

А.В. Набока, Д.Г. Петренко

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МОНОЛІТНОЇ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ ПРИЧАЛЬНОЇ СТІНКИ

Наукова робота присвячена комплексному дослідженню напружено-деформованого стану причальної стінки, промислового об'єкта, що тривалий час знаходиться в процесі будівництва. Виконана пратична оцінка фізико-механічних характеристик матеріалів, використаних при будівництві. Проведена лабораторна верифікація отриманих даних за актуальною методикою та згідно до вимог українських будівельних нормативних документів.

Ключові слова: розрахунок, причальна стінка, напружено-деформований стан, верифікація, залізобетон.

Постановка проблеми

Під час зведення відповідальних конструкцій часто виникає необхідність проведення контролю якості будівельно-монтажних робіт; часто з залученням представників незалежних наукових та виробничих лабораторій для отримання всеосяжної оцінки причин виникнення тих чи інших дефектів і, як наслідок, повне усунення факторів, що призвели до певного порушення технологічного процесу виробництва[1].

Наукові дослідження причальних стінок потребують подальшого поглиблення. Причальні стінки зазвичай є земляними підпірними спорудами, до яких можуть причалювати судна. Вони можуть бути розташовані на морі, озері чи річці, всередині гавані чи каналу та оснащені необхідною надбудовою (болларди, крани, крани тощо), щоб дозволити звичайні операції з перевантаження вантажів. Завдяки внутрішнім перевагам морського транспорту, які постійно зростають протягом останніх десятиліть і, за прогнозами, продовжуватимуть зростати, у портових адміністрацій немає іншого вибору, окрім розширення та модернізації. Проектування та будівництво нових причальних стінок для розміщення все більших і більших контейнеровозів перетворюється на серйозний виклик. [2, 3].

Дуже часто потрібна ділянка землі за причалом для обробки та штабелювання вантажу морських суден, і це потребує причальної стінки, до якої буде пришвартовано судно, і яка сама утримуватиме заповнення площі суші. Тип причальної стінки, який підходить для басейну гавані, який буде викопано в сухому стані, може бути непрактичним для будівництва на вологому місці в усталеному басейні гавані, або навпаки. Особливі геотехнічні умови можуть виключати певні типи стін; непридатні там,

де тверда порода існує на невеликій глибині. [4, 5, 6].



Рис. 1. Загальний вид причальної стінки

На період обстеження і проведення дослідницьких робіт, Замовником було надано комплекти конструкторської робочої документації на будівництво причальної стінки. На час проведення обстеження було збудовано 4 із 7 секцій стінки.

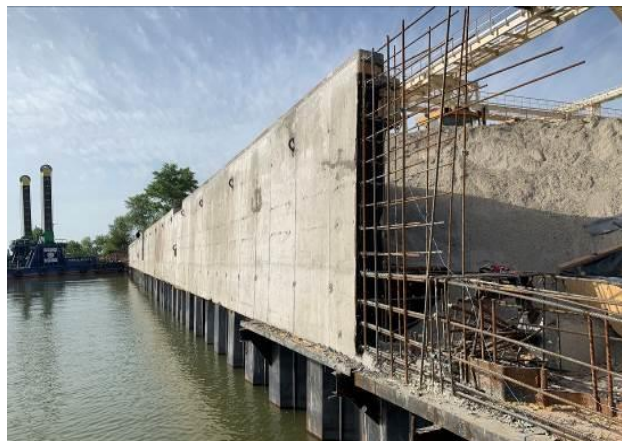


Рис. 2. Недобудована секція причальної стінки

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогоднішній день актуальне питання вдосконалення конструктивних систем причальних конструкцій. Тип і конструкція причалів залежить від природних (геологічних, гідрологічних) і технологічних умов (глибини біля причалів, навантаження на них). Сукупність причальних споруд в порту являє собою причальний фронт.[7, 8].

Багато вчених займаються вдосконаленням основних положень з проектування та розрахунку гідротехнічних споруд: глухих земляних та бетонних гребель, водозливних гребель на скельній та нескельній основах, берегових водоскидів, водоскидів із заглибленим трактом, а також воднотранспортних споруд [9, 10]. Тим не менш є необхідність створення нових методів розрахунку саме для монолітних залізобетонних підпорних стінок [11].

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є експериментальне встановлення фізико-механічних характеристик монолітної залізобетонної підпорної стінки для подальшої безпечної експлуатації зазначеного об'єкта.

Виклад основного матеріалу

Підпорна стінка – являє собою монолітну залізобетонну конструкцію, основу для зведення причалу загалом.

В ході детального обстеження конструкцій підпорної стінки було проведено візуальний огляд будівельних конструкцій, а також окремих його елементів за для визначення їх технічного стану, ступеня фізичного зносу та несучої здатності.

Для вимірювання перетинів елементів використовувалася металева рулетка, лінійка і штангенциркуль. Висоти вимірювалися за допомогою лазерної рулетки BOSCH PLR 50.

Під час натурного дослідження було детально вивчена підпорна стінка. Встановлені геометричні характеристики конструктивів.

За результатами дослідження відмічається наступне.

При візуальному огляді конструкції були виявлені деякі дефекти, серед яких:

1) Зведені секції підпорної стінки (1, 2, 3, 7) мають невластивий якісному бетону колір.

2) Наявність поодиноких сіток тріщин. Тим не менш ширина розкриття допустима у межах 0,3 мм

З п'яти типів причальних стінок (блокових, кесонних, контрфорсних, консольних і шпунтових) перші чотири можна побудувати «сухим способом» звичайними методами. Блокові, кесонні та контрфорсні стіни в морському будівництві

потребують певного днопоглиблення для формування стабільної платформи та формування кам'яного ложа, на якому можна розмістити відповідні блоки. Днопоглиблення зазвичай виконується за допомогою захвату, всмоктування фрезером і зазвичай це виконує спеціалізований субпідрядник.



Рис. 3. Тріщини на поверхні бетону

На об'єкті були проведені дослідження міцності бетону неруйнівним методом контролю міцності бетону з використанням вимірювача міцності ОНИКС-2,5. ОНИКС-2,5 (далі – прилад) призначений для визначення міцності бетонів методом ударного імпульсу (згідно з вимогами ДСТУ Б.В.2.7 – 220:2009 «Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю»). Цей прилад використовується для неруйнівного вимірювання міцності бетону на стиск. Таким чином бетон перевіряється на його несучу здатність і міцність. Принцип вимірювання полягає в тому, що вимірювальний наконечник (сталевий куля) вдарає по бетону. Відскок вимірюється пристроєм і може бути перетворений на міцність на стиск. Оскільки звичайне вимірювання неможливо провести в лабораторії, коли залізобетонна конструкція вже зведена, прилад для випробування бетону використовується на місці. Після виконання серії ударів із заданого числа ударів на дисплеї приладу відображається результат серії (одиничний результат в серії, середній результат (міцність), фактичний бетону). Клас бетону визначається з урахуванням вимог ДБН В.2.6–98:2009 «Бетонні і залізобетонні конструкції. Основні положення по проектування».

Випробування міцності бетону проведені при температурі зовнішнього повітря $t = +22^{\circ}\text{C}$ і вологості повітря 50%.

Нижче в таблиці 1 наведені оброблені дані випробувань бетону для підпорної стінки (1, 2, 3, 7

секції).

Таблиця 1

Результати неруйнівних випробувань

№ п/п	Секція	Найменування конструкції	Кількість ударів	Показання «ОНИКС – 2.5», В	Середня міцність бетону, МПа	Клас бетону за ДСТУ В2.6-98*
1	1	Підпорна стінка	10	B7,5	12,4	-
2	1	Підпорна стінка	10	B7,5	12,1	-
3	1	Підпорна стінка	10	B10	16,9	-
4	1	Підпорна стінка	10	B7,5	11,4	-
5	1	Підпорна стінка	10	B7,5	10,1	-
6	1	Підпорна стінка	10	B7,5	11,7	-
7	1	Підпорна стінка	10	B7,5	12,8	-
8	1	Підпорна стінка	10	B7,5	12,0	-
9	1	Підпорна стінка	10	B7,5	10,9	-
10	1	Підпорна стінка	10	B7,5	9,4	-
11	2	Підпорна стінка	10	B7,5	12,7	-
12	2	Підпорна стінка	10	B7,5	12,4	-
13	2	Підпорна стінка	10	B7,5	11,2	-
14	2	Підпорна стінка	10	B10	17,3	-
15	2	Підпорна стінка	10	B7,5	10,6	-
16	2	Підпорна стінка	10	B7,5	12,5	-
17	2	Підпорна стінка	10	B7,5	11,2	-
18	2	Підпорна стінка	10	B7,5	12,4	-
19	2	Підпорна стінка	10	B10	17,3	-
20	2	Підпорна стінка	10	B7,5	11,9	-
21	3	Підпорна стінка	10	B7,5	9,9	-
22	3	Підпорна стінка	10	B7,5	11,3\	-
23	3	Підпорна стінка	10	B7,5	11,8	-
24	3	Підпорна стінка	10	B7,5	12,4	-
25	3	Підпорна стінка	10	B7,5	12,3	-
26	3	Підпорна стінка	10	B7,5	12,9	-
27	3	Підпорна стінка	10	B7,5	12,3	-
28	3	Підпорна стінка	10	B7,5	10,7	-
29	3	Підпорна стінка	10	B7,5	9,6	-
30	3	Підпорна стінка	10	B7,5	9,8	-
31	4	Підпорна стінка	10	B10	16,8	-
32	4	Підпорна стінка	10	B10	17,8	-
34	4	Підпорна стінка	10	B7,5	10,2	-
35	4	Підпорна стінка	10	B7,5	10,7	-
36	4	Підпорна стінка	10	B7,5	10,9	-
37	4	Підпорна стінка	10	B7,5	8,9	-
38	4	Підпорна стінка	10	B7,5	11,3	-
39	4	Підпорна стінка	10	B7,5	10,4	-
40	4	Підпорна стінка	10	B7,5	9,4	-
Середній клас бетону				B7,5	11,94	-

*Примітка. За сучасною класифікацією бетонів подібний клас бетону (B10) не передбачений. Найнижчим класом є C12/15, що відповідає класу B15 за старими нормами, тому в таблиці 1 в останньому стовпчику стоять прочерки.

Для верифікації проведених досліджень були

відібрані бетонні зразки - кубики з підпорної стінки. Таким чином були проведені лабораторні випробування вищезазначених зразків руйнівним методом на пресі ПСУ 250. Процес випробувань представлений на рис. 4 – 7. Результати досліджень наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Результати руйнівних випробувань

№ зразка п/п	Секція	Геометричні розміри, см	Площа, S, см ²	Руйнуюче зусилля кгс	Кубічна міцність R _{кубіка} , кг/см ²	Кубічна міцність нестандартного кубика R _{кубіка} , кг/см ²
1	1	10x10x10	100	26000	260	241,8
2	1	10x10x10	100	31700	317	294,8
3	2	10x9,8x10	98	15400	157,14	146,14
4	2	10x9,8x10	98	20000	204,08	189,79
5	2	10x9,8x10	98	19400	197,95	184,1
6	3	10x9,8x10	98	17800	181,63	168,91
7	3	10x9,8x10	98	12200	124,48	115,77
8	3	10x9,6x10	96	13800	143,75	133,68
9	3	10x9,6x10	96	17000	177,08	164,68
10	7	10x9,8x10	98	31200	318,36	296,08
11	7	10x9,8x10	98	22600	230,61	214,46
12	7	10x10x10	100	29200	292	271,56
Середнє значення R _{кубіка}						201,8



Рис. 4. Підготовка до руйнівних випробувань



Рис. 6. Процес руйнування зразка



Рис. 5. Процес прикладання навантаження



Рис. 7. Загальний вид випробуваних зразків

Співвідношення між кубічною циліндричною міцністю при нестандартному кубіку і стандартному кубіку (150x150x150 мм)

$$R_{\text{кубика}} = \frac{R}{S}$$

$$S = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$R_{\text{кубика(нестандартного)}} = 0,93 R_{\text{кубика}}$$

Після проведе відповідних розрахунків знаходимо середнє значення $R_{\text{циліндра}} = 201,8 \text{ кг/см}^2$.

Величина фактичного класу бетону визначалась при:

$\beta = 1,64$ (коефіцієнт, що враховує забезпеченість рівною 0,95);

$\nu = 0,135$ (коефіцієнт варіації для важких бетонів).

$$B = R (1 - 1,64 * 0,135) = R * 0,7786.$$

Тобто клас бетону:

$$B = R * 0,7786 = 201,8 * 0,7786 = 157,12 \text{ кг/см}^2$$

Міцність бетону 157,12 кг/см² відповідає класу В7,5, оскільки новітні норми не передбачають такого низького класу бетону.

Висновки

1. Вдосконалений експериментальний алгоритм встановлення фізико-механічних характеристик деформативності причальної стінки, що тривалий час знаходиться в процесі будівництва.

2. Проведена комплексне дослідження будівельних конструкцій, визначені фактичні характеристики матеріалів.

3. Проведено додатковий експертний аналіз конструктивної системи причальної стінки.

4. За результатами проведених комплексних теоретично-експериментальних досліджень надано пропозиції щодо подальшої безпечної експлуатації.

5. Отримані результати в подальшому можуть бути використані інженерами для встановлення причин порушення технологічного процесу виробництва.

Література

- Петрусенко В.П. Аналіз ефективності контрзаходів для захисту екосистем на схилових ландшафтах методом камерних моделей. / В.П. Петрусенко, Ю.О. Кутлахмедов // *Proceedings of National Aviation University* – 2006. – 30(4), 163–165. – DOI: [10.18372/2306-1472.30.1404](https://doi.org/10.18372/2306-1472.30.1404).
- Набока А.В. Дослідження напружено-деформованого стану залізобетонного перекриття гідростатичним методом / А.В. Набока., П.А. Резнік, Д.Г. Петренко, П.М. Фіров // *Municipal economy of cities. Series: Engineering science and architecture* – 2024. – Vol. 1 (182). – P. 90–97. – DOI: [10.33042/2522-1809-2024-1-182-90-96](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-1-182-90-96).
- Antonini, A. Wave simulation for the design of an innovative quay wall: the case of Vlorë Harbour / A. Antonini, R. Archetti, A. Lamberti // *Natural Hazards and Earth System Sciences* – 2017. – Vol. 17 – P. 127–142. – DOI: [10.5194/nhess-17-127-2017](https://doi.org/10.5194/nhess-17-127-2017).
- Taveira Pinto F. Efficiency analysis to reflection of a new

quay wall type / F. Taveira Pinto, P. Rosa Santos, F. Veloso Gomes, H. Guedes Lopes // *Journal of Hydraulic Research*. – 2011. – Vol. 49 (4). – P. 539–546. – DOI: [10.1080/00221686.2011.574378](https://doi.org/10.1080/00221686.2011.574378).

5. Tan H. Field testing and numerical analysis on performance of anchored sheet pile quay wall with separate pile-supported platform / H. Tan, Z. Jiao, J. Chen // *Marine Structures*. – 2018. – Vol. 58. – P. 382–398. – DOI: [10.1016/j.marstruc.2017.12.006](https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2017.12.006).

6. Chen S. Numerical studies on the stability of caisson quay wall / S. Chen, W. Guo, Y. Ren // *Ocean Engineering*. – 2024. – Vol. 296. – Article 116892 – DOI: [10.1016/j.oceaneng.2024.116892](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.116892).

7. Dakoulas P. Effective-stress seismic analysis of a gravity multi-block quay wall / P. Dakoulas, P. Vazouras, P. Kallioglou, G. Gazetas // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* – 2018. – Vol. 115. – P. 378–393. – DOI: [10.1016/j.soildyn.2018.08.032](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.08.032).

8. Matteotti G. Some results of quay-wall model tests on earth pressure / G. Matteotti, Q. Boussines, B. Coulom // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* – 2015. – Vol. 47 (2). – P. 185–204. – DOI: [10.1680/iicep.1970.6614](https://doi.org/10.1680/iicep.1970.6614).

9. Paulauskas V. Quay wall stability and strength evaluation / V. Paulauskas, B. Placiene, D. Paulauskas, R. Barzdziukas // *Mechanika* – 2017. – Vol. 23 (2). – P. 298–304. – DOI: [10.5755/j01.mech.23.2.13776](https://doi.org/10.5755/j01.mech.23.2.13776).

10. Ruggeri P. Renovation of quay walls to meet more demanding requirements: Italian experiences / P. Ruggeri, V. Marianne, E. Fruzzetti, G. Scarpelli // *Coastal Engineering* – 2019. – Vol. 147. – P. 25–33. – DOI: [10.1016/j.coastaleng.2019.01.003](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.01.003).

11. Набока А.В. Дослідження напружено-деформованого стану збірних залізобетонних багатопустотних плит при дії зосередженого і рівномірно розподіленого навантаження / А.В. Набока., Д.Г. Петренко, Ю.М. Круль, С.С. Злобін // *Науковий вісник будівництва* – 2024. – Vol. 110. – P. 70–76. – DOI: [10.33042/2311-7257.2024.110.1.10](https://doi.org/10.33042/2311-7257.2024.110.1.10).

References

- Petrusenko, V. P., Kutlakhmedov, Yu. O. (2006). Analysis of the effectiveness of countermeasures to protect the ecosystems on slopes landscapes using box models. *Proceedings of National Aviation University*, 30(4), 163–165. DOI: [10.18372/2306-1472.30.1404](https://doi.org/10.18372/2306-1472.30.1404) [in Ukrainian]
- Naboka, A. V., Reznik, P. A., Petrenko, D. G., Firsov, P. M., (2024). Study of the stress-strain state of a reinforced concrete slab using hydrostatic method. *Municipal economy of cities. Series: Engineering science and architecture*, 1(182), 90–97. DOI: [10.33042/2522-1809-2024-1-182-90-96](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-1-182-90-96) [in Ukrainian]
- Antonini, A., Archetti, R., Lamberti, A. (2017). Wave simulation for the design of an innovative quay wall: the case of Vlorë Harbour. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17, 127–142. DOI: [10.5194/nhess-17-127-2017](https://doi.org/10.5194/nhess-17-127-2017)
- Taveira Pinto, F., Rosa Santos, P., Veloso Gomes, F., Guedes Lopes, H. (2011). Efficiency analysis to reflection of a new quay wall type. *Journal of Hydraulic Research*, 49(4), 539–546. DOI: [10.1080/00221686.2011.574378](https://doi.org/10.1080/00221686.2011.574378)
- Tan, H., Jiao, Z., Chen, J. (2018). Field testing and numerical analysis on performance of anchored sheet pile quay wall with separate pile-supported platform. *Marine Structures*, 58, 382–398. DOI: [10.1016/j.marstruc.2017.12.006](https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2017.12.006)
- Chen, S., Guo, W., Ren, Y. (2024). Numerical studies on the stability of caisson quay wall. *Ocean Engineering*. 296, (116892). DOI: [10.1016/j.oceaneng.2024.116892](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.116892).
- Dakoulas, P., Vazouras, P., Kallioglou, P., Gazetas, G. (2018). Effective-stress seismic analysis of a gravity multi-block quay wall. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 115, 378–393. DOI: [10.1016/j.soildyn.2018.08.032](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.08.032)

8. Matteotti, G., Boussines, Q., Coulom, B. (2015). Some results of quay-wall model tests on earth pressure. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 47(2), 185-204. DOI: [10.1680/jicep.1970.6614](https://doi.org/10.1680/jicep.1970.6614)
9. Paulauskas, V., Placiene, B., Paulauskas, D., Barzdzikus, R. (2017). Quay wall stability and strength evaluation. *The Mechanika*, 23(2), 298-304. DOI: [10.5755/j01.mech.23.2.13776](https://doi.org/10.5755/j01.mech.23.2.13776)
10. Ruggeri, P., Marianne, V., Fruzzetti, E., Scarpelli, G. (2019). Renovation of quay walls to meet more demanding requirements: Italian experiences. *Coastal Engineering*, 147, 25–33. DOI: [10.1016/j.coastaleng.2019.01.003](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.01.003)
11. Naboka, A. V., Petrenko, D. G., Krul, Yu. M., Zlobin S.S. (2024). Research of the stress-strain state of precast reinforced concrete hollow core slabs under the action of a concentrated and uniformly distributed load 110, 70–76. DOI: [10.33042/2311-7257.2024.110.1.10](https://doi.org/10.33042/2311-7257.2024.110.1.10). [in Ukrainian]

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Д. А. Плугін, Український державний університет

залізничного транспорту, Україна.

Автор: НАБОКА Анатолій Віталійович
кандидат технічних наук, доцент кафедри
будівельних конструкцій
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – anatoliinaboka@ukr.net
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4462-7927>

Автор: ПЕТРЕНКО Дмитро Григорович
кандидат технічних наук, доцент кафедри
будівельних конструкцій
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – petrenko_dmytro@ukr.net
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8168-7224>

STUDY OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE QUAY WALL

A. Naboka, D. Petrenko

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

The scientific work is devoted to a comprehensive study of the stress-strain state of the quay wall, an industrial facility that has been under construction for a long time. A practical assessment of the physical and mechanical characteristics of the materials used in the construction was carried out. Laboratory verification of the obtained data was carried out using the current methodology and in accordance with the requirements of Ukrainian building codes. When constructing piers, materials with various properties are used: wood, concrete, reinforced concrete, steel. Often, pier structures are made of different materials. For example, the base is made of wooden or metal piles, and the deck is made of reinforced concrete. However, the most common are reinforced concrete or concrete structures. Quay wall – is a monolithic reinforced concrete structure, the basis for the construction of the pier as a whole. During a detailed inspection of the retaining wall structures, a visual inspection of the building structures, as well as its individual elements, was carried out to determine their technical condition, degree of physical wear and tear, and bearing capacity. During the field study, the retaining wall was studied in detail. The geometric characteristics of the structures were established. The results of the study show the following: during the visual inspection of the structure, some defects were found, including; the erected sections of the quay wall (1, 2, 3, 7) have a color that is not typical of high-quality concrete. The presence of some cracks. Nevertheless, the opening width is permissible within 0.3 mm.

The experimental algorithm for establishing the physical and mechanical characteristics of the quay wall deformability, which has been under construction for a long time, has been improved. A comprehensive study of building structures has been carried out; the actual characteristics of materials have been determined. An additional expert analysis of the structural system of the quay wall has been carried out. Based on the results of the comprehensive theoretical and experimental studies, proposals have been made for further safe operation. The results obtained can be used by engineers in the future to establish the causes of disruptions in the technological process of production.

Keywords: calculation, quay wall, stress-strain state, verification, reinforced concrete.