

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА МОНОЛИТНЫХ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ВОДНОЙ СРЕДЕ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ ТЕМПЕРАТУРАМИ НА СТАДИИ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ



Гришин В. П.,
заслуженный деятель науки РФ,
доктор техн. наук, профессор,
ОАО «Союзморниипроект»



Эсаулов С. Л.,
доктор техн. наук, заслуженный
деятель науки РФ, профессор,
ОАО «Союзморниипроект»

Аннотация. В статье представлена методика расчета прогнозирования температурного режима бетонной кладки при возведении ее в водной среде с отрицательными температурами. В качестве иллюстрации рассмотрен проект мола-причала в районе г. Певека для базирования плавучего энергоблока, разработанный ОАО «Союзморниипроект».

Выполненные расчеты температурных режимов для различных вариантов бетонных смесей показали, что для получения проектной прочности бетона класса В35 через 28 суток для устройства конструкции мола-причала следует использовать бетоны класса по прочности на сжатие В60. Разработанная инженерная методика предназначена для прогнозирования температурного режима монолитных бетонных конструкций гидротехнических сооружений, возводимых в водной среде при отрицательных и положительных температурах, с учетом экзотермии при гидратации цемента с учетом применения различных противоморозных химических добавок.

Ключевые слова: гидротехническое строительство в водной среде с отрицательными температурами, оградительный мол-причал, противоледный пояс мола, температурный режим монолитных бетонных конструкций.

Abstract. The paper presents a forecasting calculation method for temperature conditions in concrete masonry work to be performed in the aquatic environment at subfreezing temperatures. This is illustrated using a project of a mole berth in the Pevek area, developed by JSC Soyuzmorniiproekt to serve as a basis for a floating power plant.

The calculations of temperature conditions for different variants of concrete mixes showed that getting design strength of the class B35 concrete in 28 days for the mole-berth construction requires concretes with the class B60 compressive strength. This engineering method is intended for forecasting temperature condition for concrete monolithic constructions of hydraulic structures, erected in the negative and positive temperatures of the water environment, taking into account exothermic process during cement hydration, including application of various antifreezing chemical admixtures.

Keywords: hydrotechnical construction in subfreezing temperatures of the aquatic environment, protective mole-berth, ice protection strake of mole, temperature condition of concrete monolithic constructions.

ОАО «Союзморниипроект» разработана проектная документация по объекту «Плавучая атомная тепловыделяющая установка (ПАТЭС) на базе плавучего энергоблока проекта 20870 с реакторными установками КЛТ-40С в г. Певеке Чукотского автономного округа».

Одним из основных требований по обеспечению надежной и безопасной эксплуатации плавучего энергоблока (ПЭБ) ПАТЭС является удержание его на месте стоянки. Эти функции выполняются комплексом гидротехнических сооружений, одним из которых является оградительный мол-причал, предназначенный для защиты внутренней акватории от волн и льда и имеющий Г-образную форму в плане. Геометрические характеристики оградительного мола: длина 546,8 м; ширина по верхнему строению 16,0 м; отметка верха бетонного строения +1,750 м.

Оградительный мол-причал по конструктивному исполнению представляет собой вертикальное сооружение. Кон-

струкция мола выполнена в виде прямоугольных ячеек из металлического шпунта корытного типа («Ларсен 5-УМ») с усилением (анкерной связью) из трубношпунта $\varnothing 820 \times 10$ мм. Шпунтовая стенка соединяется замками с анкерными сваями $\varnothing 820 \times 10$. Длина ячейки (шаг рядовых поперечных шпунтовых стенок вдоль оси мола-причала) составляет 20,9 м. Отметка глубины забивки шпунтовых свай переменная по длине сооружения и изменяется от отметки $-9,500$ м до $-17,500$ м.

Со стороны внешней акватории вдоль лицевой шпунтовой стенки отсыпана берма из камня массой 40–100 кг, шириной 19,0 м, толщиной слоя 1,0 м, которая защищает грунт перед лицевой шпунтовой стенкой от размыва.

Верхнее строение мола выполнено в виде монолитной железобетонной плиты толщиной 0,75 м. В районе швартовых палов толщина плит составляет 1,5 м.

Конструктивное решение мола-причала представлено на рис. 1 и 2.

Средняя продолжительность периода с положительными температурами составляет 118 дней (в среднем с 25 мая по 21 сентября). Среднесуточная температура в период с положительными температурами составляет +6 °С, в период с отрицательными температурами — -19 °С. В теплый период года среднесуточная температура не поднимается выше 15,5 °С — с обеспеченностью 0,95, выше 17,7 °С — с обеспеченностью 0,98.

Температура морской воды в Чаунской губе характеризуется следующими показателями: с ноября по апрель характерна стабильная температура $-1,5 \pm 0,4$ °С по всей толще воды на всей рассматриваемой акватории. В мае начинается прогревание поверхностного слоя воды, которое достигает максимума к августу, когда температура составляет в среднем +2...+4 °С (по данным ГМС Айон). К концу октября поверхностный слой воды остывает до зимних значений. Более глубокие слои воды весь год находятся при той же температуре, что и зимой. В теплые годы летнее прогревание сильнее обычного: по данным ГМС Айон, возможно прогревание до +10...+11 °С (в отдельные дни до плюс +15...+16 °С). В то же время в холодные годы среднемесячные температуры могут составлять не выше 0 °С. В бухте и проливе Певек вода прогревается сильнее, чем в среднем по акватории Чаунской губы. По данным ГМС Певека, к августу морская вода прогревается в среднем до +7...+8 °С (в отдельные годы до +9...+12 °С), а хотя бы в один день в году температура обычно превышает +11 °С. И даже в самые холодные годы вода прогревается до +2,9 °С.

Одной из характеристик морской воды является ее соленость, которая для Чаунской губы составляет около 27‰ (с колебаниями не более 1‰) по всей толще воды и всей акватории. У берегов вода менее соленая — 19–23‰ (ГМС Айон и Певек). Минимальная средняя соленость достигается в июле и составляет в Чаунской губе в среднем 20‰. При этом возможны отклонения от этих значений более чем на 3‰. У берегов, в связи с более ранним началом распределения, минимум солености может достигаться в июне.

При проведении теплотехнических расчетов в монолитном противоледном бетонном поясе температура морской воды для зимнего периода принимается равной $t_{w-} = -4$ °С, а для стадии эксплуатации периода 118 суток — с положительными температурами — $t_{w+} = +7$ °С.

Противоледный пояс представляет собой прямоугольную бетонную призму размерам 20,9×15,0×3,75 м. Подошва бетонного блока расположена на верхнем обрезе песчано-гравийной засыпки, расположенной во внутренней полости, об-

разованной вертикальными элементами из шпунта корытного типа. К моменту кладки бетонной смеси в конструкцию температура металлического шпунта засыпки принимает температуру морской воды. Таким образом, на вертикальных и горизонтальных гранях противоледного пояса после укладки бетонной смеси в течение нескольких часов устанавливается температура равная -4 °С в течение расчетного времени — 28 суток.

Для поддержания положительной температуры в твердеющей бетонной смеси предлагается использовать два основных технологических приема. Первый — бетонную смесь, укладываемую в конструкцию, следует подавать к месту укладки подогретой до температуры 20–25 °С. Второй — цементы при гидратации выделяют тепловую энергию, которую следует использовать для поддержания в теле конструкции положительной температуры. В качестве расчетного критерия принимается температура твердеющей бетонной смеси не ниже $t_{cr} \geq -0,0$ °С (минус нуль градусов Цельсия).

Расчет изменения температур в бетонной призме производится предварительно для трех вариантов: первый — без учета экзотермии; второй — с учетом экзотермии без химических добавок; третий — с учетом экзотермии при введении химической добавки НКМ (нитрат кальция с мочевиной в количестве 6% от массы цемента), т. к. при использовании этой добавки, согласно «Руководству по бетонированию фундаментов и коммуникаций в вечномерзлых грунтах с учетом твердения бетона при отрицательных температурах» [8], имеет место максимальное удельное тепловыделение портландцемента.

При выполнении теплотехнических расчетов в теле прямоугольной бетонной призмы принимается состав бетонной смеси, представленный в **табл. 1**.

Теплотехнические характеристики монолитного бетона и песчано-гравийной смеси представлены в **табл. 2**.

Коэффициент теплопроводности промерзающего бетона зависит от количества содержащейся в его капиллярах и порах свободной влаги. При понижении температуры вода и водяной пар переходят из жидкого и газообразного состояния в твердую фазу. Причем она (твердая фаза) характеризуется двумя формами состояния: первая — непосредственно лед; вторая — иней. Такие фазовые превращения приводят к тому, что коэффициент теплопроводности бетонов изменяется при отрицательных температурах в достаточно широком диапазоне. Это обусловлено такими показателями, как: коэффициент теплопроводности инея $\lambda_{иней} = 0,1 \dots 0,15$ Вт/(м·°С); коэффициент теплопроводности льда $\lambda_{лед} = 2,0 \dots 2,2$ Вт/(м·°С);

№ п/п	Составляющие бетонной смеси	Размерность составляющих бетонной смеси	
		в кг на 1 м ³	в литрах на 1 м ³
1	Цемент М500	440,0	440/3,15 = 140,0
2	Песок	548,0	548/2,70 = 203,0
3	Щебень	1245,0	1245/2,65 = 470,0
4	Вода	170,0	170,0
5	Добавка НКМ (нитрат кальция с мочевиной) 6% от массы цемента	26,4	26,4/1,938 = 13,6
	ИТОГО:	2 440,4 кг/м ³	1000,60 л

Табл. 1. Состав бетонной смеси для устройства противоледного пояса

№ п/п	Теплотехнические характеристики	Размерность	Монолитный бетон, В35	Песчано-гравийная смесь
1	Плотность	кг/м ³	2400,0	2000,0
2	Теплопроводность	Вт/(м·°C)	1,86	2,72
3	Удельная теплоемкость	Дж/(кг·°C)	840,0	1344,0
4	Температуропроводность	м ² /сут	3,321·10 ⁻³	3,643·10 ⁻³
5	Удельное тепловыделение Q ₀₂ портландцемента М500 без химических добавок	Дж/кг	42·10 ³	—
6	Удельное тепловыделение Q ₀₃ портландцемента М500 с химической добавкой НКМ — 6%	Дж/кг	47·10 ³	—
7	Коэффициент снижения интенсивности экзотермии (k)	1/сут	0,020	—

Табл. 2. Теплотехнические характеристики бетона и скального грунта

коэффициент теплопроводности воды (при нормальных условиях) $\lambda_{\text{вода}} = 0,58 \dots 0,645$ Вт/(м·°C). В зависимости от соотношения соответствующих фаз воды коэффициент теплопроводности может снижаться в случае, если преобладают иней и жидкая влага, и возрастать в случае формирования льда. Поэтому решение теплотехнических задач при охлаждении и промерзании строительных материалов связано с изучением фазового состава влаги.

Необходимо отметить, что при бетонировании конструкций в водной среде происходит насыщение бетона водой. Для практических инженерных расчетов принимается предположение, что при воздействии на бетонную смесь отрицательных температур в нем не происходит формирование льда. Температура воды понижается до температуры морской воды, но она сохраняется в виде жидкой фазы. Коэффициент теплопроводности бетона принимается равным $\lambda_{\text{бетон}} = 1,86$ Вт/(м·°C), коэффициент температуропроводности $a_{\text{бетон}} = 3,321 \cdot 10^{-3}$ м²/час.

Расчетная модель для выполнения расчетов по прогнозированию температурных полей в теле прямоугольной бетонной призмы, твердеющей в морской воде с отрицательной температурой $t_{w-} = -4$ °C, принимается в виде неограниченной пластины. Между водной средой и наружными поверхностями происходит теплообмен, который задается граничными условиями третьего рода. При твердении бетонной смеси в результате гидратации цемента происходит выделение экзотермического тепла, характеризующееся удельным тепловыделением Q_{0i} (Вт/кг), которое зависит от марки портландцементов, применяемых химических добавок, температуры и времени твердения. При определении температур в теле бетонной призмы на стадии строительства расчетный период времени принимается равным $\tau = 28$ суток.

При проведении теплотехнических расчетов с учетом технологии бетонирования тела конструкции противоледного пояса толщина слоя укладываемой бетонной смеси принимается равной не более $h_{\text{min}} \leq 1,5$ м. Это значение бетонного слоя обусловлено сохранением в процессе выполнения бетонных работ проектного положения металлического шпунта корытного типа, образующего ячейки мола-причала.

Математическая модель для определения температуры в теле прямоугольной бетонной призмы с учетом действующего внутреннего источника тепла, распределенного по объему конструкции во времени, представляется в следующем виде [9]:

$$\partial t(x, \tau) / \partial \tau = \alpha \cdot \partial^2 t(x, \tau) / \partial x^2 + W / (c_0 \cdot \rho), \quad (1)$$

где $t(x, \tau)$ — функция изменения температуры в теле конструкции во времени, °C; x — расчетная координата конструкции, м; α — коэффициент температуропроводности бетона, м²/час; τ — текущее время, сут; W — удельная мощность внутреннего источника тепла, равномерно распределенного по объему конструкции (скорость экзотермии гидратации цемента при твердении бетонной смеси), Вт/м³, принимается по экспоненциальному закону $W = W_0 \cdot \exp(-k \cdot \tau)$; k — коэффициент, характеризующий скорость экзотермической реакции, $k = 0,2$; c_0 — удельная теплоемкость влажного бетона, кДж/(кг·°C), $c_0 = 0,840$ кДж/(кг·°C); ρ — плотность бетонной смеси, кг/м³, $\rho = 2400$ кг/м³.

Начальные условия (температура бетонной смеси во время укладки в конструкцию) принимаются в следующем виде:

$$t(x, 0) = t_{b0} = 20 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

Граничные условия между поверхностью тела и внешней средой (морская вода с температурой $t_{w-} = -4$ °C) определяются как:

$$-\partial t(R, \tau) / \partial x + H \cdot [t_w - t(R, \tau)] = 0, \quad (3)$$

где H — относительный коэффициент теплообмена между поверхностью тела и внешней средой, для водной среды принимается $H \approx 133,3$ 1/м, т. е. при контакте конструкции с водой температура ее поверхности становится равной $t_{\text{пов}}(\tau) \approx t_{w-} = -4$ °C.

Обобщенное решение задачи приведено в работе А. В. Лыкова [9].

Результаты теплотехнических расчетов по прогнозированию температур режима в бетонном блоке, расположенном в морской воде, представлены на рис. 3, 4, 5.

На рис. 3 представлены графики изменения температуры в бетонном блоке толщиной $h = 1,5$ м при использовании цемента марки М 500 без учета экзотермических процессов (вариант № 1) при начальной температуре бетонной смеси $t_{b0} = +20$ °C.

Расчеты показывают, что в теле бетонного блока положительная температура сохраняется в центральной его части в течение 6 суток. После этого времени температура понижается ниже 0 °C. Наличие высокой концентрации солей в воде затвердения бетонной смеси обеспечивает сохранение жидкой фазы. В подобных условиях твердения бетон в теле конструкции в течение 28 суток набирает до 20% проектной прочности.

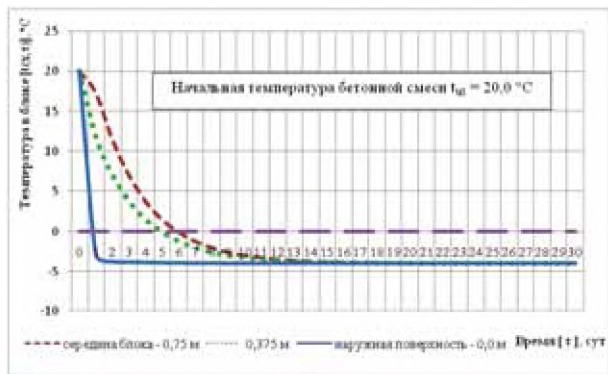


Рис. 3. Изменение температуры в бетонном блоке толщиной $h = 1,5$ м без экзотермии (цемент М 500), твердеющем в течение 30 суток в морской воде с постоянной отрицательной температурой $t_{w-} = -4,0$ °C (вариант № 1)

На рис. 4 и 5 представлены графики изменения температуры в бетонном блоке толщиной $h = 1,5$ м при использовании цемента марки М 500. На рис. 4 в составе бетонной смеси отсутствуют химические добавки (вариант № 2), а на рис. 5 в состав бетонной смеси введена комплексная добавка НКМ в количестве 6% от массы цемента (вариант № 3).

Расчеты показывают (рис. 4, 5), что в теле бетонного блока положительная температура сохраняется в центральной его части в течение семи суток. После этого времени температура понижается ниже 0 °C. В подобных условиях твердения бетон в теле конструкции в течение 28 суток набирает до 25% проектной прочности.

Поэтому эффект от применения в составах бетонных смесей различных противоморозных химических добавок не оказывает существенного влияния на температурный режим твердеющей бетонной смеси. Экзотермический эффект при гидратации цемента позволяет не более чем на одни сутки продлить срок поддержания в бетонном блоке положительной температуры в середине блока. При этом за расчетный период 28 суток бетон набирает прочность до 20% от проектной прочности без учета экзотермии, а при учете экзотермии за тот же промежуток времени прочность бетона составит порядка 25%. Таким образом, для всех рассмотренных вариантов бетонной смеси получить проектную прочность бетона в течение 28 суток не удастся.

Для реализации проектных значений прочности бетона на осевое сжатие В35 следует использовать бетоны повышенной прочности, которые за расчетное время 28 суток набирают прочность, соответствующую проектному значению. Например, для устройства противоледного пояса мола-причала целесообразно первоначально рассматривать бетоны по классам порочности на осевое сжатие не ниже В60.

Наряду с исследованием теплового режима бетонной смеси на стадии ее твердения следует рассмотреть температурный режим бетонного блока в период эксплуатации при положительных температурах. Для района г. Певека такой период составляет 118 суток. Температура воды, по климатическим наблюдениям, составляет порядка 7 °C. Проектные размеры бетонного блока $20,9 \times 15,0 \times 3,75$ м. Он полностью расположен в водной среде с постоянной положительной температурой $t_{w+} = +7,0$ °C. Расчет изменения температуры



Рис. 4. Изменение температуры в бетонном блоке толщиной $h = 1,5$ м без химических добавок с экзотермией (цемент М 500), твердеющем в течение 30 суток в морской воде с постоянной отрицательной температурой $t_{w-} = -4,0$ °C (вариант № 2)



Рис. 5. Изменение температуры в бетонном блоке толщиной $h = 1,5$ м с химической добавкой НКМ (нитрат кальция с мочевиной в количестве 6%, цемент М 500), твердеющем в течение 30 суток в морской воде с постоянной отрицательной температурой $t_{w-} = -4,0$ °C (вариант № 3)

в бетонном блоке на стадии эксплуатации при положительной температуре водной среды представлен на рис. 6.

Проведенные расчеты свидетельствуют о том, что при наступлении теплого периода происходит нагревание бетонного блока. Время прогрева бетонного блока до положительных температур составляет порядка 105 суток. В течение теплого периода наружные слои бетонного блока, охлажденные в зимний период, набирают прочность до 80% от проектного значения. При использовании бетонов повышенной прочности, например, класса по прочности на сжатие В60, прочность бетона в первый год эксплуатации превысит проектное значение В35.

Обсуждение результатов

В статье представлена методика расчета прогнозирования температурного режима бетонной кладки при возведении ее в водной среде с отрицательными температурами. В качестве иллюстрации рассмотрен проект мола-причала в районе г. Певека для базирования плавучего энергоблока, разработанный ОАО «Союзморнипроект».

Исследования проводились для оценки возможности применения «холодного бетона» для устройства монолитной железобетонной конструкции мола-причала, возводимой в морской воде с постоянной отрицательной температурой $t_{w-} = -4,0$ °C. Для этих целей были рассмотрены три варианта экзотермических процессов, обусловленных гидратацией



Рис. 6. Изменение температуры в бетонном блоке толщиной $h = 3,75$ м в течение 150 суток в морской воде с постоянной положительной температурой $t_{w*} = +7,0$ °C.

цемента: первый вариант — химические добавки не применяются и экзотермия отсутствует; второй вариант — химические добавки не применяются и экзотермия учитывается; третий вариант — применяется химическая добавка НКМ (нитрат кальция с мочевиной) в количестве 6% от массы цемента. Толщина укладываемого слоя бетонной смеси составляет $h = 1,5$ м. Начальная температура бетонной смеси принимается $t_{b0} = +20,0$.

Выполненные расчеты температурных режимов для различных вариантов бетонных смесей показали, что в зимний период бетонирования монолитной конструкции противоледного пояса при отрицательной температуре водной среды при толщине укладываемого слоя бетона толщиной $h = 1,5$ м и начальной температуре бетонной смеси $t_{b0} = 20$ °C положительная температура в теле конструкции сохраняется от шести суток — без учета экзотермии, и до семи суток — при учете экзотермии. За расчетные период твердения 28 суток прочность бетона составит от 20 до 25% от проектного значения В35. Поэтому для получения проектной прочности бетона класса В35 через 28 суток для устройства конструкции мола-причала следует использовать бетоны класса по прочности на сжатие В60.

Дополнительно были выполнены расчеты температурного режима бетонного блока толщиной $h = 3,75$ м при положительной температуре воды равной $t_{w*} = +7,0$ °C за расчетный период 118 суток. Исследования показали, что в течение 105 суток в бетонном блоке температура повышается более 0 °C. Постоянная положительная температура водной среды и прогрев бетона способствуют продолжению гидратации цемента охлажденной бетонной смеси, что приводит к дальнейшему нарастанию прочности бетона в теле конструкции мола-причала.

Разработанная инженерная методика предназначена для прогнозирования температурного режима монолитных бетонных конструкций гидротехнических сооружений, возводимых в водной среде при отрицательных и положительных температурах, с учетом экзотермии при гидратации цемента с учетом применения различных противоморозных химических добавок. При выполнении теплотехнических расчетов рассмотрена комплексная химическая добавка НКМ (нитрат калия с мочевиной), т. к. при ее применении экзотермическая реакция сохраняется при отрицательных температурах до -10 °C и имеет высокие показатели удельного тепловыделения по сравнению с другими противоморозными химическими комплексами [8].

Литература

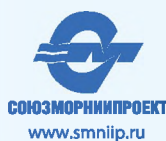
1. РД 31.31.55-93 Инструкция по проектированию морских причальных и берегоукрепительных сооружений.
2. СП 52-105-2009 Железобетонные конструкции в холодном климате и на вечномерзлых грунтах.
3. ГОСТ 5781-82 Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия.
4. ВСН 5-84 Применение природного камня в морском гидротехническом строительстве.
5. ГОСТ 8267-93 Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия.
6. РД 31.31.23-81 Руководство по проектированию узких насыпных пирсов и палов с учетом арктических условий.
7. Руководства по производству бетонных работ в зимних условиях, районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера/ ЦНИИОМТП Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1982. 213 с.
8. Руководству по бетонированию фундаментов и коммуникаций в вечномерзлых грунтах с учетом твердения бетона при отрицательных температурах/ НИИ бетона и железобетона Госстроя СССР. — М.: Стройиздат, 1982. — 162 с.
9. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Государственное изд-во технико-теоретической литературы, 1952. 392 с. 10.

ОАО «Союзморниипроект» планирует проведение в различных регионах России цикла семинаров и научно-практических конференций по актуальным вопросам проектирования объектов инфраструктуры морского транспорта.

В сентябре-октябре 2015 г. (дата уточняется) в Санкт-Петербурге состоится первая научно-практическая конференция по теме: **«Морская арктическая инфраструктура: особенности проектирования морских гидротехнических сооружений. Актуальные вопросы применения конструкционных материалов в гидротехническом строительстве»**, на которой планируется обсудить следующие вопросы:

- Проектирование морских ГТС в условиях Арктики.
- Нормативно-методическое обеспечение проектирования морских ГТС.
- Строительные технологии, материалы и конструкции для возведения морских ГТС в Арктике.
- Вопросы подбора состава бетона и технологии бетонирования конструкций ГТС (под водой и в переменном уровне) в условиях отрицательных температур воздушной и морской среды.
- Современные виды арматуры и ее соединений в гидротехническом строительстве.
- Особенности применения конструкций ГТС из шпунтов в условиях Арктики.

Приглашаем заинтересованные организации для участия в конференции.



Контакты оргкомитета:
 ОАО «Союзморниипроект»,
 (499)152-36-51,
 e-mail: smniip@smniip.ru — заместитель
 генерального директора по научной работе
 Владимир Петрович Гришин