

**ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ  
СТРОИТЕЛЬСТВО,  
ГИДРАВЛИКА  
И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ**



УДК 627.52:624.139

Г.И. КУЗНЕЦОВ, Н.В. КРУК

**МЕРЗЛЫЕ СООРУЖЕНИЯ НА ПРИБРЕЖНОМ ШЕЛЬФЕ  
В РАЙОНАХ НЕФТЕГАЗОДОБЫЧИ НА КРАЙНЕМ СЕВЕРЕ**

Предлагается способ устройства защитных, причальных и ограждающих сооружений на прибрежных и шельфовых территориях Крайнего Севера. Способ отличается использованием известных, проверенных на практике и экологически безопасных технических решений в новом, более эффективном сочетании без применения энергозатратных технологий. Основу предполагаемой конструкции составляют внешняя подпорная стена уголкового типа и мерзлотная завеса, создаваемая однорядной системой термосифонов. Образующееся при этом сооружение вмораживается в укрепляемое сооружение.

К л ю ч е в ы е с л о в а: защитная дамба, вечномёрзлый грунт, замораживание, термосифон, мерзлотная завеса.

DOI 10.32683/0536-1052-2019-724-4-64-73

Сооружения из местных материалов – грунта, камня, льда – начали использовать для освоения шельфа раньше чем сооружения из стали и бетона. Они не потеряли своего значения и в современных условиях, получив в связи с прогрессом в области строительной техники распространение в новых, более суровых по климату районах [1].

**Известные технические решения. Защитные дамбы.** Прибрежные грунтовые сооружения возводят на малых глубинах, обычно до 5 м, и на акваториях с умеренным волнением – при высоте волн до 1,5–2 м. Их достоинства – относительно малая стоимость, простота возведения, высокая степень механизации работ при строительстве.

Наиболее распространенными на шельфе являются дамбы (рис. 1). Они предназначены для транспортной связи с буровыми площадками, расположенными на уширениях дамбы, для ограждения прибрежного участка шельфа при намыве искусственной территории или осушения площадки под новую территорию. В зависимости от назначения дамбы получают различную конфигурацию поперечного сечения. Откосы, обращенные в сторону моря, устраивают более пологими и защищают от размыва наброской камня. Дамбы, по которым осуществляется транспортная связь с буровыми площадками, делают более широкими, чем дамбы для обвалования искусственной территории. Откосы сооружений, предназначенных для эксплуатации в течение

© Кузнецов Г.И., Крук Н.В., 2019

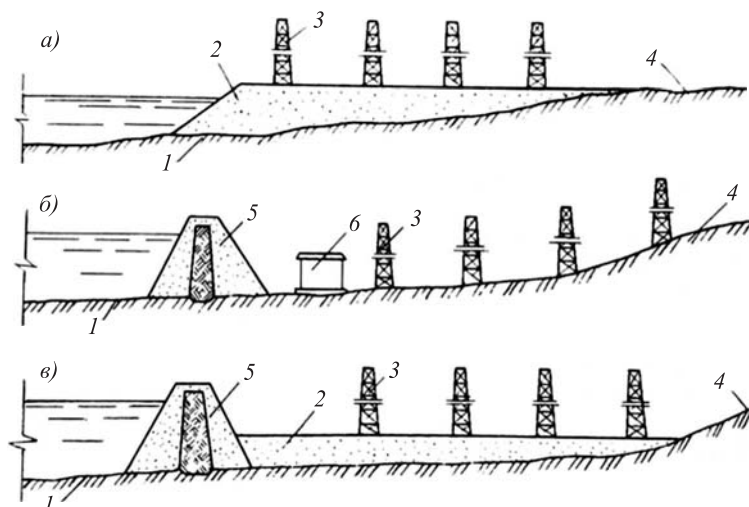


Рис. 1. Прибрежные грунтовые сооружения: насыпи под искусственные территории (а) и напорные дамбы для защиты осушаемых участков морского дна (б, в)

1 – дно моря; 2 – грунтовая отсыпка; 3 – буровая вышка; 4 – берег; 5 – напорная дамба с противофильтрационным ядром; 6 – станция водоотлива

1–2 лет (например для разведочного бурения), укрепляют в меньшей степени или вообще не укрепляют.

Образование территорий путем осушения дна за ограждающими дамбами применяется при несколько больших глубинах (до 7 м), но требует значительных средств на обеспечение постоянного водоотлива. Ограждающие дамбы должны иметь водонепроницаемое ядро (экран) и достаточно большую ширину, предохраняющую их от размыва, а котлован – от затопления.

*Мерзлые острова.* Эти сооружения не имеют сухопутной связи с берегом и возводятся на относительно более значительных глубинах и расстояниях от берега. Тело сооружения выполняют из местных материалов (песок, гравий, камень, лед), которые отсыпают (или намывают) непосредственно на морское дно. В зависимости от назначения, тяжести ледовых и волновых условий, наличия местных материалов и глубины моря принимают разные размеры рабочей площадки острова и различные средства защиты его по внешнему контуру [2].

Грунтовые острова возводят большей частью на глубинах до 10 м, хотя есть единичные примеры, когда глубина моря в месте сооружения острова составляла 15 и даже 19 м. Выбор материала тела острова определяется прежде всего местными ресурсами. Дальность перемещения грунта очень сильно влияет на стоимость сооружения. В арктических районах шельфа, где навигационный период составляет всего 2–4 мес в году, удаленность источника грунта даже на 10 км может привести к решению о нецелесообразности возведения острова. Для защиты откосов (рис. 2) используют мешки из синтетической ткани, наполненные песком или гравием, вместимостью от 2 до 4 м<sup>3</sup>. Мешки укладывают в один или два слоя на откос. Из мешков выкладывают банкеты в массиве острова, в некоторых случаях на значительной части, или применяют габионы.

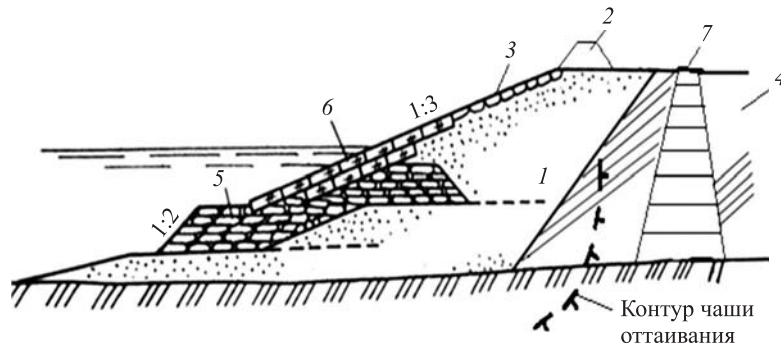


Рис. 2. Профиль береговой части защитной дамбы искусственного острова (или полуострова) на вечномёрзлом основании  
 1 – гравий, ПГС, песок; 2 – парапет; 3 – каменная наброска; 4 – тело дамбы (дамбы талого типа с традиционным противофильтрационным ядром или дамбы мерзлого типа с мерзлотной завесой); 5 – мешки с гравием; 6 – габионы; 7 – мерзлое противофильтрационное ядро

В качестве ограждающих конструкций [1] используют железобетонные массивы, металлические понтоны и шпунтовые ячейки (рис. 3), скрепленные друг с другом и образующие в плане замкнутый многоугольник. Ограждением могут быть также и корпуса списанных судов, заполняемые грунтом. Массивы и понтоны доставляют к месту установки на плаву или на полупогружных баржах. На месте погружения секции ограждения соединяют между собой, балансируют водой и опускают на выровненное дно или отсыпанную постель.

Острова, намораживаемые на дне, используются главным образом для разведочного бурения при малых глубинах (вблизи берегов или на отмелях). Начать сооружение острова можно на естественном припайном льду в пределах заданной площадки, оконтуренной снежным валом, досками или другими простыми средствами. Морскую воду наливают слоями по 2–5 см или

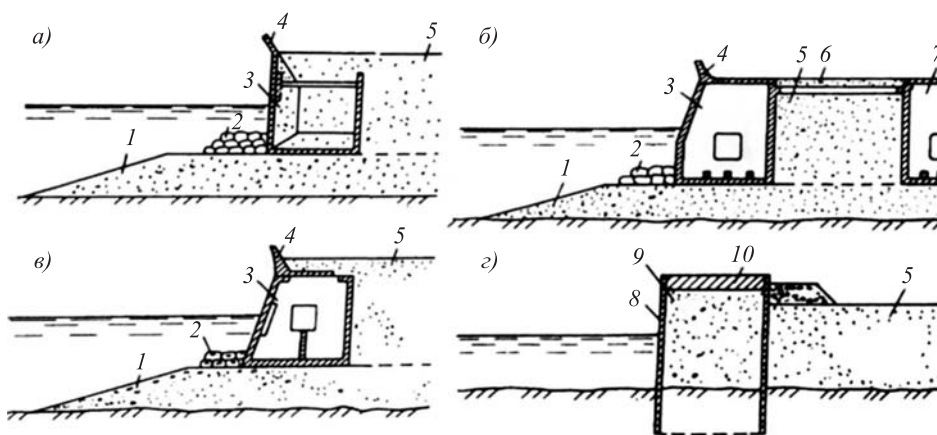


Рис. 3. Искусственные острова с ограждением из железобетонных массивов (а–в) и шпунтовых ячеек (г)

1 – постель из песка или гравия; 2 – кладка из мешков с гравием или габионов; 3 – железобетонный массив; 4 – волноотбойная стенка; 5 – массив острова; 6 – настил; 7 – промежуточный массив; 8 – шпунт; 9 – засыпка ячеек; 10 – бетонное покрытие

непрерывно набрызгивают. По мере возрастания намороженной массы площадка постепенно погружается в воду, пока не сядет на дно. Намораживание осевшей на дно льдины позволяет поднять отметку верха острова над уровнем моря и набрать массу, достаточную для устойчивости от сдвига к началу подвижек ледовых полей.

Рост толщины льда зависит от температуры наружного воздуха. При температуре  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  можно намораживать за сутки слой в 6–9 см. При распылении воды в воздухе над льдиной намораживание происходит быстрее, но лед получается менее прочный. Применяются упрочняющие наполнители льда в виде обрезков канатов, тросов и т.д., разбрасываемых по поверхности намораживаемого острова. Существует схема более быстрого и менее зависимого от температуры воздуха намораживаемого острова – с помощью разветвленной системы труб, по которым подается хладагент. Эти трубы служат затем в качестве арматуры в ледяном массиве острова.

**Предлагаемое техническое решение.** Намораживаемые острова и причалы предназначаются обычно для односезонного использования. Тем не менее делаются попытки сохранить такие острова в течение нескольких сезонов с помощью обсыпки грунтом, теплоизоляции пенопластовыми плитами, искусственного замораживания и др. В целом имеются различные возможности для создания новых способов устройства искусственных островов и берегоукрепления в Арктике. Один из таких способов предложен ранее [2] при решении задачи обеспечения повышенной надежности защитных дамб в сложных мерзлотно-геологических условиях для строительства причалов, при формировании прибрежных территорий, в частности полуостровов, оснований нефтепроводов и др.

В данной статье предлагается новое решение устройства защитного подпорного сооружения на льдонасыщенном участке берега при укреплении и возведении причальных и островных сооружений. Схематический план защитного и ограждающего сооружений и общий вид укрепляемого берегового массива показаны на рис. 4 и 5, конструктивная схема дана на рис. 6.

Сооружение включает в себя внешнюю подпорную стену углового типа и мерзлотную завесу, образуемую однорядной системой термосифонов [2, 3], преимущественно жидкостных, расположенную за подпорной стеной. Пространство между ней и сохраняемым естественным льдистым берегом заполняется грунтом обратной засыпки, промораживаемым в пределах мерзлотной завесы. Определенная часть промороженного грунта мерзлотной завесы включает в себя фундаментную плиту угловой подпорной стенки. Таким образом, защитное сооружение надежно вмораживается в укрепляемый берег или становится ограждающей частью острова (полуострова, причала и т.д.).

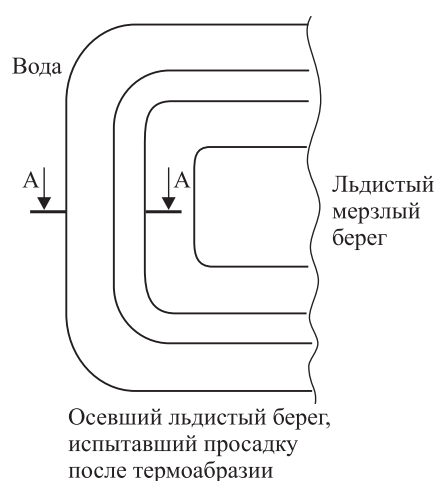


Рис. 4. Схема формирования полуострова с мерзлотной завесой в теле и в основании защитной дамбы



Рис. 5. Термокарст, термоэрозия и термоабразия льдонасыщенного берегового массива на севере Якутии (фото В.В. Куницкого)

Фундаментная часть уголкового стены [4], развитая в тыловую (рис. 7) (внутреннюю) сторону и нагруженная весом грунта обратной засыпки, обеспечивает устойчивость стены и всей подпорной конструкции в целом.

Основными нагрузками на эту стену являются вертикальное давление  $G$  (вес грунта обратной засыпки) и боковое давление этого грунта  $E$ . От суммарного воздействия этих нагрузок давление на подошве фундамента должно быть равномерным, растягивающее напряжение в случае отрыва бетонной фундаментной плиты от основания не допускается. Исходя из этого требования, ширина тыловой части фундаментной плиты назначается по формуле

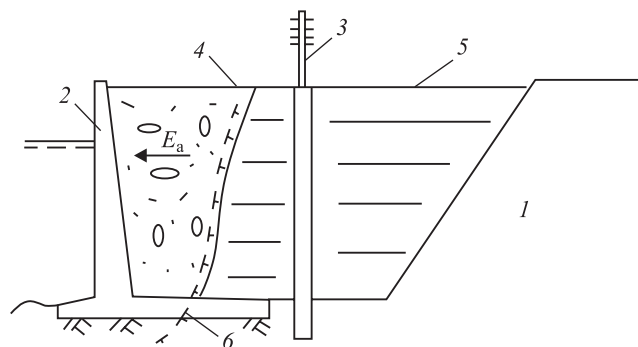


Рис. 6. Конструктивная схема подпорного сооружения  
 1 – естественный льдистый берег (для варианта острова – грунт, заполняющий тело острова); 2 – подпорная стена; 3 – термосифоны; 4 – обратная засыпка (внешняя талая часть); 5 – обратная засыпка (промороженная внутренняя часть); 6 – граница раздела талого и мерзлого массива;  $E_a$  – активное давление талого грунта на вертикальную часть подпорной стены

$$\alpha_T = l(1 + 4K) \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) H, \quad (1)$$

где  $K = \frac{\alpha_{\text{п}}}{\alpha_T}$ , назначенное в пределах

0,25–0,4;

$\varphi$  – угол внутреннего трения грунта;

$H$  – высота стенки.

Полная ширина плиты  $\alpha$  должна быть равной 0,5–0,7  $H$ . При наличии слабых грунтов и грунтовых (талых) вод принимают большее значение  $\alpha$ . При одностороннем давлении грунта и воды величина  $\alpha$  может быть увеличена до 0,9  $H$ .

Активное боковое давление грунта на 1 пог. м вертикальной части бетонной стенки вычисляется по формуле

$$E_\alpha = 0,5\gamma H_a \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right). \quad (2)$$

Параметры мерзлотной завесы [5, 6], располагаемой за фундаментной плитой бетонной подпорной стенки, устанавливаются следующим образом.

Определяем радиус одиночного мерзлого цилиндра, получаемого за первый зимний сезон охлаждения [7].

Расчет динамики роста цилиндра мерзлого грунта вокруг воздушной замораживающей колонки (термосифона) основан на следующих допущениях:

– Промораживаемый массив отсыпан из однородного грунта. Начальная положительная температура грунта, его влажность, плотность и теплофизические свойства осредняются по высоте, длине и ширине массива.

– Средняя по высоте наружной поверхности подземного теплообменника замораживающей колонки (термосифона) постоянна в течение периода зимнего охлаждения.

– Процессы теплообмена колонки и грунта рассматриваются только в горизонтальной плоскости; тепловые потоки направлены по радиусу колонки термосифона и образуемого ею мерзлого цилиндра.

– Температура замерзания грунта принимается равной 0 °С.

– Фильтрация и обусловленный ею конвективный теплообмен в пределах мерзлотной завесы отсутствуют.

– Все тепло, выделяющееся при охлаждении растущего мерзлого цилиндра и окружающего его талого массива грунта, сосредоточено на границе промерзания, т. е. на внешнем контуре мерзлого цилиндра.

– Неустановившийся температурный режим рассматривается как последовательная смена стационарных состояний.

Совместная работа колонок (термосифонов) в мерзлотной завесе и их взаимное тепловое влияние не учитываются (что несколько уменьшит фактическое время промораживания).

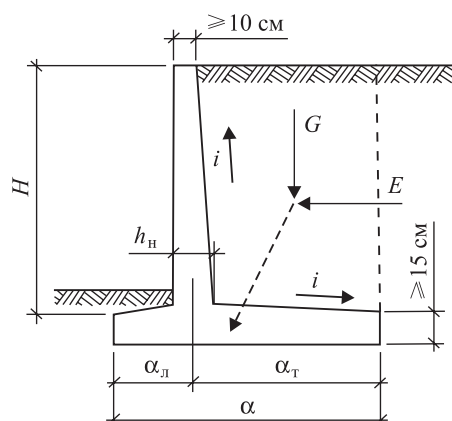


Рис. 7. Угловая подпорная стена

Радиус мерзлотного цилиндра вычисляется по формуле, применяемой для практических целей

$$R_1 = \sqrt[3]{\frac{3\tau_1 t_k r_k \lambda_m}{q}} + 0,5r_k, \quad (3)$$

где  $R_1$  – радиус мерзлотного цилиндра за первый зимний период охлаждения, м;

$\tau_1$  – продолжительность первого зимнего периода охлаждения, ч;

$t_k$  – средняя по высоте дамбы температура внешней поверхности подземного теплообменника колонки за период охлаждения, °С;

$r_k$  – внешний радиус подземного теплообменника, м;

$\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, ккал/(м · ч · град.);

$q$  – количество тепла, выделяющееся при замерзании 1 м<sup>3</sup> грунта от  $t_{нач}$  до  $t_{пр}$  и отводимое колонкой или термосифоном, определяется по зависимости

$$q = \rho W_o = 80\,000 W_c \gamma_{ск}, \quad (4)$$

где  $W_o$  – объемная влажность  $W_o = W_c \gamma_{ск}$ ;

$W_c$  – суммарная весовая влажность, доли единицы;

$\gamma_{ск}$  – объемный вес скелета грунта, т/м<sup>3</sup>;

$\rho$  – скрытая теплота плавления льда, равная 80 ккал/кг.

При длительном промораживании в течение двух и более зимних периодов зависимость между продолжительностью охлаждения, радиусом мерзлотного цилиндра и другими данными можно определить по зависимости [8]:

$$\tau = \frac{\rho W_o + t_{нач} C_T - 0,33 t_k C_M}{4 t_k \lambda_m} A, \quad (5)$$

$$A = \left( 2R_2^2 \ln \frac{R_2}{r_k} - 2R_1^2 \ln \frac{R_1}{r_k} - R_2^2 + R_1^2 \right),$$

где  $W_o$  – объемная влажность, доли единицы;

$t_{нач}$  – начальная температура грунта, чаще всего положительная, близкая к нулю ( $0 \text{ °С} \leq t_{нач} \leq 1 \text{ °С}$ );

$C_T, C_M$  – объемная теплоемкость талого и мерзлого грунта, ккал/(м<sup>3</sup> · град.);

$R_1$  – радиус мерзлого цилиндра в конце предыдущего периода промораживания, определенный по формуле (3);

$R_2$  – радиус мерзлотного цилиндра к концу второго периода охлаждения, м. Остальные обозначения см. в формуле (3).

Формула (3) может быть использована при определении радиуса мерзлотного цилиндра при работе охлаждающей установки в течение нескольких зимних периодов охлаждения, когда  $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n$ .

Величину  $t_k$  – расчетную среднюю температуру внешней поверхности подземного теплообменника колонки – рекомендуется определять по формуле

$$t_k = t_n + 4 \text{ °С}, \quad (6)$$

где  $t_n$  – средняя температура наружного воздуха за охлаждающий период (ноябрь – март).

Для жидкостных термосифонов [9]

$$t_k = 0,5t_n + t_r, \quad (7)$$

где  $t_r$  – температура грунта на внешнем контуре теплообменника.

Определение средней по высоте температуры мерзлотной завесы необходимо для расчетов устойчивости и прочности сооружения (например, мерзлотной подпорной стенки).

Для практических целей среднюю температуру по высоте завесы можно устанавливать приближенно по зависимостям:

средняя температура по объему завесы при полном смыкании мерзлых цилиндров

$$t_{cp} = t_k \left( 0,32 + 0,8 \frac{d}{l} - 0,2 \frac{l}{B} \right); \quad (8)$$

средняя для завесы температура в точке пересечения продольной оси завесы с плоскостью смыкания цилиндров

$$t_{cm} = t_k \left( 0,73 + 0,55 \frac{l}{B} + \frac{d}{l} \right), \quad (9)$$

где  $d$  – внешний диаметр замораживающей колонки (термосифона), м;

$l$  – расстояние между осями колонок, м;

$B$  – минимальная толщина завесы в плоскости смыкания цилиндров, м;

$t_k$  – расчетная температура внешней поверхности колонки, средняя за период охлаждающего цикла.

Далее назначаем шаг установки замораживающих колонок (термосифонов) из условия смыкания одиночных мерзлых цилиндров и образования сплошной мерзлой стенки.

Положительная роль мерзлотной завесы определяется ее толщиной и прочностью мерзлого грунта в различные периоды года. Поскольку в теплое время года прочность завесы ослабевает, нет необходимости учитывать этот фактор в расчетах устойчивости. Следует рассматривать его лишь как дополнительный компонент удерживающих сил. В случае круглогодичного замораживания в подпорном сооружении возникает уже постоянная мерзлая стенка, но такой режим работы предлагаемой системы не рассматривается, так как применение холодильных машин существенно усложняет ситуацию и не предусматривается в данном исследовании.

**Выводы.** 1. Проблема освоения прибрежных территорий и шельфа арктических морей становится все более актуальной по ряду причин (добыча углеводородов, судоходство, энергетика, оборона и др.).

2. Предлагаемый способ устройства защитных, ограждающих, причальных и других сооружений на прибрежных и шельфовых территориях Крайнего Севера может найти широкое применение уже в ближайшем будущем. Преимуществом этого способа является низкая энергозатратность и использование известных, хорошо освоенных и проверенных компонентов.



#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. С и м а к о в Г.В., Ш х и н е к К.Н., С и е л о в В.А. и др. Морские гидротехнические сооружения на континентальном шельфе: Учеб. Л.: Судостроение, 1989. 328 с.
2. С м и р н о в а Т.Г., П р а в д и в е ц Ю.П., С м и р н о в Г.Н. Берегозащитные сооружения. М.: Изд-во АСВ, 2002. 303 с.
3. К у з н е ц о в Г.И., К р у к Н.В. Мерзлотные подпорные стены в гидротехническом строительстве // Изв. вузов. Строительство. 2018. № 1. С. 76–83.
4. Г о н ч а р о в Ю.М. Гидротехнические сооружения на мелиоративных системах / Краснояр. гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2010. 491 с.
5. Г о н ч а р о в Ю.М. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах: учеб. пособие. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2006. 406 с.
6. Х р у с т а л е в Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне: Учеб. М.: Изд-во МГУ, 2005. 543 с.
7. Ц в и д А.А. К вопросу о сооружении земляных плотин с замораживанием естественным холодом // Изв. восточных филиалов Академии наук СССР. 1957. № 3. С. 88–93.
8. Ц в и д А.А. Расчет времени замораживания грунтов естественным холодом // Изв. Сибирского отделения Академии наук СССР. 1959. № 6. С. 59–69.
9. М а к а р о в В.И. Термосифоны в северном строительстве. Новосибирск: Наука, 1985. 167 с.

**Кузнецов Георгий Иванович**, д-р техн. наук, проф.  
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск  
**Крук Наталья Владимировна**, канд. техн. наук, доц.  
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Получено после доработки 19.03.19

**Kuznetsov Georgiy Ivanovich**, DSc, Professor  
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia  
**Kruk Nataliya Vladimirovna**, PhD, Ass. Professor  
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

#### **FROZEN STRUCTURES ON THE COASTAL SHELF IN AREAS OF OIL AND GAS PRODUCTION IN THE FAR NORTH**

A method of installation of protective, mooring and enclosing structures in the coastal and offshore territories of the Far North is proposed. The method is distinguished by the use of well-known, proven in practice and environmentally friendly technical solutions in a new, more efficient combination without the use of energy-intensive technologies, which is extremely important for the device of the Arctic. The resulting structure freezes in construction, which is reinforced.

**Key words:** protective dam, permafrost soil, freezing, thermosyphon, permafrost curtain.

#### REFERENCES

1. Simakov G.V., Shkhinek K.N., Sielov V.A. and others. Morskie gidrotekhnicheskie sooruzheniya na kontinental'nom shel'fe [Marine hydraulic structures on the continental shelf: Textbook]. Leningrad, 1989. 328 p. (in Russian)

2. Smirnova T.G., Pravdivets Yu.P., Smirnov G.N. Beregozashchitnye sooruzheniya [Shore protection structures]. Moscow, 2002. 303 p. (in Russian)
  3. Kuznetsov G.I., Kruk N.V. Merzlotnye podpornye steny v gidrotekhnicheskom stroitel'stve [Pfozen retaining walls in hydraulic engineering]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2018. No. 1. Pp. 76–83. (in Russian)
  4. Goncharov Yu.M. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya na meliorativnykh sistemakh [Hydrotechnical structures on land reclamation systems]. Krasnoyarsk, 2010. 491 p. (in Russian)
  5. Goncharov Yu.M. Osnovaniya i fundamenty na vechnomerzlykh gruntakh [Foundations and foundations on permafrost soils]. Yakutsk: Publishing house of IMZ SB RAS, 2006. 406 p. (in Russian)
  6. Khrustalev L.N. Osnovy geotekhniki v kriolitozone [Basics of geotechnics in the cryolithozone: Tutorial]. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 2005. 543 p. (in Russian)
  7. Tsvid A.A. K voprosu o sooruzhenii zemlyanykh plotin s zamorazhivaniem estestvennym kholodom [On the question of the construction of earthen dams with freezing natural cold]. Izvestiya vostochnykh filialov Akademii nauk SSSR [Proceedings of the Eastern Branches of the Academy of Sciences of the USSR]. 1957. No. 3. Pp. 88–93. (in Russian)
  8. Tsvid A.A. Rachet vremeni zamorazhivaniya gruntov estestvennym kholodom [Calculation of the time of freezing of soils by natural cold]. Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Akademii nauk SSSR [News of the Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR]. 1959. No. 6. Pp. 59–69. (in Russian)
  9. Makarov V.I. Termosifony v severnom stroitel'stve [Thermosiphons in northern construction]. Novosibirsk: Science, 1985. 167 p. (in Russian)
-