

М.В. Феоктистова, К.М. Титов

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

БЕРЕГОУКРЕПИТЕЛЬНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ НА КРУГОВАЙКАЛЬСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

Аннотация. В статье рассматривается актуальная в настоящее время проблема берегоукрепления на Кругобайкальской железной дороге — уникального памятника инженерного искусства, одной из живописных достопримечательностей Прибайкалья, с активно развивающимся уникальным туристическим маршрутом.

Были подобраны три варианта конструкций защиты откоса насыпи исходя из условий ограниченного строительства на особо охраняемой территории и экологичности используемых материалов.

Для расчета высоты конструкции были определены превышение средней высоты волны, высота волнового наката, высота ветрового нагона. Был подобран размер камня для защиты от размыва текущим водотоком, определена толщина слоев каменной наброски.

Два варианта укрепления представляют собой подпорную стену. Для определения устойчивости против опрокидывания и сдвига которых было посчитано волновое давление с построением эпюр, определена нагрузка от давления волн со стороны озера, определена нагрузка от бокового давления грунта от обратной засыпки подпорной стены. Представлены эпюры распределения напряжений и поворотов конструкции посредством интерактивного программного продукта MSC.Patran; построены визуальные 3D модели вариантов берегоукрепления в программе КОМПАС-3D.

Определены нагрузки на сооружения от полей льда и от сплошного ледяного покрова при его температурном расширении. Приведена стоимость каждого сооружения, в которую входила цена за материалы, стоимость за перевозку, погрузочно-разгрузочные работы, стоимость работ по сооружению конструкции.

Сделан вывод о каждой конструкции исходя из экономического сравнения и из условий обеспечения ширины и уклона откоса, а также вписывания в местную архитектуру.

Ключевые слова: сейши, надвиги льда, волновое давление, подпорная стена, каменная постель, укрепление откоса, эпюра нагрузок, температурное расширение льда

M.V. Feoktistova, K.M. Titov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

BANK PROTECTION MEASURES ON THE CIRCUM-BAIKAL RAILWAY

Abstract. The article deals with the current problem of bank protection on the Circum-Baikal Railway - a unique monument of engineering art, one of the picturesque sights of the Baikal region, with an actively developing unique tourist route.

Three variants of embankment slope protection designs were selected based on the conditions of limited construction in a specially protected area and the environmental friendliness of the materials used.

To calculate the height of the structure, the excess of the average wave height, the height of the wave run, and the height of the wind surge were determined. The size of the stone was selected to protect it from erosion by the current watercourse, and the thickness of the rockfill layers was determined.

Two options for strengthening are a retaining wall. To determine the stability against overturning and shear of which, the wave pressure was calculated with the construction of diagrams, the load from the pressure of the waves from the side of the lake was determined, the load from the lateral pressure of the soil from the backfilling of the retaining wall was determined. Diagrams of the distribution of stresses and rotations of the structure are presented using the interactive software product MSC.Patran; visual 3D models of bank protection options in the KOMPAS-3D program.

The loads on structures from ice fields and from a continuous ice cover during its thermal expansion are determined. The cost of each structure is given, which included the price for materials, the cost for transportation, loading and unloading, the cost of construction work.

A conclusion is made about each design based on economic comparison and on the conditions for ensuring the width and slope of the slope, as well as fitting into the local architecture.

Keywords: seiches, ice thrusts, wave pressure, retaining wall, stone bed, slope reinforcement, load diagram, thermal expansion of ice

Введение

Кругобайкальская железная дорога (КБЖД) проходит по местности богатой болотистыми, таежными местами и пересечениями рек, пролегает вплотную к крутому склону, местами совершенно отвесно уходящему на значительную глубину в озеро, изрезанному крутыми лощинами, расщелинами и трещинами, с отдельно выступающими обрывистыми скалами, нагромождениями каменных глыб и обломков утесов и вдающимися в озеро многочисленными мысами. Поэтому, защита береговых откосов данной дороги является приоритетной задачей.

Проанализировав достоинства и недостатки разных видов берегоукрепительных сооружений, режим волнения вод и ледостава, строение почв, химический состав воды и экологический статус озера, наиболее перспективными технологиями, на наш взгляд, является: 1) наброска из крупного камня; 2) вертикальная стена из бревенчатых свай; 3) вертикальная стена из железобетонных блоков [1].

Для подбора геометрии конструкции необходимо определить величину нагрузки от воздействия волн и льда согласно и сравнить её с устойчивостью конструкции, которая зависит от размеров сооружения и выбранного материала [2].

Волны озера Байкал являются сейшмами или как их иногда называют внутренними волнами – это стоячие колебания воды, возникающие под действием внешних сил – резкого изменения атмосферного давления, ветра, сейсмических явлений и др. [3].

Нередко встречаются надвиги льда, происходящие от температурного расширения. Они представляют серьезную опасность для инженерных сооружений.

Определение расчетных гидрологических характеристик следует производить по однородным рядам наблюдений. Оценку однородности рядов гидрологических наблюдений осуществляют на основе генетического и статистического анализов исходных данных наблюдений [4].

Алгоритм расчета укрепления откоса насыпи бермой и каменной наброской

Берма – уступ земляного полотна, отделяющий его тело от водоотводного сооружения. Для быстрого стока вод берму всегда планируют с уклоном 0,02–0,04.

1. Определение высоты присыпной бермы, которая делается для поддержания откосов насыпи и придания им большей устойчивости производится, исходя из условия, чтобы площадка бермы была на 0,25 м выше уровня вод в самом неблагоприятном случае [5]:

$$h_б = h_{\text{подп}} + \Delta h_{\text{сет}} + h_{\text{run1}} + 0,25, \quad (1)$$

где $h_{\text{подп}}$ – высота подпора воды в период половодья определяют по гидрографу стока воды, м; $\Delta h_{\text{сет}}$ – высота ветрового нагона воды, определяемый по формуле, м:

$$\Delta h_{\text{сет}} = k_w \frac{V_w^2 L}{g(d' + 0,5\Delta h_{\text{сет}})} \cos a_w \quad (2)$$

где k_w – коэффициент, определяемый по формуле:

$$k_w = 3 \cdot (1 + 0,3V_w) \cdot 10^{-7}, \quad (3)$$

V_w – расчетная скорость ветра, прогнозируется на основании материалов непрерывных наблюдений, м/с; L – разгон волны, м; d' – средняя глубина на участке разгона волны, м; a_w – угол между продольной осью водоёма и направлением ветра, град.

При ударе волны о крепление откоса вода за счет кинетической энергии, которую она приобрела при разгоне волны, поднимается по откосу. При этом кинетическая энергия расходуется на удар волны об откос, преодоление сил трения по поверхности откоса и на преодоление потенциальной энергии, на поднятие по откосу.

В общем виде высоту наката воды h_{run1} можно выразить как:

$$h_{\text{run1}} = k_r \cdot k_p \cdot k_{sp} \cdot k_{run} \cdot k_i \cdot k_\alpha \cdot h_{1\%}, \quad (4)$$

где k_r , k_p – коэффициенты шероховатости и проницаемости защитного покрытия; k_{sp} – коэффициент, зависящий от скорости ветра и крутизны откоса насыпи; k_{run} – коэффициент, завися-

щий от глубины воды d и учитывающий пологость волны $\bar{\lambda}/h_{1\%}$; k_i – коэффициент обеспеченности по накату; k_α – коэффициент, зависящий от угла α между урезом воды и фронтом волны; $h_{1\%}$ – высота волн обеспеченностью 1% в системе.

Для расчета высоты укрепления принимается вероятность превышения средней высоты 1% (1 раз в 100 лет), а для толщины крепления откоса 2% (1 раз в 50 лет):

Среднюю высоту волны определяют по значению выражения с помощью графика определения элементов ветровых волн в глубоководной и мелководной зонах по верхней огибающей кривой [6].

2. Определение расчетного диаметра камня как шара d_k , требуемого для укрепления откоса от размыва текущим водотоком, рекомендуется производить по формуле [5]:

$$d_k = \frac{V_p^2}{A^2 2g \left(\frac{\rho_k - \rho_w}{\rho_w} \right) \cos \alpha} \quad (5)$$

где V_p – расчетная скорость течения водотока, м/с; A – коэффициент, учитывающий устойчивость камня на откосе; ρ_k, ρ_w – соответственно плотность камня и воды, кг/м³; α – угол наклона поверхности откоса бермы к горизонту.

Вывод по укреплению каменной неброской

По исходным данным для рассматриваемого случая было определено:

Высота бермы 2,61 м, ширина 4 м.

В качестве укрепления откоса принимаем крупный валунный камень горной породы гранодиарит слабовыветривающийся. Размер расчетного диаметра камня следует принимать $d_k = 0,25$ м, толщина слоя $t = 3d_k = 0,75$ м.

Расчетный размер камня в нижнем слое соответственно равен: $d_{k2} = 0,37d_k = 0,09$ м, толщина нижнего слоя $t = 3d_{k2} = 0,27$ м.

Наброска укладывается на слой обратного фильтра (слой песчано-гравийной смеси). Толщину обратного фильтра примем $d_\phi = 0,05$ м (рис. 1).

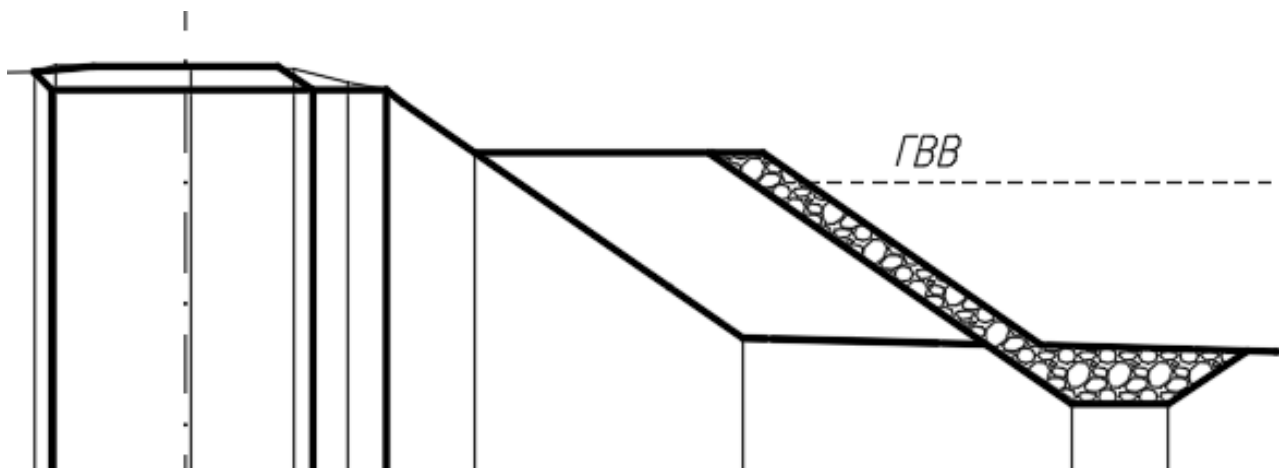


Рис. 1. Поперечный профиль с бермой и каменной наброской

Алгоритм расчета укрепления откоса насыпи деревянными сваями

1. Зададимся размерными характеристиками вертикальной стены. В нашем случае сооружение представляет собой деревянные сваи из лиственницы диаметром 34 см и длиной 4,5 м в виде пакета (для утолщения ширины сооружения a сваи совмещают в количестве 2 шт.), поэтому параметр $a = 68$ см. В качестве упора является каменная постель из крупного камня, расстояние от лицевой грани до края каменной подушки $b_{br} = 2,5$ м, откос каменной подушки 1:1,5, высота 1 м. Высота бермы 0,25 м, ширина 1 м (в этом случае берма – это часть берегоукрепительного сооружения, а не насыпи). Расчетная схема сооружения для укрепления откоса представлена на рис. 2.

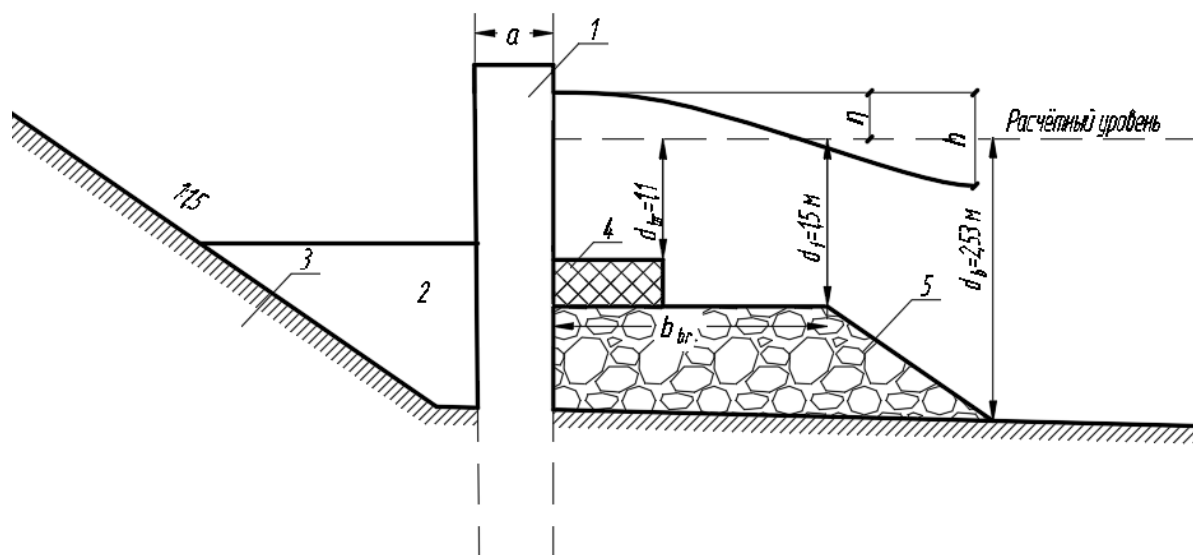


Рис. 2. Расчетная схема укрепления откоса:

1 – берегоукрепительное сооружение; 2 – переходный слой; 3 – откос насыпи; 4 – берма; 5 – каменная насыпь

2. Задавшись размерами сооружения и зная волновые характеристики, определим расчётную глубину:

$$d = d_f + k_{br} \cdot (d_b - d_f), \quad (6)$$

где d_b – глубина до дна, значение согласно расчетной схеме (рис. 1); k_{br} – коэффициент, принимаемый по рис. 3 [6].

3. Определяем волновое давление.

При действии стоячей волны на вертикальную стену необходимо предусматривать три случая определения возвышения или понижения свободной волновой поверхности η , м, у вертикальной стены:

1) $\eta_{\max} = k_{\eta 1} h$ – при наибольшем значении отметки волновой поверхности у стены;

2) $\eta_c = k_{\eta 2} h$ – при максимальном значении горизонтальной волновой нагрузки P_{xc} , кН/м, на стену;

3) $\eta_c = -k_{\eta 3} h$ – при минимальном значении отметки волновой поверхности у стены.

Численные коэффициенты $k_{\eta 1}$, $k_{\eta 2}$, $k_{\eta 3}$ определяются по графикам в зависимости от параметров $\bar{\lambda}/d$ и $h/\bar{\lambda}$ [5], где $h = 0,97$ м – высота исходной волны, определенная в п. 3.2; d – расчётная глубина, м.

Нагрузку на вертикальную стену при гребне или ложбине стоячей волны определяют по эпюре волнового давления p , кПа, на глубине z , м (рис. 3), ординаты которой определяются по формулам табл. 1, а численные значения коэффициентов – по графикам рисунка Г.2 [6].

Таблица 1. Определение волнового давления p , кПа, на глубине z

№ точек	Заглубление точек z , м	Значение волнового давления p , кПа
При гребне		
1	$\eta_c = 1,16$	$p_1 = 0$
2	0	$p_2 = k_2 \rho g h = 8,09$
3	$0,25d = 0,455$	$p_3 = k_3 \rho g h = 5,71$
4	$0,5d = 0,91$	$p_4 = k_4 \rho g h = 5,23$
5	$d = 1,82$	$p_5 = k_5 \rho g h = 4,57$
При ложбине		
6	0	$p_6 = 0$
7	$\eta_t = -0,73$	$p_7 = -\rho g \eta_t = 7,16$
8	$0,5d = 0,91$	$p_8 = k_8 \rho g h = 5,04$
9	$d = 1,82$	$p_9 = k_9 \rho g h = 4,28$

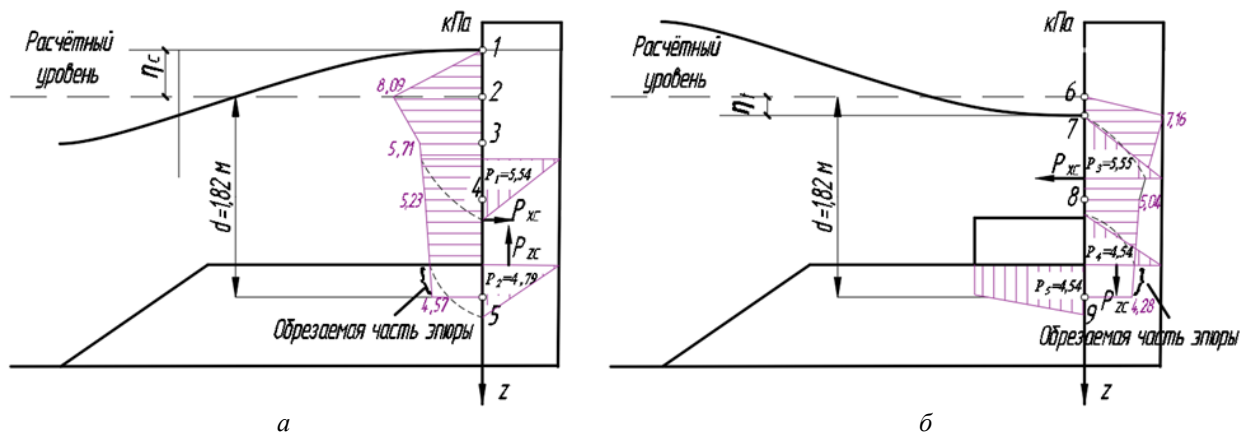


Рис. 3. Эпюры давления стоячих волн на вертикальную стенку:
 а – при гребне волны; б – при ложбине волны

3. Определяем нагрузки от волнового давления.

Значения вертикальной нагрузки P_{zc} и горизонтальной нагрузки P_{xc} при гребне и ложбине волны определяются согласно значениям эпюры (рис. 3) как площадь соответствующих фигур.

Эюра взвешивающего волнового давления на берменные массивы должна приниматься трапециевидальной, и определяется по формуле:

$$p_{br} = k_{br} \rho g h \frac{ch k (d - d_f)}{ch k d} \cos k x_i \leq p_f, \quad (7)$$

где k_{br} – коэффициент, принимаемый по таблицы Г.3 [6]; $\rho = 1 \text{ т / м}^3$ – плотность пресной воды; $k = 2\pi / \bar{\lambda}$ – волновое число; x_i – расстояние от стены до соответствующей грани бермы; ch – гиперболическим косинус; d_f – глубина над подошвой сооружения (рис. 2); d – расчетная глубина; p_f – волновое давление на уровне подошвы сооружения (рис. 3).

Так как эпюра взвешивающего волнового давления на берму представляет собой неравномерную нагрузку определяют значения волнового давления на грани бермы, примыкающей к стене p_{br1} , кПа, при этом $x_i = 0$ и давление на конце бермы p_{br2} , кПа, при этом x_i равно ширине бермы.

4. Определяем нагрузку от давления грунта.

Распределение давления грунта на подпорное сооружение согласно по глубине следует в простейших случаях допускается определять с помощью графоаналитического метода построения эпюры активного и пассивного давления грунта на подпорное сооружение [7]. Схема подпорной стенки, удерживающей клин земли, представлена на рис. 4.

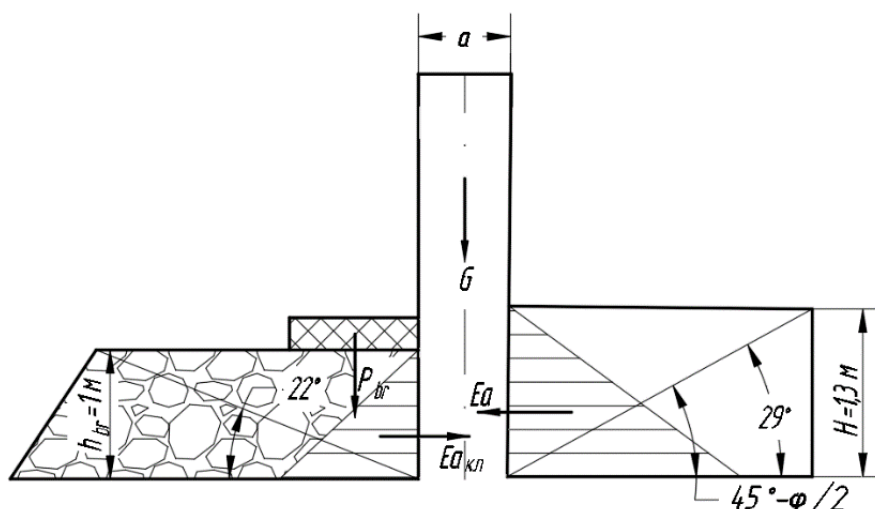


Рис. 4. Схема действия сил и эпюра бокового давления грунта

Равнодействующая активного давления грунта на подпорную стенку равна площади эпюры и определяется по формуле:

$$E_a = \frac{\gamma H^2}{2} \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = 3,64 \text{ кН}, \quad (8)$$

где γ – удельный вес грунта, которым засыпается подпорная стена со стороны откоса насыпи, кН/м^3 ; H – высота засыпки грунта (рис. 4); φ – угол внутреннего трения, выражение под тангенсом определяется по схеме на рис. 4.

5. Определяем устойчивость положения укрепления из деревянных свай против опрокидывания и сдвига

Устойчивость положения конструкций против опрокидывания следует рассчитывать по формуле [7]:

$$M_u \leq \frac{m}{\gamma_n} M_z, \quad (9)$$

где M_u – момент опрокидывающих сил относительно оси возможного поворота (опрокидывания) конструкции, проходящей по крайним точкам опирания; M_z – момент удерживающих сил относительно той же оси; m – коэффициент условий работы, принимаемый равным 0,95 для стадии строительства; γ_n – коэффициент надежности по назначению, принимаемый равным 1 для стадии строительства.

Устойчивость положения конструкций против сдвига (скольжения) следует рассчитывать по формуле:

$$Q_r \leq \frac{m}{\gamma_n} Q_z, \quad (10)$$

где Q_r – сдвигающая сила, равная сумме проекций сдвигающих сил на направление возможного сдвига; Q_z – удерживающая сила, равная сумме проекций удерживающих сил на направление возможного сдвига; m – коэффициент условий работы, принимаемый равным 0,9; γ_n – тоже, что и в предыдущей формуле.

В качестве опрокидывающих сил выступает равнодействующая активного давления грунта E_a , нагрузки от волнового давления.

Удерживающими силами является собственный вес конструкции G , нагрузка от бермы P_{br} и сила активного давления глыбового грунта от каменной постели $E_{ак.п.}$, схема приложения сил показана на рис. 5.

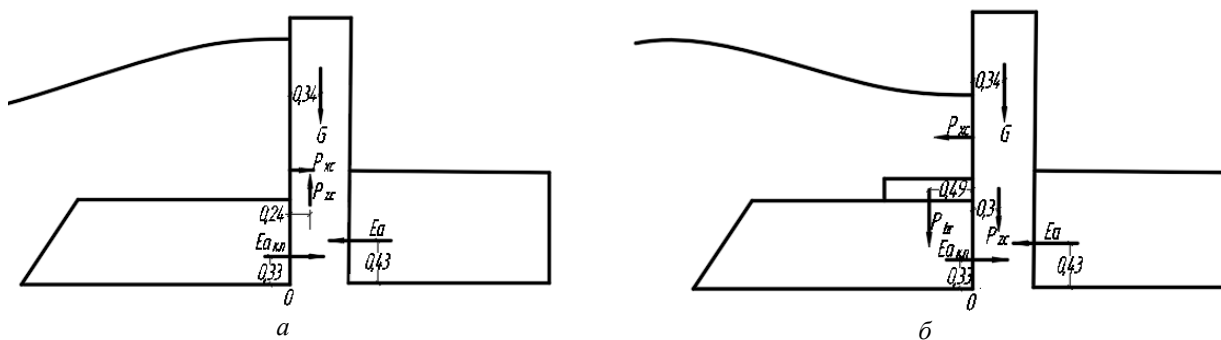


Рис. 5. Схема приложения сил на конструкцию:
а – при гребне волны; б – при ложбине волны

$$Q_r = E_a + P_{xc} - E_{ак.п.} = 3,64 + 1,89 - 1,35 = 4,18 \text{ кН},$$

$$Q_z = G + P_{br} - P_{xc} = 4,54 + 1,89 - 1,63 = 4,8 \text{ кН},$$

$$Q_r = 4,18 \leq \frac{0,9}{1} \cdot 4,8 = 4,32 \text{ кН}.$$

Определим значения M_u и M_z относительно т. О на схеме рис. 5:

$$M_u = E_a \cdot 0,43 + P_{zc} \cdot 0,24 = 1,96 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

$$M_z = G \cdot 0,34 + E_{ак.п.} \cdot 0,33 + P_{br} \cdot 0,49 = 2,92 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

$$M_u = 1,96 \leq \frac{0,9}{1} \cdot 2,92 = 2,77 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Вариант берегоукрепления из деревянных свай проходит проверку на устойчивость против опрокидывания и сдвига. На рис. 6–8 представлена визуальная информация о распределении возникающих напряжений, Па (Stress Tensor) и максимальных вращений (Rotational) от прилагаемых нагрузок в сечении конструкции с помощью интерактивного программного продукта MSC.Patran. Эпюра представлена в цветовой гамме, справа на окне интерфейса представлена шкала с числовыми значениями напряжений.

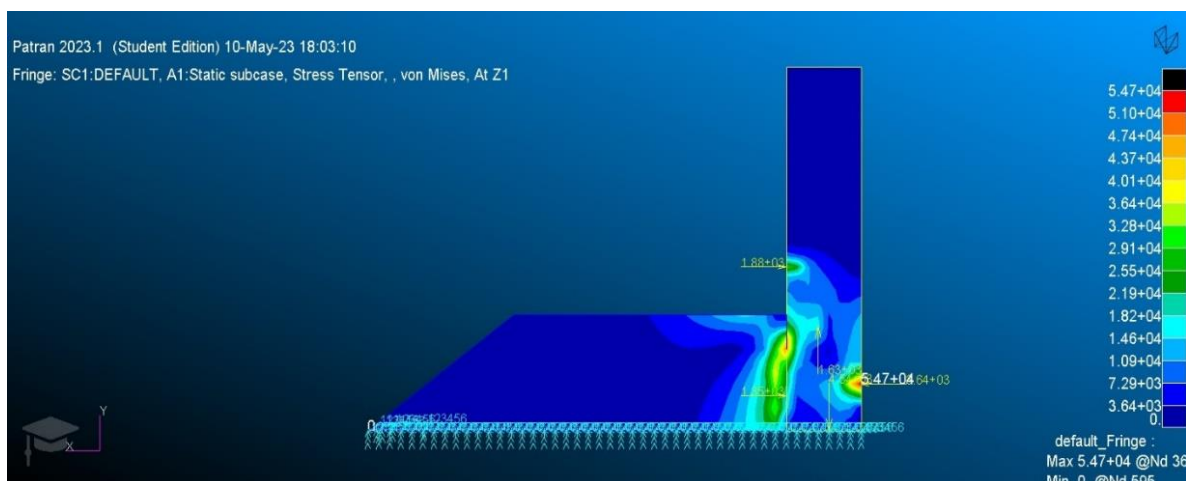


Рис. 6. Эпюра напряжений в конструкции от прилагаемых нагрузок при гребне волны

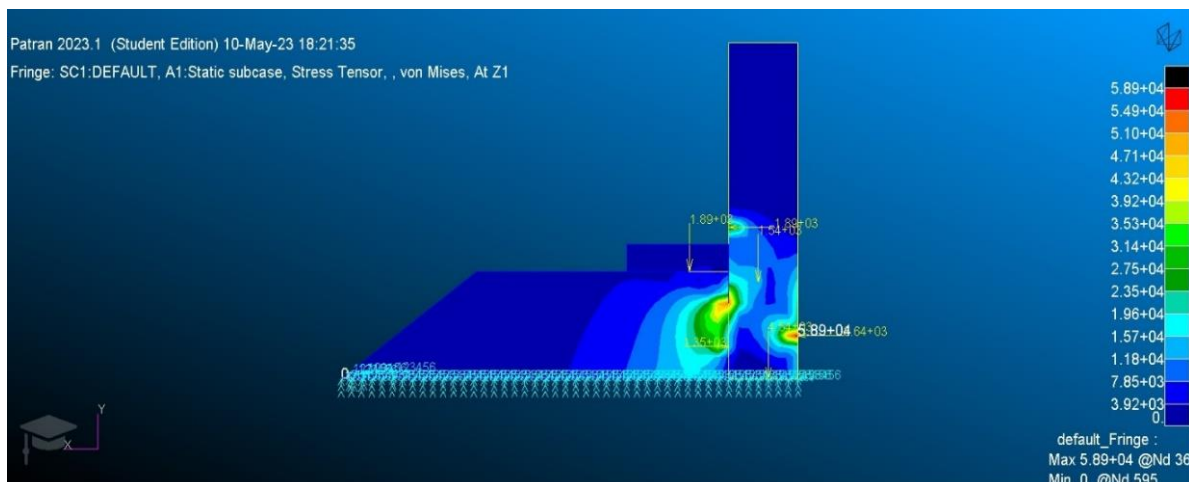


Рис. 7. Эпюра напряжений в конструкции от прилагаемых нагрузок при ложбине волны

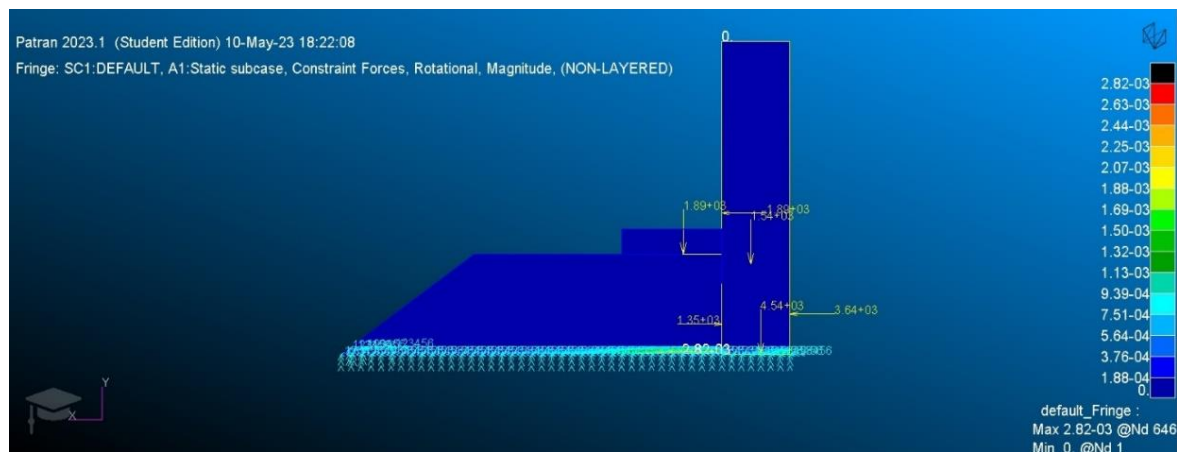


Рис. 8. Эпюра максимальных возникающих поворотов в конструкции

Вывод по укреплению деревянными сваями

В данном варианте укрепления предлагается обустройство подпорной стены бревенчатыми сваями из лиственницы диаметром 0,34 м и длиной 4,5 м. В качестве упора – каменная постель и берма (рис. 9). Для обратной засыпки стены со стороны откоса насыпи используется гравий фракции 5–20 мм.

На подпорную стену воздействует волновое давление и давление от грунта.

Конструкция прошла проверку на устойчивость положения против опрокидывания и сдвига.

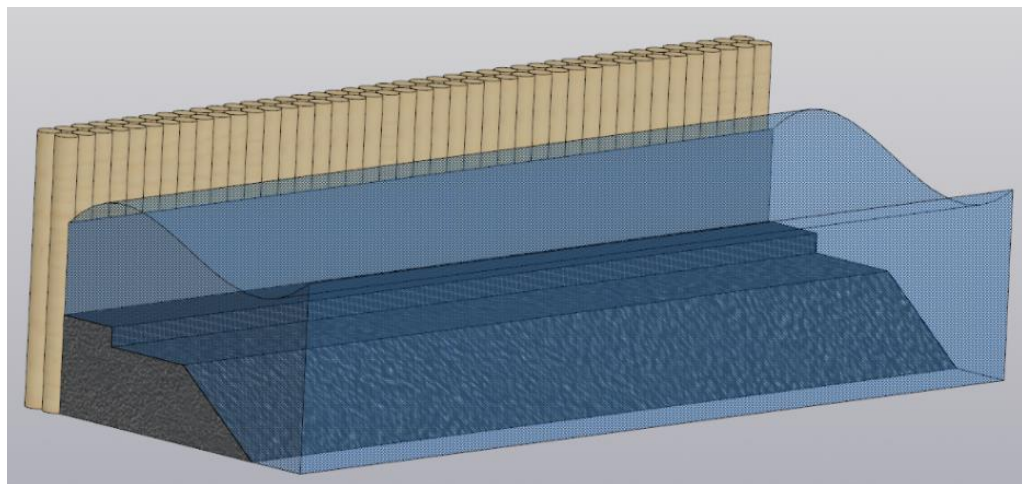


Рис. 9. Визуальная модель второго варианта берегоукрепления в программе КОМПАС-3D v21 учебная версия

Укрепление откоса насыпи подпорной стены бетонными блоками

Алгоритм расчета такой же, как и для стены из деревянных свай.

1. Сооружение представляет собой подпорную стену на каменной постели. Подпорная стена состоит из сборного железобетона без раствора с тщательной перевязкой швов. Размеры бетонного блока марки СБ-05 $0,49 \times 0,99$ м, СБ-10 $0,99 \times 0,99$ м, длина блоков – 1 м; ширина стены $a = 1,485$ м. Расстояние от лицевой грани до края каменной подушки $b_{br} = 3,5$ м, откос каменной подушки 1:1,5, высота – 1,18 м. Расчетная схема сооружения для укрепления откоса представлена на рис. 10.

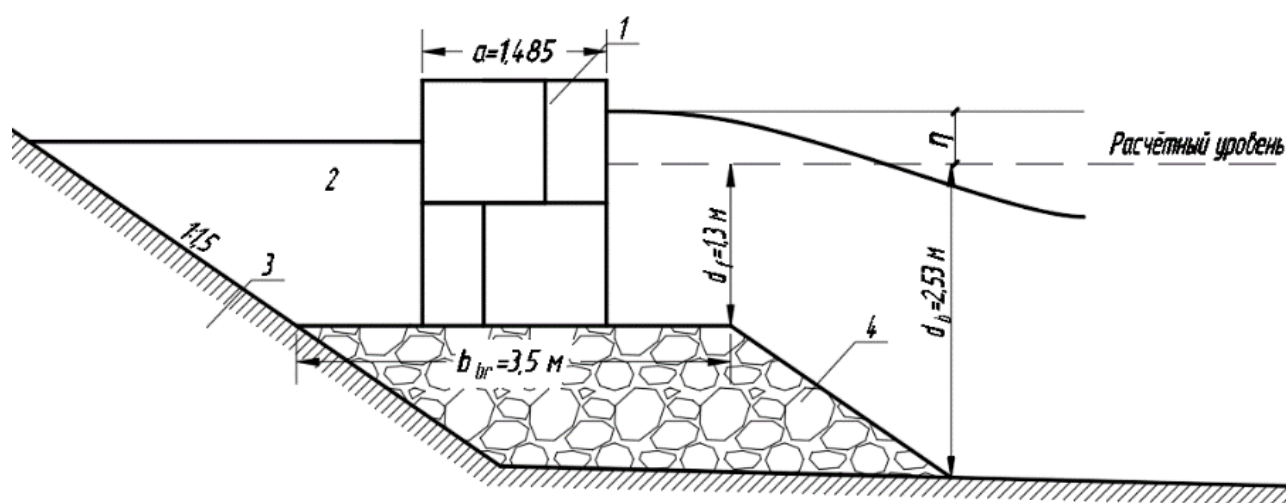


Рис. 10. Расчетная схема укрепления из бетонных блоков:

1 – берегоукрепительное сооружение; 2 – переходный слой; 3 – откос насыпи; 4 – каменная постель

2. Задавшись размерами сооружения и зная волновые характеристики, определяем расчётную глубину по формуле (6).

3. Определяем значения волнового давления (табл. 2) и строим по ним эпюру (рис. 11).

Таблица 2. Определение волнового давления p , кПа, на глубине z

№ точек	Заглубление точек z , м	Значение волнового давления p , кПа
При гребне		
1	$\eta_c = 1,55$	$p_1 = 0$
2	0	$p_2 = k_2 \rho g h = 9,04$
3	$0,25d = 0,355$	$p_3 = k_3 \rho g h = 8,09$
4	$0,5d = 0,71$	$p_4 = k_4 \rho g h = 7,61$
5	$d = 1,42$	$p_5 = k_5 \rho g h = 6,85$
При ложбине		
6	0	$p_6 = 0$
7	$\eta_t = -0,39$	$p_7 = -\rho g \eta_t = 3,83$
8	$0,5d = 0,71$	$p_8 = k_8 \rho g h = 3,33$
9	$d = 1,42$	$p_9 = k_9 \rho g h = 2,85$

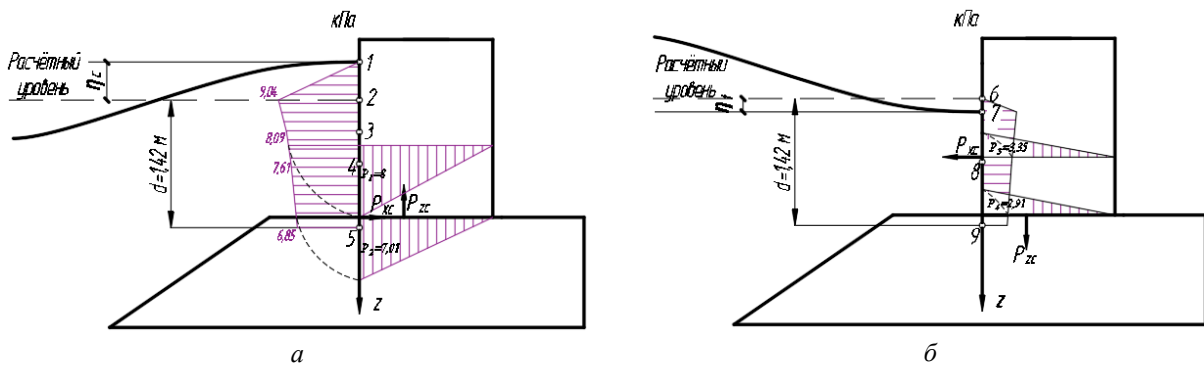


Рис. 11. Эпюры давления стоячих волн на вертикальную стенку:
 а – при гребне волны; б – при ложбине волны

4. Определяем значение нагрузки от давления грунта на стену из бетонных блоков.

Схема приложения сил от давления грунта на подпорную стенку из бетонных блоков представлена на рис. 12.

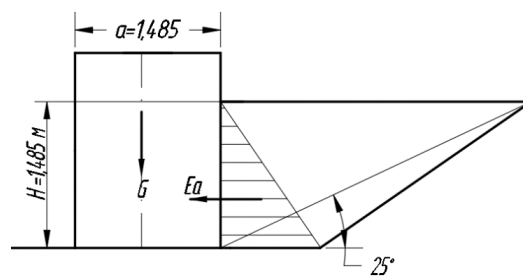


Рис. 12. Эпюра бокового давления грунта на сборную бетонную стену

5. Определяем устойчивость положения укрепления.

В данном случае опрокидывающей силой является равнодействующая активного давления грунта E_a , нагрузки от волнового давления.

Удерживающими силами является только собственный вес конструкции G .

Определяем значения сил с учетом направлений действующих нагрузок при неблагоприятном сочетании согласно рис. 13.

$$Q_r = E_a + P_{xc} = 3,36 + 5,94 = 9,3 \text{ кН,}$$

$$Q_z = G = 13,8 \text{ кН.}$$

$$Q_r = 9,3 \leq \frac{0,9}{1} \cdot 13,8 = 12,42 \text{ кН.}$$

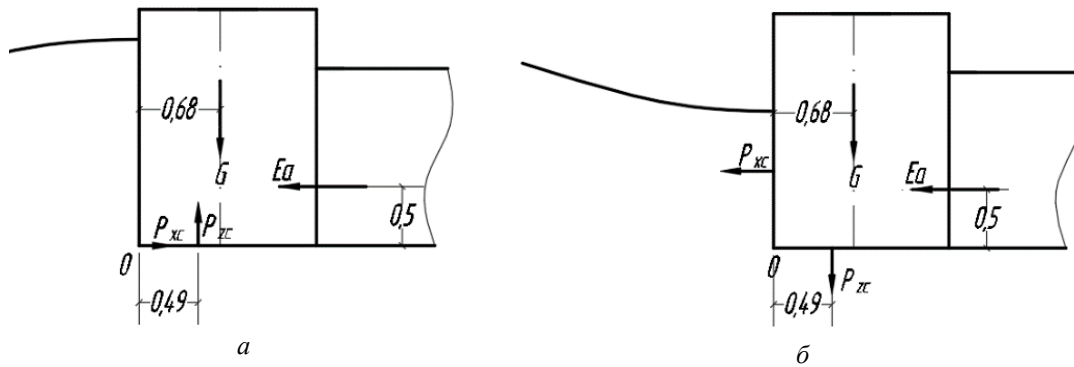


Рис. 13. Схема приложения сил на конструкцию:
 а – при гребне волны; б – при ложбине волны

Определяем значения M_u и M_z относительно т. О на схеме рис.13.

$$M_u = E_a \cdot 0,5 + P_{zc} \cdot 0,49 = 4,23 \text{ кН}\cdot\text{м},$$

$$M_z = G \cdot 0,68 = 9,38 \text{ кН}\cdot\text{м},$$

$$M_u = 4,23 \leq \frac{0,95}{1} \cdot 9,38 = 8,91 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Вариант берегоукрепления из бетонных блоков проходит проверку на устойчивость против опрокидывания и сдвига. На рис. 14–16 представлена визуальная информация о распределении возникающих напряжений, Па максимальных вращений от прилагаемых нагрузок в сечении конструкции с помощью интерактивного программного продукта MSC.Patran.

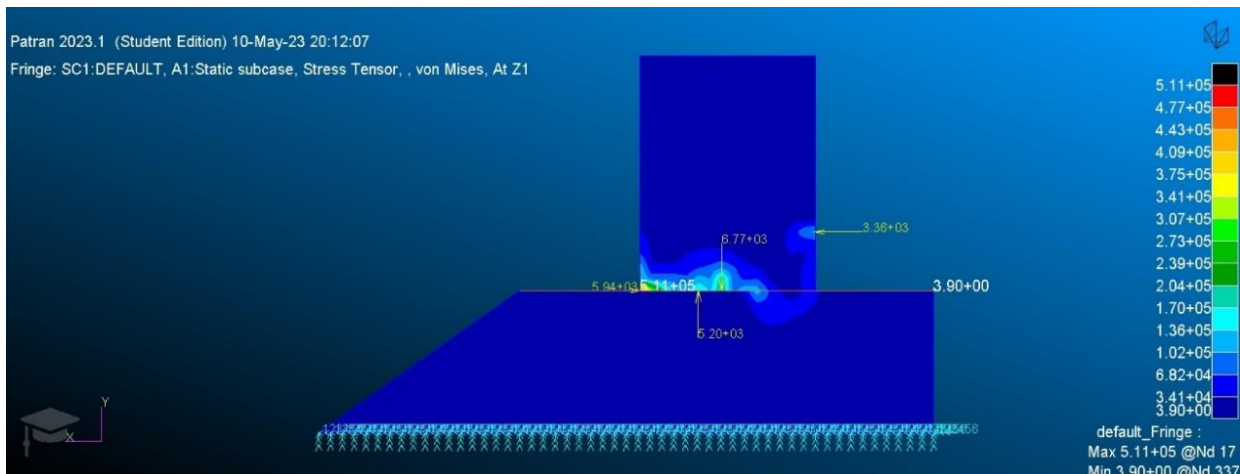


Рис. 14. Эпюра напряжений в конструкции от прилагаемых нагрузок при гребне волны

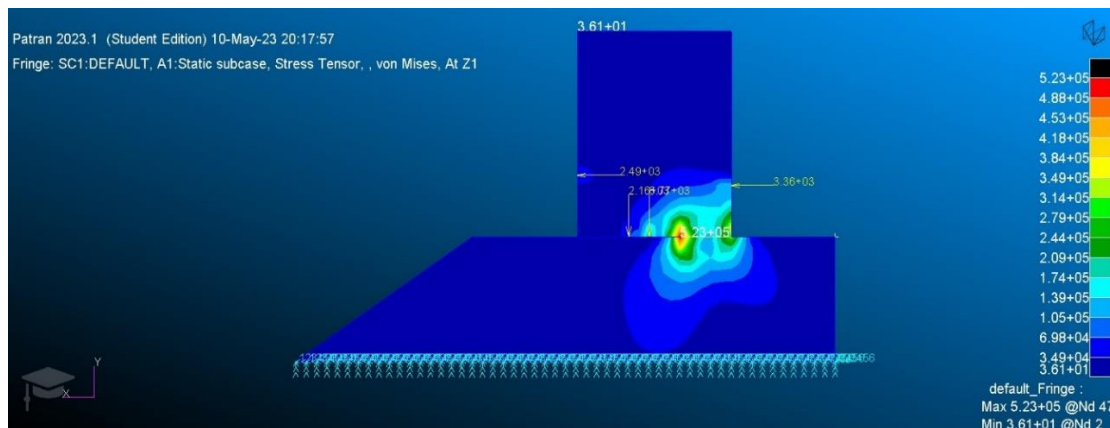


Рис. 15. Эпюра напряжений в конструкции от прилагаемых нагрузок при ложбине волны

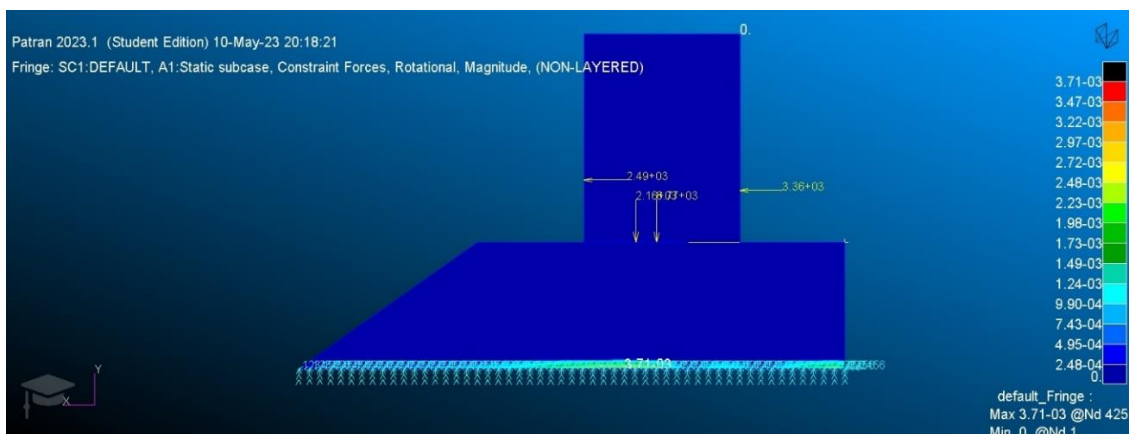


Рис. 16. Эпюра максимальных возникающих поворотов в конструкции

Вывод по укреплению бетонными блоками

В данном варианте укрепления предлагается обустройство подпорной стены из сборного железобетона на каменной постели из глыбового грунта. Размеры бетонного блока марки СБ-05 0,49×0,99 м, СБ-10 0,99×0,99 м, длина блоков – 1 м (рис. 17). Для обратной засыпки стены со стороны откоса насыпи используется гравий фракции 5–20 мм.

На подпорную стену воздействует волновое давление и давление от грунта.

Конструкция прошла проверку на устойчивость положения против опрокидывания и сдвига.

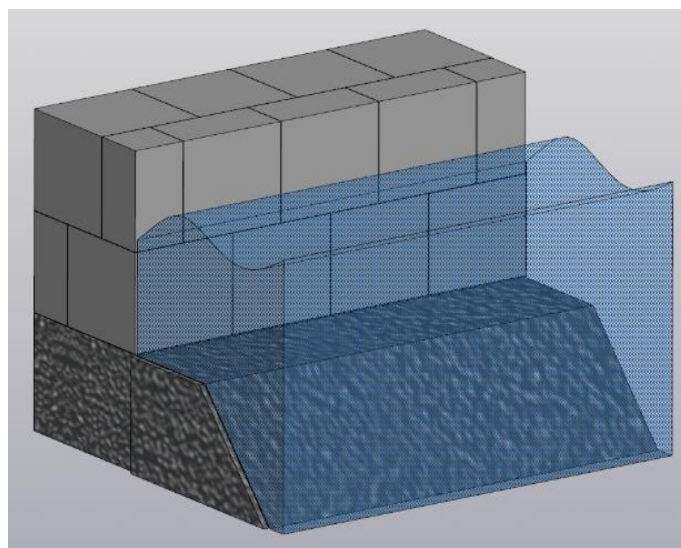


Рис. 17. Визуальная модель третьего варианта берегоукрепления в программе КОМПАС-3D v21 учебная версия

Нагрузка на сооружение от полей льда

Нагрузку от воздействия движущихся ледяных полей на сооружения с вертикальной передней гранью на секцию протяженного сооружения необходимо определять по формуле [6]:

$$F_{c,w} = 2,2 \cdot 10^{-3} V h_d \sqrt{A k_v \rho R_c} = 0,07 \text{ МН} \quad (11)$$

где V – скорость движения ледяного поля, м/с; h_d – толщина ровного льда; A – максимальная площадь ледяного поля (м^2), которая может воздействовать на рассчитываемый элемент сооружения, определяемая по натурным наблюдениям или принимаемая в зависимости от поперечных размеров сооружения как $A = 3b^2$, где b – длина сооружения; k_v – коэффициент, принимаемый по табл. 19 [6]; ρ – плотность пресной воды (кг/м^3); R_c – предел прочности льда при сжатии.

Нагрузка $F_{c,w}$ не должна превышать нагрузку $F_{b,w}$, которая определяется по формуле [6]:

$$F_{b,w} = k k_v R_c b h_d = 0,13 \text{ МН}, \quad (12)$$

где k – коэффициент, определяемый по интерполяции от значения b/h_d .

$$F_{c,w} = 0,07 \text{ МН} < F_{b,w} = 0,13 \text{ МН}.$$

Нагрузку от воздействия остановившегося поля ровного льда, наваливающегося на сооружение при действии течения воды и ветра F_s , МН, необходимо определять по формуле:

$$F_s = (\rho_\mu + \rho_V + \rho_i + \rho_{\mu,\alpha})A \quad (13)$$

в которой величины ρ_μ , ρ_V , ρ_i , $\rho_{\mu,\alpha}$, МПа, определяются по формулам:

$$\rho_\mu = 5 \cdot 10^{-9} \rho V_{\max}^2, \quad (14)$$

$$\rho_V = 5 \cdot 10^{-7} \frac{h_d \rho V_{\max}^2}{L_m} \quad (15)$$

$$\rho_i = 9,4 \cdot 10^{-7} h_d \rho g i, \quad (16)$$

$$\rho_{\mu,\alpha} = 2 \cdot 10^{-11} \rho V_{w,\max}^2, \quad (17)$$

где V_{\max} – максимальная скорость течения воды подо льдом в период ледохода, м/с; $V_{w,\max}$ – максимальная скорость ветра в период ледохода, м/с; L_m – средняя длина ледяного поля по направлению потока; $i = 0,0005$ уклон поверхности потока.

$$F_s = (0,25 + 0,09 + 0,03 + 0,01) \cdot 10^{-4} \cdot 300 = 0,011 \text{ МН}.$$

При этом, нагрузка F_s не должна быть больше нагрузки $F_{b,w}$, при $k_v = 0,1$:

$$F_s = 0,011 \text{ МН} < F_{b,w} \text{ (при } k_v = 0,1) = 0,044 \text{ МН}.$$

Нагрузки на сооружения от сплошного ледяного покрова при его температурном расширении

При перепаде температуры талая вода заполняет трещины во льду и вновь замерзает. Трещины воспринимают и компенсируют температурные деформации, стабилизируют перемещения. Без них лёд становится монолитным и с усилением ветров начинает выжиматься на берег, нанося повреждения.

Расчетную нагрузку на сооружение от сплошного ледяного покрова при его температурном расширении следует определять по формуле:

$$F_{t,h} = q \cdot b. \quad (18)$$

Нагрузку q (кН/м) определяют по формуле:

$$q = h_d \cdot k_l \cdot p, \quad (19)$$

где h_d – то же, что и в п 3.5; k_l – коэффициент потери устойчивости ледяного покрова, определяется по табл. 30 [6]; p – давление за счет упругой и пластической деформации, кПа, при температурном расширении льда на единицу длины сооружения определяется по формуле:

$$p = G_0 + 2a\mu\phi = 0,34 \text{ МН}, \quad (20)$$

где G_0 – предел упругости льда при сжатии, кПа; a – коэффициент линейного расширения льда; V_t – скорость повышения температуры воздуха; μ – коэффициент вязкости льда, кПа·с; $\phi = 0,6$ – безразмерный коэффициент, определяемый по рис. 24 [6]:

$$F_{t,h} = 1,4 \text{ МН}.$$

При этом нагрузка о температурные расширения должна быть не более нагрузки, определенной по формуле при $k_v = 0,1$:

$$F_{t,w} = k_v R_c b h_d = 3,5 \text{ МН}. \quad (21)$$

Заключение

В работе предложены следующие варианты берегоукрепления:

- 1) Обустройство бермы шириной 4 м, высотой 2,61 м в виде каменной наброски из камней размеров от 0,09–0,25 м.
- 2) Подпорной стена бревенчатыми сваями из лиственницы диаметром 0,34 м и длиной 4,5 м, с упором – каменная постель и берма.
- 3) Подпорной стены из сборного железобетона на каменной постели из глыбового грунта, с размером бетонного блока 0,49×0,99×1 м класса В20.

Предложенные конструкции обладают устойчивостью против нагрузки от воздействия волн и льда.

Были составлены локальные сметы каждого варианта укрепления. В них учитывались стоимость материалов, стоимость за перевозку, погрузочно-разгрузочные работы, стоимость работ по сооружению конструкции.

Стоимость 10 м первого варианта берегового укрепления составляет 257,555 тыс. руб.

Стоимость 10 м второго варианта берегового укрепления составляет 740,128 тыс. руб.

Стоимость 10 м третьего варианта берегового укрепления составляет 232,365 тыс. руб.

Наиболее экономичным является вариант укрепления бетонными блоками. Но если рассматривать возможность доступа к воде, то лучше каменная берма. Однако она занимает много места для обеспечения ширины и уклона откоса. А если вписывание в архитектуру старых построек, то гармонично будут выглядеть деревянные сваи с перилами. Наилучшим вариантом будет комбинирование всех трёх видов вдоль КБЖД: где берег более широкий – каменные бермы; где места недостаточно – бетонные блоки; на остановках туристов – деревянные сваи [8–14].

Древесина и камень являются экологичными строительными материалами, что было основополагающим при выборе берегоукрепления, так как заповедная территория берегов озера исключает радикального вмешательства в изменение рельефа. Недопустимо, чтобы биота почв берегов была залита бетонным раствором. Такое вмешательство непредсказуемо может повлиять на животных и растений, которые зачастую на данной территории могут относиться к эндемикам и краснокнижным видам [15].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Феоктистова М.В., Полищук С.С., Титов К.М. Восстановление, строительство берегоукрепительных сооружений Кругобайкальской железной дороги / Образование – наука – производство: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). Чита, 2022. Т. 1. С. 136–146.
2. Марков Д.П. Гидротехническое строительство. Берегоукрепительные сооружения. М. : Институт водных проблем Российской академии наук, 2018. 241 с.
3. Беркин Н.С., Макаров А.А., Русинек О.Т. Байкаловедение. Иркутск: ИГУ, 2009. 291 с.
4. Новиков В.Ю. Разрушение берегов и загрязнение водных объектов // Вода: химия и экология. 2011. № 7(37). С. 88–90.
5. СП 32-104-98 Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм : утв. зам. Директора ОАО «ЦНИИС» 27.12.1996. Введ. : 1999–01–01. М. : Госстрой России, 1999. 95 с.
6. СП 38.13330.2018 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) (ред. 15.12.2021) : утв. приказом Минстроя РФ от 16.08.2018 № 531. Введ. : 2019–02–17. М. : Минстрой, 2018. 126 с.
7. СП 46.13330.2012 Мосты и трубы : утв. приказом Минрегион России от 29.12.2011 №635. Введ. : 2013–01–01. М. : Минрегион, 2011. 146 с.
8. Протасов Н.М., Перельгина А.А. Принятие решений по защите железнодорожного пути от опасных инженерно-геологических процессов при реконструкции Кругобайкальской железной дороги // Цифровизация современной науки: стратегии, инновации : материалы XXXVII Всероссийской научно-практической конференции. Ростов-на-Дону, 2022. С. 160–168.
9. Гуляева К.О., Ляпин А.А. Изучение архитектурных памятников Кругобайкальской железной дороги // Теория и практика градостроительства на побережье озера Байкал : материалы Международной научно-практической конференции. Иркутск, 2020 года. С. 77–88.
10. Подвербный В.А., Перельгина А.А., Протасов Н.М. Принятие решения по увеличению пропускной способности Кругобайкальской железной дороги в рамках программы развития особой экономической зоны // Высшая школа: научные исследования : материалы Межвузовского международного конгресса. Москва, 2021. С. 197–208.
11. Протасов Н.М., Перельгина А.А. Влияние реконструкции Кругобайкальской железной дороги на природопользование в пределах Прибайкальского национального парка // Глобальные проблемы научной цивилизации, пути совершенствования : материалы XV Международной научно-практической конференции. Ставрополь, 2022. Ч. 1. С. 283–291.

12. Перельгина А.А., Протасов Н.М. Перспективы развития Кругобайкальской железной дороги с учетом охранных зон // Дискуссии в области гуманитарных, естественно-научных аспектов современности : материалы XXXV Всероссийской научно-практической конференции. Симферополь, 2022. Ч. 1. С. 296–302.

13. Матвеева Л.Ф., Джавадов А.Р. Кругобайкальская железная дорога как зона эколого-познавательного туризма на особо охраняемой территории Прибайкалья // II Манякинские чтения: уникальный туристско-рекреационный потенциал «Московско-Сибирский тракт» («Золотое кольцо Прииртышья») как элемент устойчивого развития региона : материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, преподавателей, теоретиков и практиков. Омск, 2013. С. 425–429.

14. Терентьева Н.Ю., Френкель А.С., Подвербный В.А. К вопросу реконструкции объекта культурного наследия федерального значения – Кругобайкальской железной дороги // Заметки учёного. 2023. № 1. С. 201–211.

15. Федеральный закон от 01.05.1999 N 94-ФЗ «Об охране озера Байкал» (ред. от 01.05.2022).

REFERENCES

1. Feoktistova M.V., Polishchuk S.S., Titov K.M. Vosstanovlenie, stroitel'stvo beregoukrepitel'nykh sooruzhenii Krugobaikal'skoi zheleznoi dorogi [Restoration, construction of bank protection structures of the Circum-Baikal Railway]. *Materialy VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiem) «Obrazovanie – nauka – proizvodstvo»* [Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation) «Education – science – production»]. Chita, 2022. Vol. 1, pp. 136–146.

2. Markov D.P. Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo. Beregoukrepitel'nye sooruzheniya [Hydraulic engineering. Shore protection structures]. Moscow: Institut vodnykh problem RAN Publ., 2018. 241 p.

3. Berkin N.S., Makarov A.A., Rusinek O.T. Baikalovedenie [Baikal research]. Irkutsk: IGU Publ., 2009. 291 p.

4. Novikov V.Yu. Razrushenie beregov i zagryaznenie vodnykh ob'ektov [Coastal destruction and pollution of water bodies]. *Voda: khimiya i ekologiya* [Water: chemistry and ecology], 2011, no 7(37), pp. 88–90.

5. SP 32-104-98 Proektirovanie zemlyanogo polotna zheleznykh dorog kolei 1520 mm [Set of rules 32-104-98 Design of earthwork for railways with 1520 mm track]. Moscow: Gosstroj Publ., 1999. 95 p.

6. SP 38.13330.2018 Nagruzki i vozdeistviya na gidrotekhnicheskie sooruzheniya (volnovye, ledovye i ot sudov) (red. 15.12.2021) [Set of rules 38.13330.2018 Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and ships) (ed. December 15, 2021)]. Moscow: Minstroj Publ., 2018. 126 p.

7. SP 46.13330.2012 Mosty i truby [Set of rules 46.13330.2012 Bridges and pipes]. Moscow: Minregion Publ., 2011. 146 p.

8. Protasov N.M., Perelygina A.A. Prinyatie reshenii po zashchite zheleznodorozhnogo puti ot opasnykh inzhenerno-geologicheskikh protsessov pri rekonstruktsii Krugobaikal'skoi zheleznoi dorogi [Decision-making on the protection of the railway track from dangerous engineering and geological processes during the reconstruction of the Circum-Baikal Railway]. *Materialy XXXVII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Tsifrovizatsiya sovremennoi nauki: strategii, innovatsii»* [Proceedings of the XXXVII All-Russian Scientific and Practical Conference «Digitalization of modern science: strategies, innovations»]. Rostov-on-Don, 2022, pp. 160–168.

9. Gulyaeva K.O., Lyapin A.A. Izuchenie arkhitekturnykh pamyatnikov Krugobaikal'skoi zheleznoi dorogi [The research of architectural monuments of the Circum-Baikal Railway]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Teoriya i praktika gradostroitel'stva na poberezh'e ozera Baikal»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Theory and practice of urban planning on the coast of Lake Baikal»]. Irkutsk, 2020, pp. 77–88.

10. Podverbnyi V.A., Perelygina A.A., Protasov N.M. Prinyatie resheniya po uvelicheniyu propusknoi sposobnosti Krugobaikal'skoi zheleznoi dorogi v ramkakh programmy razvitiya osoboi ekonomicheskoi zony [Making a decision to increase the capacity of the Circum-Baikal Railway within the framework of the program for the development of a special economic zone]. *Materialy Mezhdunarodnogo mezhdunarodnogo kongressa «Vysshaya shkola: nauchnye issledovaniya»* [Proceedings of the Interuniversity International Congress «Higher school: scientific research»]. Moscow, 2021, pp. 197–208.

11. Protasov N.M., Perelygina A.A. Vliyaniye rekonstruktsii Krugobaikal'skoi zheleznoi dorogi na prirodopol'zovanie v predelakh Pribaikal'skogo natsional'nogo parka [The impact of the reconstruction of the Circum-Baikal Railway on environmental management within the Pribaikalsky National Park]. *Materialy XV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Global'nye problemy nauchnoi tsivilizatsii, puti sovershenstvovaniya»* [Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference «Global problems of scientific civilization, ways of improvement»]. Stavropol', 2022. Part 1, pp. 283–291.

12. Perelygina A.A., Protasov N.M. *Perspektivy razvitiya Krugobaikal'skoi zheleznoi dorogi s uchetom okhrannykh zon* [Prospects for the development of the Circum-Baikal Railway, taking into account buffer zones]. *Materialy XXXV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Diskussii v oblasti gumanitarnykh, estestvenno-nauchnykh aspektov sovremennosti»* [Proceedings of the XXXV All-Russian Scientific and Practical conference «Discussions in the field of humanitarian, natural-scientific aspects of modernity»]. Simferopol', 2022. Part 1, pp. 296–302.

13. Matveeva L.F., Dzhavadov A.R. Krugobaikal'skaya zheleznaya doroga kak zona ekologo-poznavatel'nogo turizma na osobo okhranyaemoi territorii Pribaikal'ya [The Circum-Baikal Railway as a zone of ecological and educational tourism in the specially protected territory of the Baikal region]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov, prepodavatelei, teoretikov i praktikov «II Manyakinskie chteniya: unikal'nyi turistsko-rekreatsionnyi potentsial «Moskovsko-Sibirskii trakt» («Zolotoe kol'tso Priirtysh'ya») kak element ustoichivogo razvitiya regiona»* [Proceedings of the International scientific and practical conference of students, graduate students, teachers, theorists and practitioners «II Manyakin readings: a unique tourist and recreational potential «Moscow-Siberian tract» («Golden Ring of the Irtysh») as an element of sustainable development of the region»]. Omsk, 2013, pp. 425–429.

14. Terent'eva N.Yu., Frenkel' A.S., Podverbnyi V.A. K voprosu rekonstruktsii ob''ekta kul'turnogo naslediya federal'nogo znacheniya – Krugobaikal'skoi zheleznoi dorogi [On the issue of reconstruction of the object of cultural heritage of federal significance – the Circum-Baikal Railway]. *Zametki uchenogo* [Notes of the scientist], 2023, no 1, pp. 201–211.

15. Federal'nyi zakon ot 01.05.1999 N 94-FZ «Ob okhrane ozera Baikal» (red. ot 01.05.2022) [Federal Law no 94-FL dated May 1, 1999 (ed. May 1, 2022) «On the Protection of Lake Baikal»].

Информация об авторах

Феоктистова Маргарита Владимировна – студентка кафедры «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: bambuk09990@gmail.com.

Титов Константин Михайлович – к. т. н., доцент, и.о. заведующего кафедрой «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: forestgamping@mail.ru.

Information about the authors

Feoktistova Margarita Vladimirovna – student of the Department of Construction of railways, bridges and transport tunnels, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: bambuk09990@gmail.com.

Titov Konstantin Mikhailovich – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Construction of Railways, Bridges and Tunnels, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: forestgamping@mail.ru.