

## **ВОДНЫЕ ПУТИ, ПОРТЫ И ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ**

УДК 627.335.2

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.162>

### **Влияние расположения разгрузочных свай в обратной засыпке на напряженно-деформированное состояние больверка**

**Д. А. Подкорытова**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6955-9828>

*Сибирский государственный университет водного транспорта (СГУВТ), г.  
Новосибирск, Россия*

**Аннотация:** Данная статья посвящена реконструкции и усилению сооружений типа больверк. В работе описан расчет активного давления грунта на причальную стенку типа больверк при усилении последней разгрузочными сваями в обратной засыпке стенки. Целью работы является оценка изменения степени воздействия активного давления грунта при изменении расстояния от разгружающих свай до причальной стенки. Для этого автором выполнен расчет, в ходе которого выявлены и показаны с помощью номограмм и графиков зависимости активного давления грунта от основных характеристик грунта, шага разгрузочных свай, величины угла внутреннего трения, расстояния от разгрузочных свай до стенки; рассмотрены варианты с перекрытиями зон разгрузки и без перекрытий; получены коэффициенты снижения нагрузки при различных условиях работы конструкций. Предложенный расчет позволяет оценить разгрузочный эффект от использования свай в обратной засыпке существующих причальных стенок типа больверк.

**Ключевые слова:** больверк, усиление, свая, обратная засыпка, шпунт, причальная стенка, реконструкция, несущая способность

### **Influence of the location of unloading piles in backfill on the stress-strain state of the bolwerk**

**Daria. A. Podkorytova**

*Siberian State University of Water Transport (SSUWT), Novosibirsk, Russia*

**Abstract.** This article is devoted to the reconstruction and strengthening of structures of the bolwerk type. The paper describes the calculation of the active ground pressure on the berth wall of the bolwerk type when the latter is reinforced by unloading piles in the backfill of the wall. The aim of the work is to assess the change in the degree of impact of active ground pressure when changing the distance from the unloading piles to the mooring wall. The author performed calculations to reveal and show in the form of nomograms and graphs the dependence of active soil pressure on the main characteristics of the soil, spacing of discharge piles, the angle of internal friction, the distance from the unloading of the piles to the wall. The options with overlapping discharge zones and non-overlapping ones are considered; the coefficients of reducing the load under various operating conditions of the structures are obtained. The proposed calculation allows us to estimate the unloading effect of the use of piles in the backfill of existing berth walls of the bolwerk type.

**Keywords:** bolverk, reinforcement, pile, backfill, sheet piling, quay wall, reconstruction, load bearing capacity.

### **Введение**

Утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 29 февраля 2016 г. «Стратегия развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года» предполагает увеличение объема перевозок грузов внутренним водным транспортом. В соответствии с принятой «Стратегией» основной задачей в части развития портовой инфраструктуры является повышение ее надежности и безопасности посредством разработки и реализации комплексных проектов реконструкции гидротехнических сооружений [1]. Планируемое возрастание грузооборота на речном транспорте связано с необходимостью увеличения загрузки прикордонных складских площадей и установкой мощной перегрузочной техники, что в свою очередь приводит к росту нагрузок на причальные стенки. Однако большинство портовых сооружений введено в эксплуатацию более 56 лет назад, многие требуют проведения капитального ремонта. Свыше 50% портовых гидротехнических сооружений находятся в эксплуатации 50-75 лет и более [2].

В этих условиях особое значение приобретают вопросы эффективного использования существующих причальных сооружений. Повышение эффективности использования существующих портовых сооружений может быть осуществлено на основе выявления резервов их несущей способности с целью увеличения пропускной способности портов и повышения несущей способности существующих причалов [3,4,6,7-15].

### **Расчет уменьшения давления в створе разгрузочной сваи**

Изменяя структуру обратной засыпки путем формирования свай, можно добиться изменения угла внутреннего трения грунта обратной засыпки, что повлечет изменение активного давления грунта на сооружение [5].

В качестве примера рассмотрим возможности усиления причальной стенки в виде одноанкерного больверка из металлического шпунта свободной высотой 13 м, глубиной забивки шпунта 7 м, с анкерными тягами, установленными с шагом 1,7 м по всему фронту сооружения (рис. 1). Грунт основания и обратной засыпки – песок средней крупности с углом внутреннего трения  $\varphi = 30^\circ$ , удельным весом  $\gamma = 15 \text{ кН/м}^3$ . Разгружающие сваи устанавливаются в пространства между анкерными тягами с шагом 1,7 м. Глубина погружения свай устанавливается на уровне ниже призмы обрушения грунта на 0,5-1 м.

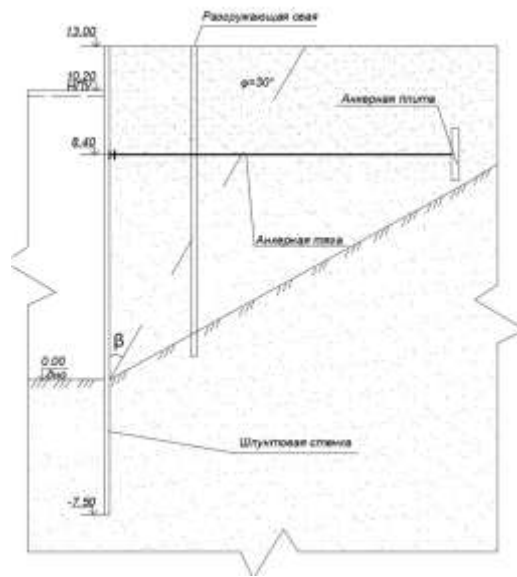


Рис. 1. Одноанкерный больверк с разгружающей свайей

В зависимости от планового расстояния между сваями и положения свай относительно стенки будут меняться площади экранированных и неэкранированных участков грунта обратной засыпки (рис. 2)



Рис. 2. Схема планового расположения экранированных и неэкранированных участков грунта обратной засыпки

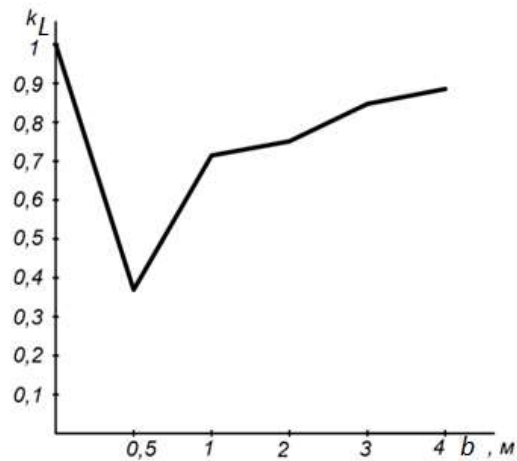


Рис. 3. График изменения коэффициента  $k_L$  в зависимости от расстояния между стенкой и сваяй

Таким образом, из графика видно, что оптимальное расстояние свайного ряда до стенки составляет 0,5 - 4 м.

При разгрузке сваями величина активного давления грунта изменяется. Уменьшение эпюры активного давления грунта показано на рисунке 4.

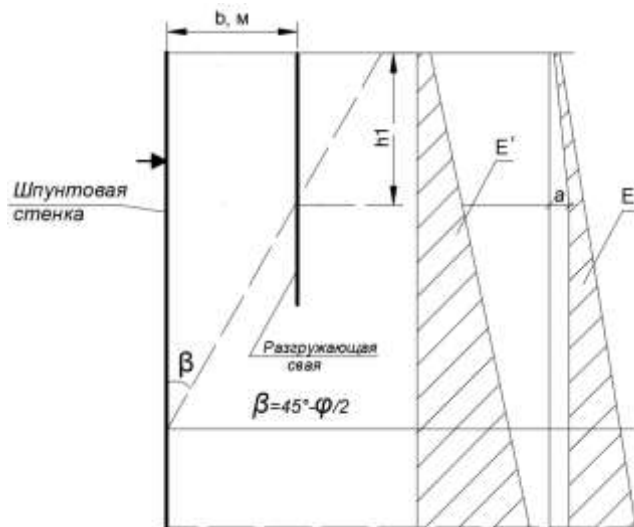


Рис. 4. – Изменение эпюры активного давления грунта

Интенсивность активного давления грунта в точке, отстоящей на расстояние  $h_1$  (рис. 4) от поверхности грунта равна:

$$a = \gamma h_1 \lambda_a \quad (1)$$

где  $\lambda_a$  - коэффициент активного давления грунта;

Коэффициент  $\lambda_a$  при горизонтальной поверхности засыпки, вертикальной стенке и угле трения грунта о стенку  $\delta = 0$  определяется по формуле [4]:

$$\lambda_a = \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi/2), \quad (10)$$

где  $\varphi$  - угол внутреннего трения грунта засыпки.

Давление на стенку при отсутствии разгрузки определяется как площадь эпюры (рис. 4):

$$E = \frac{ah}{2} = \left( \frac{q\lambda_a + (q + \gamma h)\lambda_a}{2} \right) h = q\lambda_a h + \frac{\gamma h^2 \lambda_a}{2} \quad (3)$$

Давление по всему фронту сооружения:

$$E_{\text{полн}} = E \cdot L \quad (4)$$

где  $L$  – длина сооружения по фронту.

Уменьшение давления в створе разгрузочной сваи в точке  $a$ , где выклинивается плоскость естественного откоса, проведенная от сваи, считается как сумма площадей эпюр (рис. 4):

$$E' = \frac{ah_1}{2} + a(h - h_1) = a \left( h - \frac{h_1}{2} \right) \quad (5)$$

Толщина грунта, экранированного свайей  $h_1$  (рис. 5), равна

$$h_1 = b \cdot ctg \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (6)$$

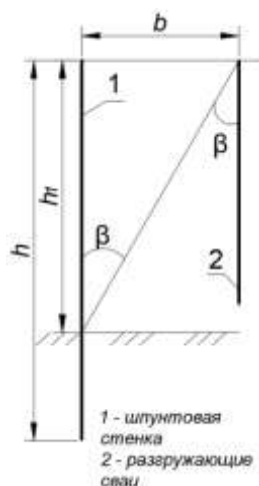


Рис. 5. Толщина грунта, экранированного свайей

Таким образом уменьшение давления будет равно

$$E' = \gamma b \cdot ctg \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \lambda_a \left[ h - \frac{b}{2} ctg \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right] \quad (7)$$

### Расчет уменьшения давления в промежутках между разгрузочными сваями

Рассмотрим, как меняется давление в промежутках между сваями в плановом направлении.

Возможны два варианта, реализация которых определяется характеристиками грунта обратной засыпки. В зависимости от угла внутреннего трения грунта возможно перекрытие зон разгрузки от свай (рис.7) или нет (рис. 6).

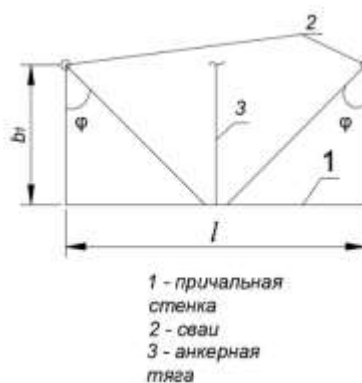


Рис. 6. Схема изменения давления без перекрытия зон разгрузки от свай

Если нет перекрытия, то полный разгрузочный эффект составит

$$E'_{пер} = b_1 \cdot tg\varphi \quad (8)$$



Рис. 7. Схема изменения давления с перекрытием зон разгрузки от свай

В случае перекрытия зон разгрузки полный разгрузочный эффект можно определить по зависимости

$$\frac{E'_{пер}}{E''} = (b_2 \cdot tg\varphi) / (b_2 \cdot tg\varphi - l/2) \quad (9)$$

После некоторых преобразований получим

$$\begin{aligned} E'_{пер} &= 2 \frac{E'' + E' l}{2} \frac{l}{2} = \left[ \frac{E' \cdot (b_2 \cdot tg\varphi - \frac{l}{2})}{b_2 \cdot tg\varphi} + E' \right] \cdot \frac{l}{2} = \\ &= \left[ E' - \frac{l}{2b_2 \cdot tg\varphi} E' + E' \right] \cdot \frac{l}{2} = \left[ 2E' - \frac{lE'}{2b \cdot tg\varphi} \right] \frac{l}{2} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \left[ E' l \left( 1 - \frac{l}{4b_2 \cdot \text{tg}\varphi} \right) \right] = \\
 &= \gamma b \text{ctg} \left( 45 - \frac{\varphi}{2} \right) \lambda_a \left( h - \frac{h_1}{2} \right) l \left( 1 - \frac{l}{4b_2 \cdot \text{tg}\varphi} \right) = \\
 &= \gamma b_2 \text{ctg} \left( 45 - \frac{\varphi}{2} \right) \lambda_a \left[ h - \frac{b_2}{2} \text{ctg} \left( 45 - \frac{\varphi}{2} \right) \right] l \left( 1 - \frac{l}{4b_2 \cdot \text{tg}\varphi} \right)
 \end{aligned} \tag{10}$$

Коэффициент уменьшения активного давления грунта определим как соотношение значения уменьшения давления к значению активного давления на стенку без разгрузки.

$$\text{Если нет перекрытий: } k_{\text{б.п.}} = \frac{\gamma b \cdot \text{ctg} \left( 45 - \frac{\varphi}{2} \right) \lambda_a \left( h - \frac{b}{2} \text{ctg} \left( 45 - \frac{\varphi}{2} \right) \right) b \cdot \text{tg}\varphi}{\lambda_a h \left( q + \frac{\gamma h}{2} \right) l} \tag{11}$$

$$\text{Если есть перекрытия: } k_{\text{п}} = \frac{\gamma b \cdot \text{ctg} \left( 45 - \frac{\varphi}{2} \right) \lambda_a \left( h - \frac{b}{2} \text{ctg} \left( 45 - \frac{\varphi}{2} \right) \right) l \cdot \left( 1 - \frac{l}{4b \cdot \text{tg}\varphi} \right)}{\lambda_a h \left( q + \frac{\gamma h}{2} \right)}$$

### Оценка влияния расчетных параметров на общий разгрузочный эффект

Вернемся к полученной ранее зависимости (7) и попытаемся проанализировать степень влияния входящих в нее параметров на общий разгрузочный эффект. Для этого построим номограмму (рис. 8), позволяющую легко оценить роль каждого параметра. Изначально представим зависимость (7) в более компактной форме:

$$E' = \gamma b \left[ \frac{h}{\text{ctg} \left( 45 - \frac{\varphi}{2} \right)} - \frac{b}{2} \right] \tag{12}$$

Приведенная номограмма позволяет легко оценить степень разгрузки бьева в зависимости от характеристик грунта обратной засыпки и удаления разгрузочной сваи от фронта причала. Очевидно, что положительное влияние величины  $b$  на разгрузочный эффект может работать только в определенных пределах удаления сваи. Для оценки величины зоны удаления сваи, при которой наблюдается значительный разгрузочный эффект, проверим зависимость (7) на экстремум. Находим производную от выражения (7) и приравняем к нулю.

$$\frac{dE'}{db} = \gamma \lambda_a \text{ctg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) h - \gamma \lambda_a \text{ctg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) b = 0 \tag{13}$$

Отсюда получаем зависимость  $\frac{b}{h}$  от  $\varphi$ , соответствующую максимальному разгрузочному эффекту:

$$\frac{b}{h} = \frac{1}{\text{ctg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)} \tag{14}$$

Полученные из формулы (14) результаты показаны на рис.9.

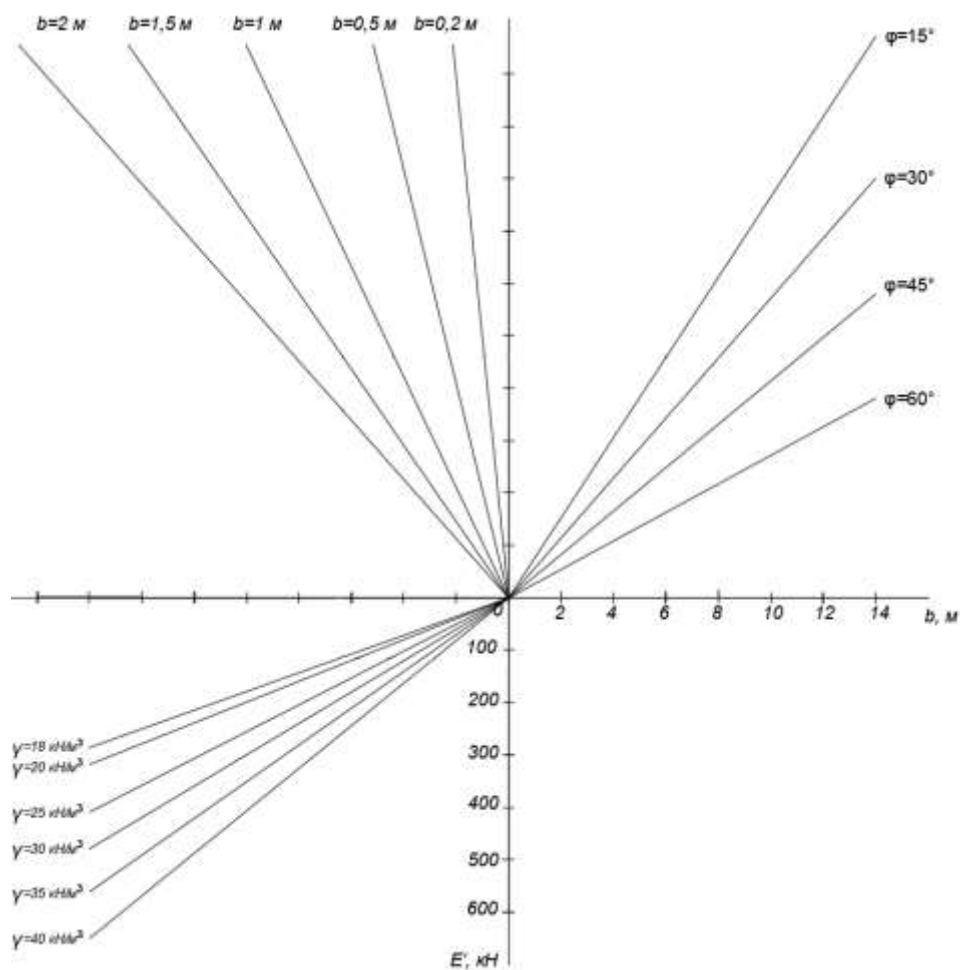
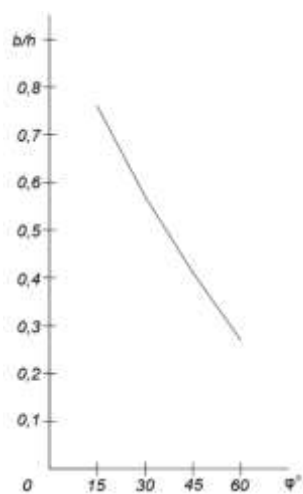


Рис. 8. Номограммы зависимости уменьшения активного давления грунта на стенку от различных параметров

Рис. 9. Зависимость эффективного соотношения расстояния сваи до стенки к глубине забивки сваи от угла внутреннего трения грунта





Анализ соотношения (7) также позволяет найти такое соотношение между величинами  $b$  и  $h$ , при котором разгрузочного эффекта не будет вовсе, для этого примем уменьшение нагрузки  $E'$  (7) равным нулю.

$$E' = \gamma b \lambda_a \cdot \operatorname{ctg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \left[ h - \frac{b}{2} \operatorname{ctg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right] = 0$$

$$b = \frac{2h}{\operatorname{ctg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)} \quad (15)$$

Полученная зависимость также отображена на рис. 10.

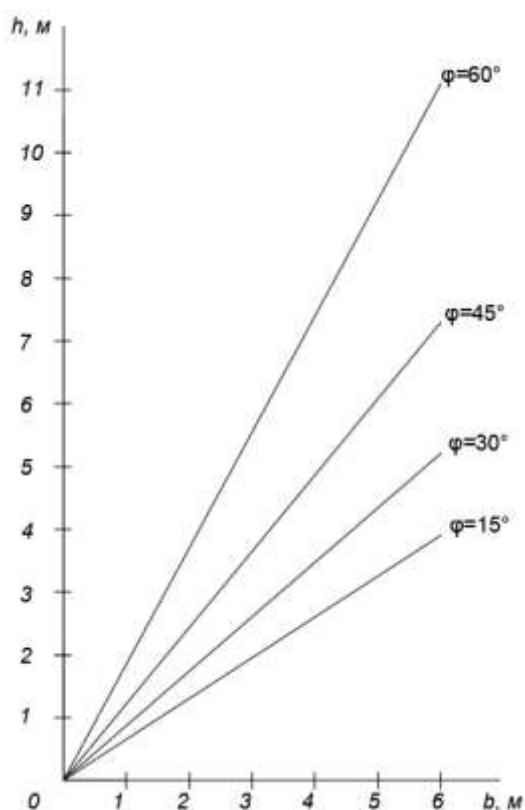


Рис. 10. Соотношение между глубиной забивки сваи и ее удаленностью от стенки, при котором свая перестает оказывать разгрузочное воздействие (для различных углов внутреннего трения грунта)

### Заклучение

В результате вышеприведенного анализа работы разгрузочных свай выявлено влияние их расположения в обратной засыпке на степень сокращения нагрузок на больверк. Получены коэффициенты снижения нагрузки при различных условиях работы конструкций.

### Литература

1. Распоряжение Правительства РФ от 29.02.2016 N 327-р Об утверждении Стратегии развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года
2. Бик Ю. И. Проблемы сохранения гидротехнических сооружений в речных портах Сибири/ Сборник научных трудов "Строительные конструкции и расчет гидротехнических сооружений в условиях проведения экономических реформ". - Новосибирск, 2002. - С. 4-5.
3. Удовиченко В.Н., Яковлев П.И., Морские и речные гидротехнические сооружения: учебник /М., "Транспорт", 1976, - 416 с.
4. А. Я. Будин Усиление портовых сооружений: учебник / А. Я. Будин, М. В. Чекренева. — М: Изд-во «Транспорт», 1983.— 179 с.
5. А. Я. Будин Тонкие подпорные стенки для условий Севера: учебник / А. Я. Будин — Ленинград: Изд-во «Стройиздат. Ленинградское отделение», 1982.— 288 с.
6. Елицур Д. В. Повышение эффективности использования остаточного ресурса реконструируемых причальных набережных в районах Сибири и Крайнего Севера : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.22.19 / Елицур Дмитрий Валерьевич; [Место защиты: Новосиб. гос. акад. водного транспорта]. - Новосибирск, 2007. - 17 с.
7. Шихиев, Ф. М. Кинематическая теория давления грунтов на причальные сооружения и другие типы жестких и гибких ограждений [Текст] : Автореферат дис. на соискание ученой степени доктора технических наук / Ленингр. ин-т водного транспорта. - Ленинград : [б. и.], 1965. - 37 с. : ил.
8. Подкорытова Д. А. Применение методов инъектирования в строительстве // Наука. Технологии. Инновации: сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. – Стерлитамак, 2018 – С.91
9. Thoft Christensen P., Baker M.J. Structural reliability theory and its applications. Springer Verlag, 1982.
10. Joint Committee on Structural Safety. Basic notes on actions. Entwurf, April, 1984.
11. Kochel: Zuverlässigkeit technischer systeme. Leipzig: VEB Fachbuchverlag, 1982
12. Halmos E.E. Reinforced earth walls.-Concrete Products, vol.80, N 6, 1977.-p.30-33.
13. Benjamin I.R., Cornell C.Allin. Probability, statistics and decision for civil engineers. New York: McGraw-Hill Book Company, 1970.
14. Chang Y.C., Forsyth R. A. Desing and field behaviour of reinforced earth wall.- Proc.ASCE, J.Geotechn. Eng. Div., vol.103, N 7, 1977.-p.677-692.
15. Cornell C.A. A first-order reliability theory for structural desing. Cana-da: University of Waterloo, Solid Mechanics Division, Study N 3, Ontario.
16. Vidal H.C. United States Patent office. 3,570,253.Pa-tented Mar. 16, 1971. Constructional Works. Henri C. Vidal, 17 Rue Armengand, 92 st. Cloud, France.

### References

1. Order of the Government of the Russian Federation of February 29, 2016 N 327-r On approval of the Strategy for the development of inland water transport of the Russian Federation for the period until 2030
2. Bik Yu. I. Problems of preserving hydraulic structures in the river ports of Siberia / Collection of scientific papers "Building structures and calculation of hydraulic structures in the context of economic reforms". - Novosibirsk, 2002 .-- S. 4-5.
3. Udovichenko VN, Yakovlev PI, Marine and river hydraulic structures: textbook / M., "Transport", 1976, - 416 p.
- A. Ya. Budin Strengthening of port facilities: textbook / A. Ya. Budin, MV Chekreneva. - M: Publishing house "Transport", 1983. - 179 p.
- B. Ya. Budin Thin retaining walls for the conditions of the North: textbook / A. Ya. Budin - Leningrad: Publishing house "Stroyizdat. Leningrad branch ", 1982. - 288 p.
4. Elitsur DV Increasing the efficiency of using the residual resource of reconstructed quayside embankments in Siberia and the Far North: abstract dis. ... candidate of technical sciences: 05.22.19 / Elitsur Dmitry Valerievich; [Place of protection: Novosib. state acad. water transport]. - Novosibirsk, 2007 .-- 17 p.

5. Shikhiev, FM Kinematic theory of soil pressure on berthing facilities and other types of rigid and flexible barriers [Text]: Abstract of the dis. for the degree of Doctor of Technical Sciences / Leningrad. Institute of water transport. - Leningrad: [b. and.], 1965. - 37 p. : ill.
6. Podkorytova DA Application of injection methods in construction. Science. Technologies. Innovation: a collection of articles on the results of the International Scientific and Practical Conference. - Sterlitamak, 2018 - p. 91
7. Thoft Christensen P., Baker M.J. Structural reliability theory and its applications. Springer Verlag, 1982.
8. Joint Committee on Structural Safety. Basic notes on actions. Entwurf, April, 1984.
9. Koehl: Zuverlässigkeit technischer systeme. Leipzig: VEB Fachbuchverlag, 1982
10. Halmos E.E. Reinforced earth walls.-Concrete Products, vol. 80, No. 6, 1977, p. 30 33.
11. Benjamin I. R., Cornell C. Allin. Probability, statistics and decision for civil engineers. New York: McGraw-Hill Book Company, 1970.
12. Chang Y.C., Forsyth R. A. Desing and field behavior of reinforced earth wall. Proc. ASCE, J. Geotechn. Eng. Div., Vol. 103, No. 7, 1977.-p. 677-692.
13. Cornell C.A. A first-order reliability theory for structural desing. Cana-da: University of Waterloo, Solid Mechanics Division, Study N 3, Ontario.
14. Vidal H.C. United States Patent office. 3,570,253.Pa-tented Mar. 16, 1971. Constructional Works. Henri C. Vidal, 17 Rue Armengand, 92 st. Cloud, France.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Подкорытова Дарья Александровна, Daria A. Podkorytova**, postgraduate of the аспирант кафедры строительных конструкций и охраны водных ресурсов, Новосибирский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «СГУВТ»), 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: dariya9191@mail.ru  
Department of Building Structures and Water Resources Protection, Novosibirsk State University of Water Transport, 33, Shtetinkina st, Novosibirsk, 630099

Статья поступила в редакцию 12.01.2021; опубликована онлайн 23.03.2021.  
Received 12.01.2021; published online 23.03.2021.