нити (первая нить (единственная) учитывается и в других вариантах при прохождении через преграду), антикоррозионных, противотрансфузионных материалов.

Для варианта деривации Толмачёвской ГЭС-4, проходящей через реку Толмачёва и два ручья был выбран метод прокладки с использованием защитного кожуха по результатам технико-экономического обоснования, результаты которого приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Техничко-экономическое обоснование вариантов

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.68.1.4>

	Вариант 1 (дюкеры)	Вариант 2 (мостовые переправы)	Вариант 3 (защитные кожухи)
Стоимость решения, тыс. руб	173,87	317,85	168,35
Мощность ГЭС, МВт	5,0	5,8	6,1
Удельные кап.вложения, тыс. руб/кВт	2920	2517	2433

Заключение

В результате рассмотрения вопроса о сооружениях, которые могут использоваться для устройства деривационного трубопровода в местах пересечения с водными препятствиями, были решены поставленные задачи:

1. В качестве возможных способов прохождения трубопровода через водные объекты были выбраны три основных способа — с использованием дюкеров, мостовых переправ и защитных футляров, проходящих непосредственно через водный объект.

2. В случае использования дюкеров гидравлические потери напора — местные и по длине составят для трех расчетных участков — 3,6 м. Это приведет к снижению установленной мощности гидроэлектростанции на 1,1 МВт.

3. Вариант с использованием защитных кожухов сопряжен с рядом трудностей, которые могут повлечь за собой повреждения трубопровода или его разрыв в случае прохождения трассы трубопровода через крупную водную преграду. В случае деривационного трубопровода Толмачёвской ГЭС-4 описанная технология может быть использована при известных исходных данных (реках и ручьях шириной до 42 м, глубиной до 1,8 метров).

4. В ходе технико-экономического обоснования вариантов стоимость устройства дюкеров будет порядка 174 тыс. рублей, мостовых переходов — 318 тыс. рублей, протяжки труб в воде — 168 тыс. рублей. При этом удельные капиталовложения, оцененные как отношение общей стоимости варианта на 1 кВт установленной мощности получились следующие — 2920 тыс. руб/кВт (в случае устройства дюкеров), 2433 тыс. руб/кВт (и в случае устройства мостовых переходов, и при протяжке трубопровода).

5. Таким образом, вариант с использованием защитных кожухов для пропуска трубопровода через водные преграды является наиболее предпочтительными при трассировании деривационного трубопровода Толмачёвской ГЭС-4.

При дальнейшей разработке проектных решений необходимо детально рассчитать нагрузки, действующие на трубопровод, проходящий через реку или ручей, особенно во время весеннего паводка, когда наблюдаются значительные нагрузки от течения и льда. Это позволит выбрать наиболее надежный вариант крепления и пригружения трубопровода в рассматриваемом месте. Мостовые переправы также могут быть рассмотрены в качестве варианта прокладки трубопровода через водные преграды в случае использования моста и для прохождения автожелезнодорожного транспорта.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. СП 73.13330.2016. Свод правил. Внутренние санитарно-технические системы зданий. Актуализированная редакция СНиП 3.05.01-85. — Введ. 2017-04-01. — Москва: Стандартинформ, 2017. — 128 С.
2. Андреев А.Е. Гидроэлектростанции малой мощности: Учеб. Пособие / Под ред. В.В. Елистратова / А.Е. Андреев, Я.И. Бляшко, В.В. Елистратов и др. — Санкт-Петербург: Политехнический университет, 2005. — 432 с. — URL: <http://elibr.spbstu.ru/dl/2/si20-1018.pdf>. (дата обращения: 03.10.25). doi: 10.18720/SPBPU/2/si20-1018
3. Фрейшист А.Р. Стальные трубопроводы гидроэлектростанций: справочное пособие / А.Р. Фрейшист, А.Х. Хохарин, А.М. Шор. — Москва: Энергоатомиздат, 1988. — 263 с.
4. Ишева Н.И. Водоотводящие сети. Расчет дюкера: методические указания к практическим занятиям по направлению 08.03.01 "Строительство" / Н.И. Ишева, Б.М. Гришин, М.В. Бikuнова. — Пенза: ПГУАС, 2015. — 25 с.
5. Гиргидов А.Д. Механика жидкости и газа (гидравлика): Учебник для вузов / А.Д. Гиргидов. — Санкт-Петербург: Политехнический университет, 2007. — 545 с.
6. Кожевникова Е.Н. Механика жидкости и газа (гидравлика): краткий справочник / Е.Н. Кожевникова, А.И. Лаксберг, Е.А. Локтионова. — Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2003. — 72 с.
7. Чугаев Р.Р. Гидравлика: Учебник для вузов / Р.Р. Чугаев. — Ленинград: Энергоиздат, 1982. — 672 с.
8. Таблицы коэффициентов местных сопротивлений // Иннер Инжиниринг. — 2025. — URL: <https://inner.su>. (дата обращения: 03.10.25)
9. Морозов А.А. Использование водной энергии / А.А. Морозов. — Ленинград; Москва: Госэнергоиздат, 1948. — 568 с.
10. Шарапов Д.А. Термодинамическая модель ледового воротника в гидротехническом строительстве / Д.А. Шарапов, Ю.С. Клочков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — Самара: Самарский федеральный исследовательский центр РАН, 2023. — Вып. 3. — С. 107-113. — DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-107-113
11. Шарапов Д.А. Численная оценка необходимой энергии для предотвращения образования воротников на морских причалах Арктики / Д.А. Шарапов, А.С. Большев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства; — Санкт-Петербург: Российский морской регистр судоходства, 2016. — С. 20–25.
12. Река и озеро // Множество рек и озер. — 2025. — URL: <https://voda.prel.ru>. (дата обращения: 03.10.25)
13. СП 38.13330.2018. Свод правил. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82. — Введ. 2025-10-18. — Москва: Стандартинформ, 2018. — 106 С.
14. Vasilyev V. Innovations in Saint Petersburg's 12 km siphon sewer / V. Vasilyev, F. Vasilyev // Waste and Resource Management. — 2015. — № 169. — P. 42–51. — DOI: 10.1680/jwarm.14.00022
15. Yan Tao Siphon Pipeline Resistance Characteristic Research / Tao Yan, Li Chen, Min Xu et al. // Procedia Engineering. — 2012. — № 28. — P. 99–104. — DOI: 10.1016/j.proeng.2012.01.689
16. Antonov A.A. Investigation of the welded joints of siphon pipes of the underwater crossing of main oil pipeline / A.A. Antonov, Yu.A. Yakovlev, G.G. Ammosov et al. // Procedia Structural Integrity. — 2020. — № 30. — P. 6–10. — DOI: 10.1016/j.prostr.2020.12.002

Список литературы на английском языке / References in English

1. SP 73.13330.2016. Svod pravil. Vnutrennie sanitarno-texnicheskie sistemy' zdaniy. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 3.05.01-85 [SP 73.13330.2016. Code of rules. Internal sanitary-technical systems. Updated version of SNiP 3.05.01-85]. — Introduced 2017-04-01. — Moscow: Standartinform, 2017. — 128 P. [in Russian]
2. Andreev A.E. Gidroe'lektrostantsii maloj moshhnosti: Ucheb. Posobie / Pod red. V.V. Elistratova [Low-power hydroelectric power plants: A study guide / Edited by V.V. Elistratov] / A.E. Andreev, Ya.I. Blyashko, V.V. Elistratov et al. —

Saint Petersburg: Politeknicheskij universitet, 2005. — 432 p. — URL: <http://elibrary.spbstu.ru/dl/2/si20-1018.pdf>. (accessed: 03.10.25). doi: 10.18720/SPBPU/2/si20-1018 [in Russian]

3. Frejshist A.R. *Stal'ny'e truboprovody' gidroe'lektrostancij: spravocnoe posobie* [Steel pipelines of hydroelectric power plants: a reference guide] / A.R. Frejshist, A.X. Xoxarin, A.M. Shor. — Moscow: E'nergoatomizdat, 1988. — 263 p. [in Russian]

4. Isheva N.I. *Vodootvodyashhie seti. Raschet dyukera: metodicheskie ukazaniya k prakticheskim zanyatiyam po napravleniyu 08.03.01 "Stroitel'stvo"* [Drainage networks. Duker's calculation: guidelines for practical exercises in the field of 08.03.01 "Construction"] / N.I. Isheva, B.M. Grishin, M.V. Bikunova. — Penza: PGUAS, 2015. — 25 p. [in Russian]

5. Girgidov A.D. *Mekhanika zhidkosti i gaza (gidravlika): Uchebnik dlya vuzov* [Mechanics of liquid and gas (hydraulics): Textbook for universities] / A.D. Girgidov. — Saint Petersburg: Polytechnic University, 2007. — 545 p. [in Russian]

6. Kozhevnikova E.N. *Mexanika zhidkosti i gaza (gidravlika): kratkij spravocnik* [Mechanics of liquid and gas (hydraulics): a short reference] / E.N. Kozhevnikova, A.I. Laksberg, E.A. Loktionova. — Saint Petersburg: SPbGPU, 2003. — 72 p. [in Russian]

7. Chugaev R.R. *Gidravlika: Uchebnik dlya vuzov* [Hydraulics: A textbook for universities] / R.R. Chugaev. — Leningrad: E'nergoizdat, 1982. — 672 p. [in Russian]

8. *Tablicy' koefficientov mestny'x soprotivlenij* [Tables of local resistance coefficients] // INNER ENGINEERING. — 2025. — URL: <https://inner.su>. (accessed: 03.10.25) [in Russian]

9. Morozov A.A. *Ispol'zovanie vodnoj e'nergii* [Use of Water Power] / A.A. Morozov. — Leningrad; Moskva: Gose'nergoizdat, 1948. — 568 p. [in Russian]

10. Sharapov D.A. *Termodinamicheskaya model ledovogo vorotnika v gidrotekhnicheskom stroitel'stve* [Thermodynamic Model of an Ice Collar in Hydraulic Engineering] / D.A. Sharapov, Yu.S. Klochkov // Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. — Samara: Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 2023. — Iss. 3. — P. 107-113. — DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-107-113 [in Russian]

11. Sharapov D.A. *Chislennaya otsenka neobkhodimoi energii dlya predotvrashcheniya obrazovaniya vorotnikov na morskikh prichalakh Arktiki* [Numerical Assessment of the Energy Required to Prevent the Formation of Collars at Arctic Sea Berths] / D.A. Sharapov, A.S. Bolshev // Scientific and Technical Digest of the Russian Maritime Register of Shipping; — Saint Petersburg: Russian Maritime Register of Shipping, 2016. — P. 20–25. [in Russian]

12. *Reka i ozero* [River and lake] // An abundance of rivers and lakes. — 2025. — URL: <https://voda.prel.ru>. (accessed: 03.10.25) [in Russian]

13. SP 38.13330.2018. *Svod pravil. Nagruzki i vozdejstviya na gidrotekhnicheskie sooruzheniya (volnovy'e, ledovy'e i ot sudov)*. Aktualizirovannaya redakciya SNIp 2.06.04-82 [SP 38.13330.2018. A set of rules. Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice, and from ships). Updated version of SNIp 2.06.04-82]. — Introduced 2025-10-18. — Moscow: Standartinform, 2018. — 106 P. [in Russian]

14. Vasilyev V. *Innovations in Saint Petersburg's 12 km siphon sewer* / V. Vasilyev, F. Vasilyev // Waste and Resource Management. — 2015. — № 169. — P. 42–51. — DOI: 10.1680/jwarm.14.00022

15. Yan Tao *Siphon Pipeline Resistance Characteristic Research* / Tao Yan, Li Chen, Min Xu et al. // Procedia Engineering. — 2012. — № 28. — P. 99–104. — DOI: 10.1016/j.proeng.2012.01.689

16. Antonov A.A. *Investigation of the welded joints of siphon pipes of the underwater crossing of main oil pipeline* / A.A. Antonov, Yu.A. Yakovlev, G.G. Ammosov et al. // Procedia Structural Integrity. — 2020. — № 30. — P. 6–10. — DOI: 10.1016/j.prostr.2020.12.002