

БЕТОН ДЛЯ ПРИЛИВНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ (К 50-ЛЕТИЮ КИСЛОГУБСКОЙ ПЭС В ЗАПОЛЯРЬЕ)

И.Н. УСАЧЕВ¹, канд. техн. наук
Н.К. РОЗЕНТАЛЬ², д-р техн. наук
Г.В. ЧЕХНИЙ^{3,✉}, канд. техн. наук

¹ «СПКТБ «Мосгидросталь», трест «Гидромонтаж», Карамышевская наб., д. 37, г. Москва, 123423, Российская Федерация

² АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 1, г. Москва, 109428, Российская Федерация

³ Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

Аннотация

Введение. В Арктике в губе Кислой Баренцева моря с декабря 1968 г. функционирует первая в России экспериментальная приливная электростанция, впервые в мировой практике возведенная наплавным способом, признанная выдающимся сооружением XX века, которой присвоен статус «Памятник науки и техники РФ». В данной статье освещены исследования морозостойкости и коррозионной стойкости монолитного бетона и железобетона приливной электростанции.

Цель. Обобщение полувековых исследований и наблюдений за железобетонными конструкциями крупного сооружения и опытными образцами бетона и железобетонных конструкций в жестких морских условиях Арктики.

Материалы и методы. Бетон высокой прочности и морозостойкости, малой проницаемости. Лабораторные и длительные натурные испытания с систематическими обследованиями состояния бетонных образцов и железобетонных конструкций приливной электростанции с оценкой прочности и морозостойкости.

Результаты. Показана высокая морозостойкость и коррозионная стойкость в морской среде при длительном воздействии низкой температуры морской Арктической зоны, обеспечившие полную сохранность конструкций в течение 50 лет эксплуатации сооружения в жестких условиях арктического моря, в том числе в зоне приливов и отливов и при воздействии льда.

Выводы. Доказана возможность возведения и длительной (полувековой) эксплуатации без ремонта железобетонных сооружений приливных электростанций в морских условиях Арктики.

Ключевые слова: Арктика, приливная электростанция, морозостойкость бетона, прочность бетона, стойкость железобетонных конструкций в море, испытания на морском стенде, обследования железобетонного сооружения

Для цитирования: Усачев И.Н., Розенталь Н.К., Чехний Г.В. Бетон для приливной электростанции (к 50-летию Кислогубской ПЭС в Заполярье). Вестник НИЦ «Строительство». 2024;43(4):156–165. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-156-165](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-156-165)

Вклад авторов

Усачев И.Н. – участие в проектировании, строительстве и обследовании сооружения.

Розенталь Н.К. – участие в стендовых испытаниях бетона в море, обследование сооружения, исследование бетона.

Чехний Г.В. – лабораторные исследования бетона.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 14.10.2024

Поступила после рецензирования 05.11.2024

Принята к публикации 07.11.2024

CONCRETE FOR TIDAL POWER PLANT (ON THE 50TH ANNIVERSARY OF THE KISLOGUBSKAYA TIDAL POWER PLANT IN THE ARCTIC)

I.N. USACHEV¹, Cand. Sci. (Engineering)

N.K. ROZENTAL², Dr. Sci. (Engineering)

G.V. CHEKHNI^{3,✉}, Cand. Sci. (Engineering)

¹Mosgidrosta Special Design and Technological Bureau, Trest Gydmontazh JSC, Karamyshevskaya nab., 37, Moscow, 123423, Russian Federation

²JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation

³Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract

Introduction. The first experimental tidal power station in Russia has been operating in the Kisyaya Bay of the Barents Sea, Arctic Region, since December 1968. Constructed using float-on methods, it is recognized as an outstanding structure of the 20th century and has been designated as a "Monument of Science and Technology of the Russian Federation". The paper discusses the research on frost resistance and corrosion resistance of monolithic concrete and reinforced concrete used in the tidal power plant.

Aim. To summarize half a century of research and observations on reinforced concrete structures of this large facility and experimental samples of concrete and reinforced concrete in the harsh marine conditions of the Arctic.

Materials and methods. High-strength, frost-resistant, and low-permeability concrete was utilized. The methodology involved laboratory and long-term field tests, including systematic inspections of the condition of concrete samples and reinforced concrete structures of the tidal power plant, with assessments of their strength and frost resistance.

Results. The study demonstrated high frost resistance and corrosion resistance in the marine environment under prolonged exposure to low temperatures typical of the Arctic zone, ensuring the complete preservation of structures over 50 years of operation in harsh Arctic sea conditions, including tidal zones and ice impact.

Conclusions. The findings confirm the feasibility of constructing and maintaining reinforced concrete structures for tidal power plants in marine Arctic conditions without repair for an extended period (up to fifty years).

Keywords: Arctic, tidal power plant, frost resistance of concrete, concrete strength, durability of reinforced concrete structures at sea, marine testing, surveys of reinforced concrete structures

For citation: Usachev I.N., Rozental N.K., Chekhni G.V. Concrete for tidal power plant (on the 50th anniversary of the Kislogubskaya tidal power plant in the Arctic). *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;43(4):156–165. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-156-165](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-156-165)

Authors contribution statement

Usachev I.N. – participation in the design, construction and structural survey.
Rozental N.K. – participation in bench tests of concrete at sea, structural survey, study of concrete.
Chekhni G.V. – laboratory studies of concrete.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 14.10.2024

Revised 05.11.2024

Accepted 07.11.2024

Идея создания приливных электростанций (ПЭС) в России принадлежит Льву Борисовичу Бернштейну (1911–1996 гг.), создавшему российскую научно-инженерную школу освоения морской энергии, положившему большую часть жизни на реализацию идеи [1]. Получение электроэнергии на приливной электростанции является наиболее экономичным способом. В отличие от тепловых электростанций приливная электростанция не требует расхода топлива, в отличие от атомных станций – расхода урана. Не нужно затопливать большие площади сельскохозяйственных земель и лесов, переносить поселки, деревни и города, что приходится делать при заполнении водохранилищ гидроэлектростанций. Нет зависимости от нестабильных ветров, что случается при эксплуатации ветровых электростанций [2]. Электроэнергию получают за счет энергии приливных волн.

Для бесперебойной подачи электроэнергии потребителю в периоды, когда уровни воды в море и в отгороженном от моря заливе становятся равными, возможно подключение к электросети крупных энергетических систем или создание специальных бассейнов, заполняемых водой в период работы приливной станции, из которых вода расходуется в период равенства уровней моря с двух сторон плотины.

Кислогубская приливная электростанция сооружена Управлением строительства «Севгидростроя» в 1965–1967 гг. Существенного снижения стоимости строительства экспериментальной ПЭС удалось добиться использованием нового для того времени наплавного способа строительства станции. Железобетонное здание станции сооружено в строительном доке в Кольском заливе, отбуксировано на плаву судами Северного военно-морского флота в губу Кислая Баренцева моря, опущено на заранее подготовленное в 1964–1965 гг. основание и в течение 50 лет находится в эксплуатации в Кольской энергосистеме. Названный способ исключил устройство защитных сооружений на месте строительства ПЭС. Такая технология существенно (до 42 %) сократила расходы на строительство и продолжительность строительства (на 30 %). Станция оснащена агрегатом двустороннего действия, работающим при приливе и отливе, в 2006 г. дополнительно изготовлен, доставлен на плаву и установлен на Кислогубской ПЭС более мощный опытный энергоблок.

Экономическая целесообразность создания ПЭС подтверждена также во Франции на промышленной ПЭС «Ранс», где получают самую дешевую электроэнергию. Особенность Кислогубской ПЭС – создание и длительная (более 50 лет) безаварийная эксплуатация в условиях Арктики.

Ввиду уникальности конструкции, способа сооружения, модели и района эксплуатации Кислогубская ПЭС состоит на государственном учете и охраняется государством как «Памятник науки и техники РФ» (государственная регистрация № 82, код 008200).

Решение о строительстве на Арктическом побережье первой в стране приливной электростанции было принято Правительством СССР в 1962 г. После предварительных обследований побережья была выбрана для сооружения губа Кислая. Губа отличалась узким входом, что не требовало сооружения протяженной по длине плотины в Баренцевом море. В то же время отсекаемая часть губы занимала достаточную площадь и имела необходимый объем. Однако для сооружения железобетонного здания станции на побережье Северного Ледовитого океана не было материала, пригодного для создания бетона ПЭС, способного к долговременной эксплуатации в Арктической зоне.

Природные условия в губе Кислой Баренцева моря для Кислогубской ПЭС оценивались как одни из наиболее суровых в обитаемых районах мира: 700 циклов замачивания и осушения и до 500 циклов замораживания и оттаивания в год в зоне полусуточного прилива, сопровождаемые сильными ветрами, которые обуславливают появление волн высотой до 6,0 м (волнение моря до 7 баллов), а также отрицательной температурой воздуха до минус 41 °С и морской воды до минус 1,5 °С в течение 270 суток полярной ночи. Соленость воды до 35 г/л. Обрастание поверхности сооружения биологической массой достигало 340 кг/м² за 1–2 года; коррозия незащищенной стали – со скоростью до 1 мм в год. Кроме того, следовало учитывать воздействие арктического льда [3].

Обследования зарубежных исследователей существующих бетонных сооружений в Арктике на побережьях Норвегии, Канады, а также обследования наших ученых на Мурманском побережье России показали, что эти сооружения в зоне прилива начинали разрушаться со скоростью до 0,081 мм за один цикл замораживания и оттаивания в первый же зимний сезон. Тонкостенные конструкции Кислогубской ПЭС (толщина стен 15 см при толщине защитного слоя бетона 20 мм) просуществовали бы не более 5–7 лет.

Испытания, выполненные ЦНИИС, Гидропроектом и НИИЖБ в 1950–1960 гг., показали, что стойкость бетона в условиях Баренцева моря зависит в первую очередь от его морозостойкости. Ускоренные испытания проводились в натурных условиях Кольского залива в бассейнах Мурманской климатической станции ЦНИИС. Образцы помещали в опорожненный бассейн, расположенный на берегу залива, и с помощью насоса заливали морской водой, выдерживали определенное время и сливали воду. С помощью вентиляторов обдували образцы наружным морозным воздухом (стадия замораживания), вновь заливали морской водой (стадия оттаивания). За один зимний сезон реализовали более 1000 натурных циклов замораживания и оттаивания. Из числа испытанных составов бетона лучшие результаты показал состав с добавкой абиетата натрия (СНВ) с пластифицирующей добавкой сульфитно-дрожжевой барды (ССБ), разработанный под руководством Ф. М. Иванова [4].

Бетонная смесь была изготовлена на сульфатостойком портландцементе, двухфракционном щебне из гранитогнейса, кварцевом песке с модулем крупности 2,3, с добавками ССБ и СНВ, подвижность бетонной смеси равнялась 2–4 см по осадке конуса. Содержание вовлеченного воздуха в бетонной смеси равнялось 5–6 %. Прочность бетона в возрасте 90 суток равнялась 45 МПа. За 40 лет прочность бетона в сооружении возросла до 69 МПа, водонепроницаемость – W10.

Дозировку добавок уточняли в производственных условиях в зависимости от свойств бетонной смеси и содержания в ней воздуха. В момент перемешивания смеси количество воздуха составляло 4–6%. Бетон в сооружении увлажняли в течение 30 суток. В холодную погоду укрывали брезентом и подогревали паром до 30–40 °С.

Из выбранного бетона изготовили образцы-кубы, которые до 1000 циклов замораживания и оттаивания испытывались на стенде ЦНИИС, при этом образцы не имели повреждений. Затем образцы переместили на стенд Кислогубской ПЭС.

В целях уменьшения пористости бетона в наружном слое опалубку обшивали водопоглощающим картоном. Бетонную смесь уплотняли по специально разработанной технологии высокочастотными глубинными вибраторами.

Из бетона приведенного состава в 1965–1967 гг. сооружен наплавной блок здания Кислогубской ПЭС, который в августе 1968 г. установлен в створе губы Кислой.

После установки здания ПЭС в проектном положении была выполнена катодная защита стальной арматуры.

Одновременно с образцами из бетона с добавками ССБ + СНВ изготовили фрагмент конструкции – куб с ребром 1 м, с толщиной стенки 15 см. Фрагмент был заполнен гидрофобным грунтом, предназначенным для загрузки помещений наплавного здания ПЭС для предупреждения всплытия. Куб установили в Кольском заливе в зоне переменного горизонта воды. При отливе часть куба находилась выше уровня воды. После 6500 циклов замораживания и оттаивания бетонные стенки куба не имели повреждений. Грунт также успешно прошел испытания.

Мониторинг бетона ПЭС осуществлялся специалистами АО «НИИЭС» (И. Н. Усачев) и лаборатории коррозии НИИЖБ (Ф. М. Иванов, Н. К. Розенталь). Натурные испытания бетона ПЭС под водой выполнял специалист КИСИ д-р техн. наук, водолаз 1 класса В. В. Гончаров с помощью прибора ПГ-2. Прочность бетона определяли на выбуренных кервах и неразрушающими методами – приборами 1401 и УК-14П. Прочность бетона поверхностного слоя со стороны помещений равнялась 55–62 МПа, а измеренная ультразвуковым методом в наружном слое превышала 68 МПа.

После 5 лет эксплуатации ПЭС из стенки здания были отобраны керны. Прочность бетона в кервах, отобранных из сооружения, равнялась 70–86 МПа.

Микроскопические исследования НИИЖБ показали наличие в бетоне негидратированных зерен цемента, что свидетельствует о возможности самозалечивания микротрещин в бетоне.

Высокая морозостойкость бетона была обеспечена правильным выбором цемента. Были применены сульфатостойкий портландцемент, содержащий низкое количество алюминатов, и качественный заполнитель оптимального гранулометрического состава. Применение комплексной добавки позволило получить бетонную смесь с низким водоцементным отношением. Применено оборудование для качественного виброуплотнения. Использован мягкий режим тепловой обработки.

Бетон плиты кровли здания, изготовленный без использования добавок на рядовых цементах, подвергавшийся воздействию открытой атмосферы, в том числе аэрозоля морской воды, за 50 лет разрушился на глубину 5 см.

В процессе эксплуатации сооружения с целью защиты стальной арматуры от коррозии применялась катодная защита. Такая защита способствует отторжению из защитного слоя агрессивных ионов – хлоридов и сульфатов. Менее известно проникание из морской воды

в бетон защитного слоя катионов – ионов кальция, натрия и калия, повышающих pH на контакте стальной арматуры с бетоном. Проникание в бетон под действием электрического тока ионов кальция способно понизить проницаемость защитного слоя.

Ранее защитное действие катодной защиты наблюдалось на металлических конструкциях стальной эстакады на месторождении «Нефтяные камни» в Каспийском море в 1964 г. Стальные конструкции защищали цинковыми протекторами, подвешенными на металлических тросах к стальной эстакаде. Протекторы представляли собой цилиндрические цинковые болванки. Погруженные в морскую воду они постепенно растворялись и сообщали защитный потенциал стальному сооружению. При этом на поверхности защищаемой стали образовывался защитный слой из кальциевых солей. После полного растворения цинка образовавшийся слой более года защищал конструкцию, при этом постепенно растворяясь. По аналогии с описанным случаем можно предположить, что в конструкции Кислогубской ПЭС катодная защита могла вызывать уплотнение защитного слоя бетона за счет переноса из морской воды ионов кальция через защитный слой к поверхности стальной арматуры. К сожалению, нам неизвестны исследования защитного слоя бетона, подвергавшегося длительному воздействию катодной защиты. В дальнейшем было бы целесообразно выполнить соответствующие исследования.

Фильтрация воды через стены толщиной 15 см, находящиеся под напором до 12 м, не наблюдалась. После 50 лет эксплуатации здания ПЭС размораживание бетона в железобетонных элементах отсутствовало.

В период строительства ПЭС из такого же бетона, что применен для бетонирования здания ПЭС, была изготовлена армированная плита и после завершения строительства уложена в непосредственной близости от здания ПЭС на отсыпку из щебня в приливной зоне со стороны моря. Плита не была подключена к системе катодной защиты. Во время отлива плита находилась в воздушной среде. Наблюдения за состоянием плиты выполнялись одновременно с периодическими наблюдениями за состоянием железобетонных конструкций. За время наблюдения бетон и арматура плиты не имели признаков повреждений, что свидетельствует о высокой морозостойкости бетона и защитных свойствах при воздействии морской воды и отрицательной температуры. Защите арматуры способствовало постоянное водонасыщенное состояние плотного бетона, ограничивающее доступ кислорода к поверхности арматуры.

Параллельно изготовлены образцы-кубы, которые после набора прочности испытали на стенде ЦНИИС в Кольском заливе. Образцы выдержали 1000 циклов замораживания и оттаивания. Затем образцы были перемещены на стенд Кислогубской ПЭС, где испытывались в зоне приливов и отливов до повреждения. При очередном обследовании образцов в 2014 г. обнаружено разрушение образцов, кубы приобрели шарообразную форму. Вырезанные из шаров кубы имели прочность неповрежденного бетона. Различие состояния бетона в кубах и в сооружении можно объяснить следующим:

- ввиду большой массивности и теплоемкости сооружения, а также положительной температуры внутри здания температура стен отличается от температуры образца размерами $10 \times 10 \times 10$ см. Как следствие, более мягкий режим замораживания и оттаивания бетона стен;
- поставленные на стенд ПЭС образцы-кубы до установки на этот стенд претерпели (без повреждений) воздействие 1000 циклов замораживания и оттаивания на стенде ЦНИИС в Кольском заливе;

- условия виброуплотнения и твердения бетона в образцах-кубах неизбежно отличаются от соответствующих условий крупноразмерного монолитного сооружения;
- большие размеры конструкции и наличие стальной арматуры в стенах сооружения создают внутренние напряжения бетона, отличные от напряжений в кубах;
- в бетоне образцов-кубов и в стенах крупного сооружения скорости охлаждения и повышения температуры не одинаковы.

Результаты стендовых наблюдений свидетельствуют о необходимости развивать натурные испытания, в том числе в реальных сооружениях, а также математическое моделирование.

В последние годы активно развиваются исследования и производство бетонов нового поколения с прочностью до 100 МПа и более, высокой морозостойкостью, низкой фильтрационной и диффузионной проницаемостью, в том числе для агрессивных к стальной арматуре хлоридов [5].

С учетом этих работ для испытаний на стенде Кислогубской ПЭС изготовили образцы из бетона с добавками микрокремнезема, суперпластификатора С-3 и микрогазообразующей гидрофобизирующей добавкой 136-41 (ГКЖ-94). Образцы были установлены на стенд Кислогубской ПЭС в более позднее время. К моменту 50-летия станции образцы испытывались на стенде 25 лет. К этому времени они претерпели около 12 500 циклов замораживания и оттаивания. К моменту обследования образцы сохранили правильную геометрическую форму, шелушение поверхности и повреждение граней, углов и ребер отсутствовали, прочность превышала проектную в 1,7 раза [6].

Микроскопические исследования бетона ПЭС показали наличие равномерно распределенных по телу бетона и изолированных друг от друга сферических воздушных пор. Бетон обладал высокой прочностью и водонепроницаемостью, высокой морозостойкостью. Микроскопическими исследованиями обнаружены негидратированные клинкерные зерна цемента размером до 5 мкм, что обуславливает самозалечивание микротрещин в поздние сроки. Пористость бетона составила 2,73 %. Средний размер пор равнялся 40–60 мкм.

Термогравиметрическими исследованиями наличие в бетоне сульфата кальция и брусита $Mg(OH)_2$ не выявлено. Это свидетельствовало об отсутствии проникания в бетон сульфатов и магниезальных солей из морской воды и о низкой диффузионной проницаемости бетона для хлоридов.

НИИЭС в течение 22 лет испытывал на истирание льдом в губе Кислой плиты из бетона, который использовался для строительства здания ПЭС. Плиты были закреплены в зоне переменного горизонта – зоне истирания льдом. Истирания бетона льдом за этот период не отмечено. В докторской диссертации Т.Э. Уваровой [7] показано, что для предотвращения истирания бетона льдом необходимо, чтобы прочность бетона была не менее 70 МПа. Аналогичные результаты получены в исследованиях ряда зарубежных стран.

Защита стальной арматуры железобетонных конструкций ПЭС имеет первостепенное значение, учитывая небольшую толщину защитного слоя – 20 мм. Для гарантированного отсутствия коррозии арматуры предусмотрена катодная защита. Для этого использованы сменяемые каждые 10–12 лет металлические жертвенные электроды. Защитный потенциал был ограничен диапазоном от $-0,85$ до $-1,0$ В по хлорсеребряному электроду сравнения. Плотность поляризационного тока поддерживалась равной $0,04$ А/м². Система катодной защиты малозатратная, так как в качестве электродов использовался бросовый металлолом.

По истечении указанных 50 лет эксплуатации ПЭС следов коррозии арматуры в железобетонных конструкциях здания не обнаружено.

Биокоррозия железобетонных конструкций от воздействия живых организмов в северных морях неизвестна. Микробиологический анализ проб бетона, отобранных в Мурманской и Архангельской областях, выполненный Институтом экологии человека и гигиены окружающей среды, обнаружил бактерии и грибы, способные повреждать бетон, лишь в единичных пробах.

Предпринята попытка предупредить обрастание железобетонных конструкций водорослями и морскими организмами введением в бетон биоцидных добавок. Наибольший эффект подавления обрастания бетона с названными добавками был получен при использовании оловоорганических добавок – ластоноксов. Доклад о результатах испытаний был сделан во Владивостоке на конференции по биоповреждениям. Использование оловосодержащих соединений встретило возражение экологов. Было заявлено, что оловоорганические соединения опасны для морских организмов. По биологической цепочке от низших организмов к более крупным они могут передаваться рыбе и морским животным. От использования ластоноксов пришлось отказаться.

Проблема обрастания водоводов на Кислогубской ПЭС решена установкой электролизеров в водопропускных трубах. Электролизеры работали в режиме кратковременного включения. Выбранный режим работы электролизеров обеспечивал низкую концентрацию хлора в воде. Это исключало обрастание труб, но не наносило вреда микрофлоре в воде залива, что было установлено экологами.

На основе опыта строительства и эксплуатации Кислогубской ПЭС разработаны проекты более мощных ПЭС: Северной ПЭС в губе Долгой Баренцева моря, Мезенской ПЭС на Белом море и Тугурской ПЭС в Охотском море. Создан, перемещен на плавку и эксплуатируется с 2007 г. в составе Кислогубской ПЭС более мощный металлический наплавной ортогональный гидроагрегат как прототип для будущих мощных ПЭС.

Опыт строительства и транспортирования наплавных железобетонных конструкций использован при устройстве наплавных фундаментов при строительстве высоковольтной электропередачи через Каховское водохранилище, при строительстве защитной дамбы в Санкт-Петербурге и во многих зарубежных странах. В настоящее время за рубежом работает шесть приливных электростанций.

Заключение

28 декабря 1968 г. запущена первая в России приливная электростанция – Кислогубская ПЭС, сооруженная наплавным способом, что позволило существенно сократить продолжительность и стоимость строительства по сравнению с классическим способом «за перемычками».

На основе реализованных технических решений выполнены проекты Северной, Мезенской и Тугурской ПЭС, построены водопропускные сооружения Санкт-Петербургской дамбы для защиты от наводнений, наплавные фундаменты ЛЭП через Каховское водохранилище и типовая энергоблок малой Мезенской ПЭС.

Полувекковые натурные испытания доказали возможность получения бетонов марки по морозостойкости F1000 и более, стойких к истиранию льдом и в условиях приливной

зоны Арктики в Баренцевом море. Используемая технология позволяет неограниченно долго защищать водоводы ПЭС от обрастания.

Установлена экологическая чистота ПЭС, что позволяет придать территории статус национального парка с включением в находящийся на границе Лапландский заповедник.

Апробированные на Кислогубской ПЭС технологии (наплавное строительство и ортогональные машины) позволяют приступить к широкомасштабному использованию энергии прилива, потенциал которой оценивается в 4000 ГВт и совпадает с энергопотенциалом рек.

Описанный наплавной способ строительства из бетонов высокой морозостойкости может быть полезен при строительстве сооружений различного назначения на берегах сибирских рек и на побережье арктических морей. Бетонирование наплавных конструкций можно было бы выполнять в промышленно развитых районах в верховьях сибирских рек и сплавлять их к местам постоянной эксплуатации.

Список литературы

1. Бернштейн Л.Б. Схватка с приливом. Москва: ОАО «НИИЭС»; 2013.
2. Бернштейн Л.Б., Гаврилов В.Г., Гельфер С.Л., Супоницкий Л.И., Усачев И.Н. Кислогубская приливная электростанция. Москва: Энергия; 1972.
3. Усачев И.Н. Приливные электростанции и морские энергетические установки. Санкт-Петербург: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева; 2022.
4. Иванов Ф.М., Виноградова Э.А., Гладков В.С., Усачев И.Н. Морозостойкий бетон для морских сооружений. Бетон и железобетон. 1983;(3):40–41.
5. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С. Новые модифицированные бетоны. Москва: Парадиз; 2010.
6. Розенталь Н.К., Усачев И.Н., Галашов А.В. Долговечность железобетонного здания в Арктике. Технологии бетонов. 2014;(1):22–26.
7. Уварова Т.Э. Истирающее воздействие дрейфующего ледяного покрова на морские гидротехнические сооружения [диссертация]. Санкт-Петербург; 2016.

References

1. Bernshtein L.B. The battle with the tide. Moscow: JSC "NIIES"; 2013. (In Russian).
2. Bernshtein L.B., Gavrilov V.G., Gel'fer S.L., Suponitskii L.I., Usachev I.N. Kislogubskaya tidal power plant. Moscow: Energiya Publ.; 1972. (In Russian).
3. Usachev I.N. Tidal power plants and marine power plants. St. Petersburg: VNIIG named after B.E. Vedeneev; 2022. (In Russian).
4. Ivanov F.M., Vinogradova E.A., Gladkov V.S., Usachev I.N. Frost-resistant concrete for marine structures. Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete. 1983;(3):40–41. (In Russian).
5. Kapriellov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S. New modified concretes. Moscow: Paradis Publ.; 2010. (In Russian).
6. Rosenthal N.K., Usachev I.N., Galashov A.V. Durability of reinforced concrete buildings in the Arctic. Tekhnologii betonov = Technologies of concrete. 2014;(1):22–26. (In Russian).
7. Uvarova T.E. The abrasion effects of drifting ice cover on marine hydraulic structures [dissertation]. St. Petersburg; 2016. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Игорь Николаевич Усачев, канд. техн. наук, главный конструктор, «СПКTB «Мосгидросталь», трест «Гидромонтаж», Москва

Igor N. Usachev, Cand. Sci. (Engineering), Chief Designer, Mosgidrostral Special Design and Technological Bureau, Trest Gydromontazh JSC, Moscow

Николай Константинович Розенталь, д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительные сооружения, конструкции и материалы», АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: rosental08@mail.ru

Nikolai K. Rozental, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Department of Buildings, Structures, and Materials, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: rosental08@mail.ru

Галина Васильевна Чехний✉, канд. техн. наук, заведующий сектором коррозии бетона лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: chehniy@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-76-97

Galina V. Chekhniy✉, Cand. Sci. (Engineering), Head of Concrete Corrosion Section, Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: chehniy@mail.ru

tel.: +7 (499) 174-76-97

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author