

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-1-57-65>

УДК 626.8:624.082



УГОЛКОВЫЕ ПОДПОРНЫЕ СТЕНЫ С ВЕРТИКАЛЬНЫМИ КОНСОЛЯМИ В ВИДЕ ОБОЛОЧЕК И СКЛАДОК

Т.В. Варламова^{1✉}, Т.К. Ксенофонтова²¹ Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.; 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, Россия² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Б. Академическая, 44, Россия

Аннотация. Предмет исследований – железобетонные угловые подпорные стены, широко используемые в гидротехническом строительстве. Оптимизация формы вертикальной консоли угловых подпорных стен является важной для уменьшения внутренних усилий и повышения устойчивости конструкций. При замене плоских панелей пространственными конструкциями в консоли уменьшаются изгибающие моменты; преимущественная работа конструкций на сжатие или растяжение позволяет уменьшить их толщину за счет более эффективного использования материалов. Целью исследований явилось определение оптимальной формы и характера армирования вертикальных консолей подпорных стен в зависимости от их высоты. Исследования проводились в сертифицированном программном комплексе «ЛИРА-САПР 2021». Разработаны расчетные модели угловых подпорных стен с консолями в виде многоволновых цилиндрических оболочек и складок. В местах сопряжения волн и граней складок предусмотрены стойки, заземленные в грунте. Выполнены сравнительные расчеты конструкций в программном комплексе «ЛИРА-САПР 2021». Проанализированы результаты расчетов. Сделаны выводы по оптимизации конструкций подпорных стен с вертикальной консолью в виде оболочек и складок. Исследования показали, что при высоте подпорной стенки до 3 м более рациональной по расходу материалов является подпорная стена с консолью в виде многоволновой оболочки. При высоте более 3 м рациональными становятся подпорные стены с консолью в виде складок с вертикальными стойками в местах сопряжения граней. Для консолей в виде оболочек рекомендуется двойное армирование с увеличением площади арматуры в нижней части и на участках сопряжения смежных волн. Для консолей в виде складок рекомендуется также двойное армирование, но дополнительная арматура требуется лишь в зоне сопряжения панелей с фундаментной плитой.

Ключевые слова: подпорная стена, железобетон, консоль, вертикальная панель, оболочка, складка, стойка, давление грунта, внутренние усилия

Формат цитирования: Варламова Т.В., Ксенофонтова Т.К. Угловые подпорные стены с вертикальными консолями в виде оболочек и складок // Природообустройство. 2024. № 1. С. 57-65. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-1-57-65>

Original article

CORNER RETAINING WALLS WITH VERTICAL CONSOLES IN THE FORM OF SHELLS AND FOLDS

T.V. Varlamova^{1✉}, T.K. Ksenofontova²¹ Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A. 77, Politechnicheskaya str., Saratov, 410054. Russia² Russian State Agrarian University – Moscow State Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev. Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakov; 44, B. Akademicheskaya, Moscow, 127434. Russia

Abstract. The subject of the study is reinforced concrete corner retaining walls, widely used in hydraulic engineering construction. Optimization of the shape of the vertical console of corner retaining walls is important to reduce internal forces and increase the stability of structures. When replacing flat panels with spatial structures in the console, bending moments are reduced; the predominant work of structures for compression or stretching allows reducing their thickness due to more efficient use of materials. The purpose of the study is to determine the optimal shape and nature of reinforcement of vertical retaining wall consoles, depending on their height. The study was conducted in the certified software package “LIRA-CAD2021”. Computational models of corner retaining walls with consoles in the form of multi-wave cylindrical shells and folds have been developed. At the junctions of the waves

and the edges of the folds, racks are provided, pinched in the ground. Comparative calculations of structures in the software package "LIRA-CAD2021" were performed. The results of calculations are analyzed. Conclusions are drawn on the optimization of the structures of retaining walls with a vertical console in the form of shells and folds. The study showed that with a retaining wall height of up to 3 m, a retaining wall with a console in the form of a multi-wave shell is more rational in terms of material consumption. At a height of more than 3 m, retaining walls with a console in the form of folds with vertical posts at the interface of the faces become rational. For consoles in the form of shells, double reinforcement is recommended with an increase in the area of the reinforcement in the lower part and at the interface areas of adjacent waves. For consoles in the form of folds, double reinforcement is also recommended, but additional reinforcement is required only in the area of the interface of the panels with the foundation plate.

Keywords: retaining wall, reinforced concrete, console, vertical panel, shell, fold, post, ground pressure, internal forces

Format of citation: Varlamova T.V., Ksenofontova T.K. Corner retaining walls with vertical consoles in the form of shells and folds // Prirodoobustrojstvo. 2024. No 1. P. 57-65. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-1-57-65>

Введение. В современном гидротехническом строительстве наиболее распространенным видом подпорных стен являются железобетонные подпорные стены уголкового типа. Использование грунта засыпки для обеспечения устойчивости конструкций против сдвига и опрокидывания позволяет снизить материалоемкость и стоимость возведения подпорных стен. Однако для обеспечения устойчивости высоких подпорных стен требуются значительные размеры фундаментной плиты, что приводит к увеличению расхода строительных материалов и объема земляных работ. Кроме того, в зоне сопряжения вертикальной консоли с фундаментной плитой возникают значительные изгибающие моменты, для восприятия которых требуются увеличение толщины консоли и дополнительное армирование.

Для железобетонных подпорных стен уголкового типа актуальной является задача оптимизации формы вертикальной консоли для уменьшения внутренних усилий, более рационального распределения материала и повышения устойчивости конструкций.

Проблемой снижения материалоемкости и повышения устойчивости подпорных стен путем изменения их формы и размеров занимались ученые А.Н. Тетиор [1], А.Я. Будин [2], Е.А. Корчагин [3], В.П. Гамаюнов [4], Т.К. Ксенофонта [5] и др. [6-8, 10-16]. Для оптимизации конструкции уголковой подпорной стены предлагаются [1, 2, 6] варианты замены плоской вертикальной консоли на пространственную в виде оболочек или складок. Рациональное изменение формы вертикальной консоли способствует повышению ее жесткости, устойчивости, оптимизации внутренних усилий. При замене плоских вертикальных плит на пространственные конструкции

происходит уменьшение изгибающих моментов; преимущественная работа конструкций на сжатие или растяжение позволяет уменьшить их толщину за счет более эффективного использования материалов.

Цель исследований: определение рациональной формы вертикальной консоли подпорной стены в зависимости от ее высоты по критериям расхода бетона и арматуры, определение характера армирования железобетонной вертикальной консоли пространственной формы.

Материалы и методы исследований. Проведенные ранее исследования [1, 2, 6] показали, что рациональными формами вертикальных плит пространственных подпорных стен являются многоволновые короткие цилиндрические оболочки и складки. Для уменьшения растягивающих усилий от активного давления грунта цилиндрические оболочки рекомендуется ориентировать выпуклостью в сторону грунта.

Для уменьшения внутренних усилий и повышения устойчивости конструкций против сдвига в местах сопряжения отдельных волн целесообразно устраивать железобетонные или стальные стойки, нижняя часть которых анкеруется в грунте аналогично сваям [1, 6].

Для выявления особенностей напряженно-деформированного состояния подпорных стен с лицевыми плитами в виде оболочек были проведены численные исследования с использованием программного комплекса «ЛИРА-САПР 2021». Исследования проводились на расчетных моделях подпорных стен уголкового типа с вертикальными панелями трех видов:

1) в виде цилиндрических оболочек, направленных выпуклостью в сторону грунта засыпки, со стойками в местах сопряжения волн (рис. 1а);

2) в виде складок, в которых передние вертикальные ребра сопряжения граней усилены стойками, заземленными в грунте (рис. 1б);

3) в виде складок, в которых все вертикальные ребра усилены стойками, заземленными в грунте (рис. 1в).

Принятая длина волны оболочек составила около 6 м, что позволит разместить на нижних площадках элементы благоустройства, освещения, озеленения. На горизонтальных площадках по верху подпорной стены могут размещаться цветники, вьющиеся растения, декоративные кустарники и другие элементы озеленения, актуальные в городской среде [1]. При устройстве железобетонных подпорных стен из сборных элементов такая длина волны упростит их изготовление, транспортировку и монтаж.

В расчетных моделях подпорных стен приняты следующие размеры элементов: толщина фундаментной плиты – 300 мм; толщина вертикальной плиты – 200 мм. Радиус кривизны цилиндрических оболочек принят равным 3 м, волна оболочки ограничена центральным углом 120° . Длина панелей складок также принята равной 3 м, угол между смежными гранями складок – 120° . Рассмотрены варианты подпорных стен высотой от 1,8 до 4,8 м. Приняты стойки железобетонные с размерами

поперечного сечения 300×300 мм. Класс бетона железобетонных конструкций – В20, класс рабочей арматуры – А500С. Расчет подпорных стен производился с учетом особенностей поверочных расчетов подпорных стен гидротехнических сооружений [8]. При этом определение зон образования трещин производилось по методике [9].

В расчетной модели учтены постоянные нагрузки от собственного веса подпорной стены, грунта засыпки и временные нагрузки на поверхности грунта. Плотность грунта засыпки принята равной $1,8 \text{ т/м}^3$, угол внутреннего трения – 24° . На поверхность грунта действует равномерно распределенная временная длительная нагрузка 2 кН/м^2 . Упругое основание под подошвой фундаментной плиты моделировалось с помощью двух коэффициентов постели по гипотезе П.Л. Пастернака.

Местные оси пластин $X1$ направлены по горизонтали, местные оси $Y1$ – по вертикали, местные оси $Z1$ – в направлении толщины пластин.

Результаты и их обсуждение. Характер распределения основных внутренних усилий (изгибающих моментов M_x , M_y и продольных усилий N_x , N_y) в вертикальных консолях подпорных стен трех типов при высоте консоли 3 м представлен на рисунках 2-4.

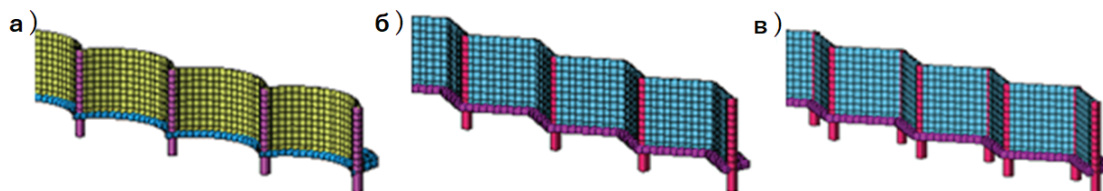


Рис. 1. Расчетные модели уголкового подпорных стен:

- а – с вертикальными панелями в виде многоволновой цилиндрической оболочки и стойками через 6 м;
 б – с вертикальными панелями в виде складок и стойками через 6 м;
 в – с вертикальными панелями в виде складок и стойками через 3 м

Fig. 1. Design models of corner retaining walls:

- a – with vertical panels in the form of a multi-wavelength cylindrical shell and posts at intervals of 6 m;
 b – with vertical panels in the form of folds and posts every 6 m;
 c – with vertical panels in the form of folds and posts at intervals of 3 m

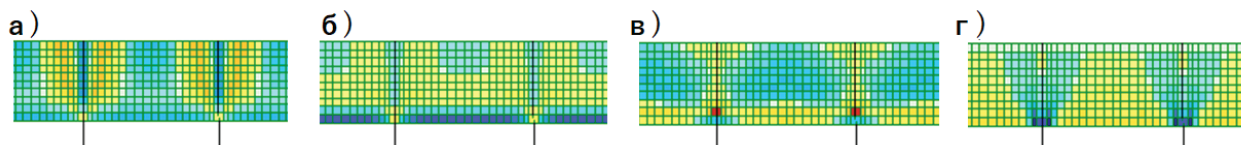


Рис. 2. Мозаики внутренних усилий в вертикальных консолях в виде многоволновой цилиндрической оболочки высотой 3 м:

- а – изгибающие моменты M_x ; б – изгибающие моменты M_y ;
 в – продольные усилия N_x ; г – продольные усилия N_y

Fig. 2. Mosaics of internal forces in vertical consoles in the form of a multi-wave cylindrical shell with a height of 3 m:

- a – bending moments M_x ; b – bending moments M_y ; c – longitudinal forces N_x ; d – longitudinal forces N_y

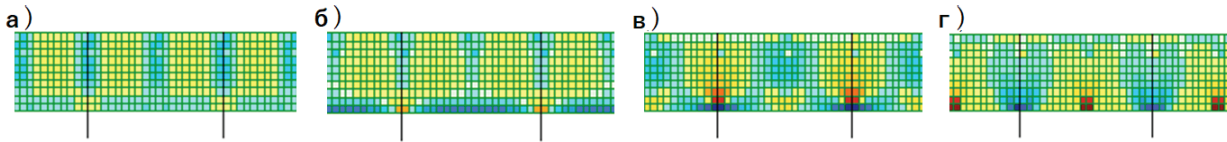


Рис. 3. Мозаики внутренних усилий в вертикальных консолях в виде складок высотой 3 м со стойками через 6 м:

а – изгибающие моменты M_x ; б – изгибающие моменты M_y ;
в – продольные усилия N_x ; г – продольные усилия N_y

Fig. 3. Mosaics of internal forces in vertical consoles in the form of folds of 3 m high with posts at intervals of 6 m:

a – bending moments M_x ; b – bending moments M_y ; c – longitudinal forces N_x ; d – longitudinal forces N_y

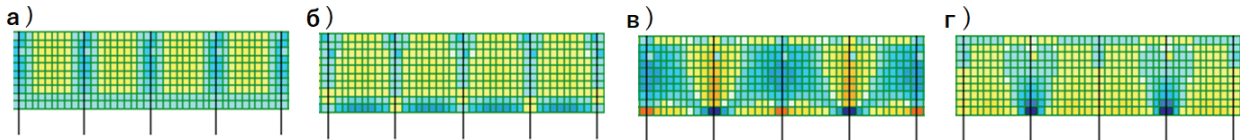


Рис. 4. Мозаики внутренних усилий в вертикальных консолях в виде складок высотой 3 м со стойками через 3 м:

а – изгибающие моменты M_x ; б – изгибающие моменты M_y ;
в – продольные усилия N_x ; г – продольные усилия N_y

Fig. 4. Mosaics of internal forces in vertical consoles in the form of folds of 3 m high with posts every 3 m:

a – bending moments M_x ; b – bending moments M_y ; c – longitudinal forces N_x ; d – longitudinal forces N_y

Продольные усилия N_x действуют в горизонтальном направлении, продольные усилия N_y – в вертикальном направлении, при этом знак «+» соответствует растяжению.

Изгибающий момент M_x действует в вертикальном сечении панели, при этом знак «←» соответствует растяжению грани со стороны грунта. Момент M_y действует в горизонтальном сечении панели, и знак «→» также соответствует растяжению грани со стороны грунта.

В таблице 1 приведены значения изгибающих моментов M_x , M_y , продольных усилий N_x и N_y для трех видов вертикальных панелей высотой от 1,8 до 4,8 м.

Значения изгибающих моментов M_z и продольных сил N в стойках подпорных стен для трех видов конструктивных решений приведены в таблице 2.

На рисунке 5 представлены графики зависимости внутренних усилий в стойках в зависимости от высоты подпорной стены.

В целях сравнения рассмотренных вариантов конструктивного решения подпорных стен в программном комплексе «ЛИРА-САПР 2021» был выполнен расчет подпорных стен по предельным состояниям I и II групп и определен расход материалов. Сравнение вариантов подпорных стен по расходу бетона и арматуры приведено в таблице 3.

Графики зависимости расхода бетона и арматуры от формы и высоты стены представлены на рисунке 6.

В подпорных стенах с консолью в виде многоволновой оболочки продольные усилия N_x в горизонтальном направлении сжимают центральную часть волны и растягивают участки оболочки, примыкающие к стойкам и фундаментной плите. Максимальные растягивающие продольные усилия N_x действуют в нижней части стены в местах примыкания оболочки к стойкам. Продольные усилия N_y возрастают по направлению сверху вниз; в нижней части стены в местах примыкания оболочки к стойкам, сжимающие продольные усилия N_y достигают максимума.

Расчеты показали, что при высоте стены до 3,6 м значения моментов в оболочке невелики, но при дальнейшем увеличении высоты стены наблюдается существенное увеличение момента M_y .

Сравнение значений внутренних усилий в подпорных стенах в виде оболочек и складок при шаге стоек 6 м показало, что в элементах складок величины моментов M_x и M_y значительно больше, чем в элементах оболочек. Представленные на рисунке 3а, 3б мозаики моментов показывают, что грани складок в основном испытывают сжатие со стороны грунта, и это способствует повышению долговечности железобетонных панелей. Растяжение внутренней поверхности наблюдается в зонах сопряжения панелей между собой, с фундаментной плитой и вертикальными стойками.

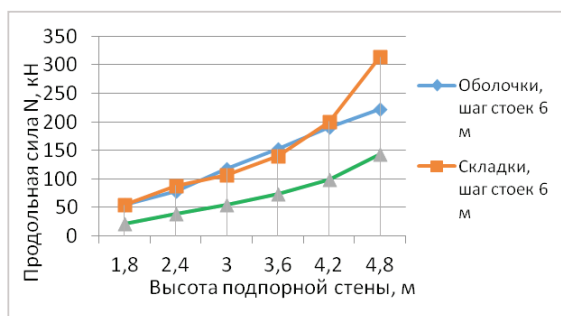
В подпорных стенах с консолью в виде складок (рис. 3в, 3г) вдоль ребер складок со стороны

Таблица 1. Внутренние усилия в вертикальных панелях подпорных стен
Table 1. Internal forces in vertical retaining wall panels

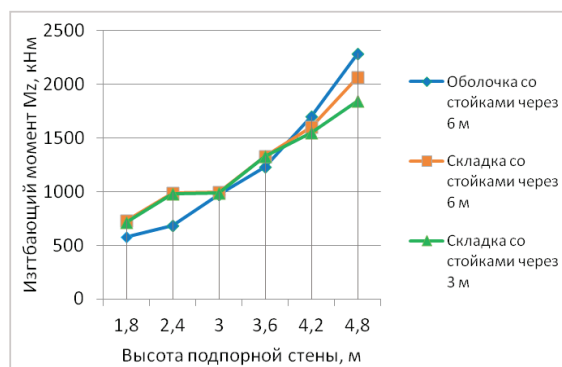
| Высота стены, м Wall height, m | Внутренние усилия / Internal forces | | | |
|---|-------------------------------------|----------------|---------------------------|---------------------------|
| | M_x , кН*м/м | M_y , кН*м/м | N_x , кН/м ² | N_y , кН/м ² |
| Вертикальные панели в виде многоволновой цилиндрической оболочки, шаг стоек 6 м <i>Vertical panels in the form of multi-wave cylindrical shell, 6 m posts spacing</i> | | | | |
| 1,8 | -1,59...1,41 | -2,76...0,676 | -251...504 | -641...185 |
| 2,4 | -2,37...2,38 | -4,54...0,874 | -412...694 | -907...287 |
| 3,0 | -3,60...3,47 | -8,2...1,24 | -617...1060 | -1400...508 |
| 3,6 | -4,94...4,34 | -12,3...1,64 | -851...1340 | -1900...710 |
| 4,2 | -6,42...5,06 | -18,1...2,06 | -1120...1630 | -2490...986 |
| 4,8 | -7,68...5,36 | -25,1...2,36 | -1360...1930 | -3280...1350 |
| Вертикальные панели в виде складок, шаг стоек 6 м / Vertical panels in the form of folds, 6 m posts spacing | | | | |
| 1,8 | -6,17...1,82 | -4,33...4,98 | -150...261 | -257...134 |
| 2,4 | -9,49...2,82 | -9,49...6,99 | -194...377 | -396...361 |
| 3,0 | -12,6...3,66 | -12,6...6,8 | -399...356 | -660...686 |
| 3,6 | -17,0...4,47 | -20,4...9,17 | -722...410 | -815...1210 |
| 4,2 | -16,6...5,51 | -29,0...6,42 | -959...639 | 1250...1960 |
| 4,8 | -19,7...5,45 | -36,3...6,55 | -1360...1250 | 1970...3300 |
| Вертикальные панели в виде складок, шаг стоек 3 м / Vertical panels in the form of folds, 6 m posts spacing | | | | |
| 1,8 | -3,66...1,17 | -5,67...0,539 | -154...63,1 | -248...139 |
| 2,4 | -5,81...1,78 | -12,8...1,15 | -153...268 | -422...255 |
| 3,0 | -12,9...3,49 | -12,9...3,73 | -253...182 | -763...310 |
| 3,6 | -16,0...4,08 | -22,9...4,04 | -370...375 | -1120...370 |
| 4,2 | -21,3...5,68 | -29,0...5,72 | -525...517 | -1660...752 |
| 4,8 | -21,8...6,65 | -32,0...6,73 | -805...848 | -2490...1480 |

Таблица 2. Значения внутренних усилий в стойках
Table 2. Values of internal forces in posts

| Высота стены, м Wall height, m | Вид вертикальных панелей / Vertical panels view | | |
|-----------------------------------|---|---|---|
| | Оболочки со стойками через 6 м <i>Shells with posts with 6 m spacing</i> | Складки со стойками через 6 м <i>Folds with posts with 6 m spacing</i> | Складки со стойками через 3 м <i>Folds with posts with 3 m spacing</i> |
| | Продольная сила N, кН / Longitudinal force N, kN | | |
| 1,8 | -88,7 | -112 | -93 |
| 2,4 | -148 | -188 | -197 |
| 3,0 | -233 | -267 | -261 |
| 3,6 | -337 | -390 | -351 |
| 4,2 | -470 | -534 | -515 |
| 4,8 | -613 | -762 | -792 |
| Высота стены, м Wall height, m | Изгибающий момент M_z , кНм / Bending moment M_z , kNm | | |
| | Оболочки со стойками через 6 м <i>Shell with posts with 6 m spacing</i> | Складки со стойками через 6 м <i>Folds with posts with 6 m spacing</i> | Складка со стойками через 3 м <i>Folds with posts with 3 m spacing</i> |
| | 1,8 | -54,2 | -54,4 |
| 2,4 | -79 | -88,4 | -38,3 |
| 3,0 | -118 | -107 | -55,2 |
| 3,6 | -152 | -140 | -73,0 |
| 4,2 | -191 | -201 | -99,2 |
| 4,8 | -223 | -314 | -143 |



а)



б)

Рис. 5. Графики изменения внутренних усилий в стойках в зависимости от высоты подпорной стены:

а – максимальные продольные силы N ; б – максимальные изгибающие моменты M_z

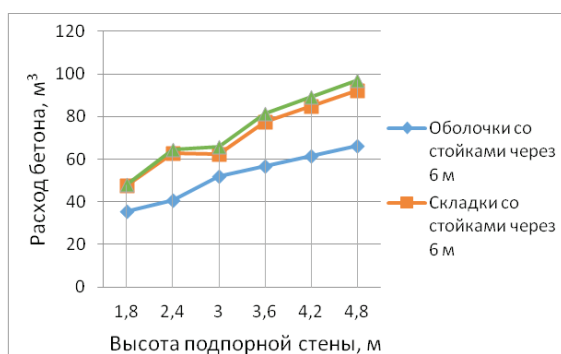
Fig. 5. Graphs of changes in the internal forces in the posts depending on the height of the retaining wall:

a – maximum longitudinal forces N ; b – maximum bending moments M_z

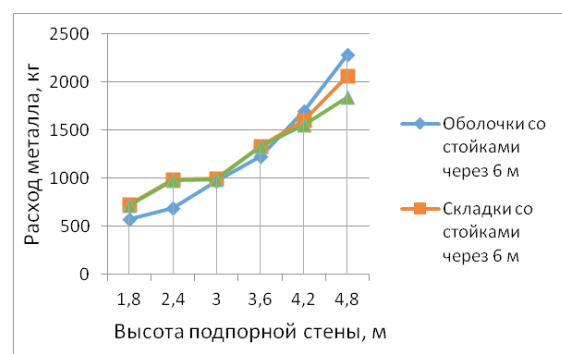
Таблица 3. Расход материалов для вариантов подпорных стен

Table 3. Material consumption for retaining wall variants

| Расход бетона класса В20, м ³ / Concrete consumption of class V20, m ³ | | | | | | |
|--|--|--------|--------|---------|---------|---------|
| Тип подпорной стены Type of the retaining wall | Высота подпорной стены, м Height of the retaining wall, m | | | | | |
| | 1,8 | 2,4 | 3,0 | 3,6 | 4,2 | 4,8 |
| Цилиндрическая оболочка со стойками через 6 м Cylindrical shell with posts at 6 m spacing | 35,77 | 40,87 | 52,07 | 56,91 | 61,59 | 66,26 |
| Складка со стойками через 6 м / Posts fold at 6 m spacing | 47,69 | 62,64 | 62,42 | 77,54 | 84,90 | 92,26 |
| Складка со стойками через 3 м / Posts fold at 3 m spacing | 48,03 | 64,67 | 65,29 | 81,25 | 89,18 | 97,21 |
| Расход теоретической продольной арматуры класса А500С, кг Consumption of theoretical longitudinal armature of class A500S, kg | | | | | | |
| Тип подпорной стены Type of the retaining wall | Высота подпорной стены, м Height of the retaining wall, m | | | | | |
| | 1,8 | 2,4 | 3,0 | 3,6 | 4,2 | 4,8 |
| Цилиндрическая оболочка со стойками через 6 м Cylindrical shell with posts with 6 m spacing | 575,29 | 686,33 | 969,14 | 1230,21 | 1696,30 | 2286,00 |
| Складка со стойками через 6 м / Posts fold with 6 m spacing | 729,47 | 987,48 | 997,54 | 1328,47 | 1600,40 | 2059,96 |
| Складка со стойками через 3 м / Posts fold with 3 m spacing | 714,53 | 977,19 | 982,7 | 1329,62 | 1549,86 | 1839,19 |



а)



б)

Рис. 6. Графики зависимости расхода материалов от высоты подпорной стены для трех вариантов конструктивного решения:

а – расход бетона; б – расход теоретической арматуры

Fig. 6. Graphs of the dependence of material consumption on the height of the retaining wall for three variants of the design solution:

a – concrete consumption, b – consumption of theoretical reinforcement

грунта панели испытывают сжатие в горизонтальном направлении и растяжение – в вертикальном направлении; вдоль ребер с лицевой стороны панели, напротив, испытывают растяжение в горизонтальном направлении и сжатие – в вертикальном. В нижних зонах сопряжения панелей между собой, сопряжения панелей со стойками и с фундаментной плитой продольные силы резко возрастают.

Сопоставление значений внутренних усилий в элементах складок со стойками через 6 м и через 3 м показывает, что снижение величин моментов M_x и M_y при более частом расположении стоек является незначительным. Уменьшение продольных усилий N_x и N_y при высоте стены до 3 м также незначительно, однако при высоте стены более 3 м влияние дополнительных стоек на величину продольных сил усиливается: при высоте стены 4,8 м снижение растягивающих и сжимающих усилия N_x достигает 40%, а снижение растягивающих усилий N_y – 50% и более.

Графики изменения внутренних усилий N , M_z в стойках в зависимости от высоты подпорной стены (рис. 5) свидетельствуют о том, что влияние формы вертикальной консоли и шага стоек на величину продольной силы N в стойках является незначительным. Максимальные значения изгибающих моментов M_z в стойках подпорных стен в виде оболочек практически линейно увеличиваются с увеличением высоты стены. Максимальные моменты в стойках складок при шаге 3 м примерно вдвое меньше соответствующих моментов в стойках оболочек при шаге 6 м, что соответствует уменьшению ширины грузовой площади для одной стойки. Однако если стойки в складках размещены с шагом 6 м, то при увеличении высоты стены более 3,6 м наблюдается резкое увеличение максимальных моментов в стойках.

Согласно графику зависимости расхода материалов от высоты подпорной стены для трех вариантов конструктивного решения (рис. 6) более экономичным по расходу бетона (рис. 6а) оказываются многоволновые цилиндрические оболочки. По расходу арматуры (рис. 6б) при высоте подпорной стены до 3 м более рациональной формой также являются оболочки, но при высоте стены более 3 м экономичными становятся подпорные стены с консолью в виде складок. При высоте стены более 3,6 м рекомендуется установка стоек по всем ребрам складок, то есть с шагом 3 м.

Выводы

Сравнение трех вариантов конструктивного решения угловых подпорных стен показало, что при высоте подпорной стены до 3 м более рациональной с точки зрения распределения усилий, расхода бетона и арматуры является подпорная стена с консолью в виде многоволновой оболочки.

При высоте стены свыше 3 м более экономичными по расходу материалов становятся подпорные стены с консолью в виде складок. В складках рекомендуется установка стоек по всем вертикальным ребрам с шагом 3 м. При этом некоторое увеличение расхода бетона оправдано уменьшением внутренних усилий в плитах и стойках, и как следствие – снижением расхода арматуры.

В соответствии с мозаиками внутренних усилий рекомендуется двойное армирование вертикальных панелей: например, сварными сетками с рабочей арматурой в двух направлениях.

В горизонтальном направлении (вдоль местной оси $X1$) на основной площади оболочек достаточно конструктивного армирования из стержней диаметром 6 мм с шагом 200 мм. На участках сопряжения смежных волн шириной около 1,5 м в каждую сторону в нижней части оболочки требуется усиление горизонтального армирования, для чего возможно уменьшение шага горизонтальных стержней в сетках до 100 мм.

В вертикальном направлении (вдоль местной оси $Y1$) на основной площади оболочки также достаточно конструктивного армирования диаметром 6 мм с шагом 200 мм. В нижней части оболочки со стороны грунта требуется дополнительное армирование стержнями диаметром 10...12 мм на высоту около 1 м.

Для вертикальных консолей в виде складок может применяться двойное армирование сетками с арматурой в обоих направлениях диаметром 6 мм с шагом 200 мм. Дополнительное армирование требуется лишь в зоне сопряжения панелей с фундаментной плитой.

Для восприятия повышенных усилий в зонах сопряжения волн оболочек и увеличения жесткости конструкции рекомендуется устраивать железобетонные вертикальные стойки, подземная часть которых может выполняться в виде буронабивных свай, в том числе секущихся свай или свай с уширением ствола ниже уровня грунта.

Список использованных источников

1. **Тетиор А.Н.** Экологичные подпорные и шумозащитные стены: учебное пособие. М.: МГУП, 2006. 174 с.
2. **Будин А.Я.** Тонкие подпорные стенки. Л.: Стройиздат, 1974. 192 с.
3. **Корчагин Е.А.** Оптимизация конструкций подпорных стенок. М.: Стройиздат, 1980. 114 с.
4. **Гамаюнов В.П.** Повышение надежности железобетонных конструкций аэротенков / Есин А.И., Варламова Т.В., Болуто Т.И. // Научное обозрение. 2014. № 3. С. 86-88.
5. **Ксенофонтова Т.К., Журавлева А.Г., Сюй Ч.** Эффективность использования консольных и контрфорсных подпорных стен направляющих и причальных сооружений шлюзов на основе расхода материалов // Природообустройство. 2016. № 5. С. 19-25.
6. **Варламова Т.В., Ксенофонтова Т.К., Верхоглядова А.С.** К вопросу проектирования подпорных стен с консолью в виде оболочки // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2023. № 4 (58). С. 97-104.
7. **Семенюк С.Д., Котов Ю.Н.** Железобетонные подпорные стены // Вестник Белорусско-Российского университета. 2018. № 4 (61). С. 86-101.
8. **Варламова Т.В., Воронова В.С.** Особенности поверочных расчетов подпорных стен гидротехнических сооружений // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2021. № 1 (13). С. 150-154.
9. **Ксенофонтова Т.К.** Методика расчета статически неопределимых железобетонных конструкций с учетом перераспределения усилий при трещинообразовании // Природообустройство. 2008. № 4. С. 88-95.
10. **Лисичкин С.Е., Рубин О.Д., Пашченко Ф.А.** Результаты исследований усиления подпорных стен композитными материалами // Гидротехническое строительство. 2021. № 4. С. 35-42.
11. **Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Пашченко Ф.А.** Результаты экспериментальных исследований железобетонных подпорных стен // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16, № 2. С. 152-160.
12. **Пашченко Ф.А., Лисичкин С.Е., Рубин О.Д.** Экспериментальное обоснование усиления подпорных стен // Инженерные системы: Сборник трудов научной-практической конференции с международным участием, посвященной 60-летию Российского университета дружбы народов: в 2 т. Под общ. ред. М.Ю. Мальковой. 2020. С. 15-21.
13. **Sari U.C., Sholeh M.N. and Hermanto I.** The stability analysis study of conventional retaining walls variation design in vertical slope // The 8th Engineering International Conference 2019: Journal of Physics: Conference Series 1444. 2020. 012053. DOI: 10.1088/1742-6596/1444/1/012053.
14. **Harode J., Dabhekar K., Pawade P., Khedikar I.** Review on Assessment of the effect of lateral dynamic forces on RCC cantilever L-shaped and T-shaped retaining wall with height variations // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. November 2021. 1197 (1):012030. DOI: 10.1088/1757-899X/1197/1/012030.
15. **Kayabekir A.E., Arama Z.A., Bekdaş G. and Dalyan İ.** L-shaped reinforced concrete retaining wall design: cost and sizing optimization // Challenge Journal of Structural Mechanics. 2020. Vol. 6, № 3. P. 140.

References

1. **Tetior A.N.** Ecological retaining and noise protection walls: textbook. Moscow, MGUP Publ., 2006. 174 p.
2. **Budin A.Y.** Thin retaining walls. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1974. 192 p.
3. **Korchagin E.A.** Optimization of retaining wall structures. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980. 114 p.
4. **Gamayunov V.P.** Improving the reliability of reinforced concrete constructions of aeration tanks / V.P. Gamayunov A.I., Esin T.V. Varlamova, T.I. Boluto. // Scientific Review. 2014. № 3. P. 86-88.
5. **Ksenofontova T.K., Zhuravleva A.G., Syuj Ch.** Efficiency of the use of cantilever and buttress retaining walls of guides and pier structures of sluices based on material consumption // Prirodoobustrojstvo. 2016. № 5. P. 19-25.
6. **Varlamova T.V., Ksenofontova T.K., Verhoglyadova A.S.** On the issue of designing retaining walls with a console in the form of a shell // Technical regulation in transport construction. 2023. № 4(58). P. 97-104.
7. **Semenyuk S.D., Kotov Yu.N.** Reinforced concrete retaining walls // Bulletin of the Belarusian-Russian University. 2018. № 4(61). P. 86-101.
8. **Varlamova T.V., Voronova V.S.** Features of verification calculations of retaining walls of hydrotechnical structures // Resource-efficient technologies in the construction complex of the region. 2021. № 1 (13). P. 150-154.
9. **Ksenofontova T.K.** Methodology for calculating statically indeterminate reinforced concrete structures taking into account the redistribution of efforts in cracking // Prirodoobustrojstvo. 2008. № 4. P. 88-95.
10. **Lisichkin S.E., Rubin O.D., Pashchenko F.A.** Results of research on strengthening retaining walls with composite materials // Hydro technical building. 2021. № 4. P. 35-42.
11. **Rubin O.D., Lisichkin S.E., Pashchenko F.A.** Results of experimental studies of reinforced concrete retaining walls // Construction mechanics of engineering structures and constructions. 2020. V. 16. № 2. P. 152-160.
12. **Pashchenko F.A., Lisichkin S.E., Rubin O.D.** Experimental justification of retaining wall reinforcement / Collection: Engineering systems. Proceedings of the scientific and practical conference with international participation dedicated to the 60th Anniversary of the Peoples' Friendship University of Russia. In 2 volumes. Edited by M.Yu. Malkova. 2020. P. 15-21.
13. **U.C. Sari, M.N. Sholeh, and I. Hermanto.** The stability analysis study of conventional retaining walls variation design in vertical slope. The 8th Engineering International Conference 2019. Journal of Physics: Conference Series 1444 (2020). 012053. DOI: 10.1088/1742-6596/1444/1/012053
14. **J. Harode, K. Dabhekar, P. Pawade, I. Khedikar.** Review on "Assessment of the effect of lateral dynamic forces on RCC cantilever L-shaped and T-shaped retaining wall with height variations". November 2021. IOP Conference Series Materials Science and Engineering 1197(1):012030. DOI: 10.1088/1757-899X/1197/1/012030
15. **A.E. Kayabekir, Z.A. Arama, G. Bekdaş, and I. Dalyan.** L-shaped reinforced concrete retaining wall design: cost and sizing optimization, // Challenge Journal of Structural Mechanics, vol. 6, no. 3, p. 140, 2020.

16. Al Sebai H.M., Barakat S. and Arab M.A. Reliability-based design optimization of cantilever reinforced concrete retaining walls // in Proceedings of the International Foundations Congress and Equipment Expo. Dallas, USA, May 2021.

Об авторах

Татьяна Васильевна Варламова, канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительные материалы, конструкции и технологии»; ORCID: 0000-0003-1928-8705; varlamova-t.v@yandex.ru

Татьяна Кирилловна Ксенофонтова, канд. техн. наук, доцент кафедры инженерных конструкций; ORCID: 0000-0002-3484-6894, SCOPUS ID: 57216621271; tksenofontova@rgau-msha.ru, Ksentanya@yandex.ru

16. H.M. Al Sebai S. Barakat, and M.A. Arab. “Reliability-based design optimization of cantilever reinforced concrete retaining walls,” in Proceedings of the International Foundations Congress and Equipment Expo, Dallas, USA, May, 2021.

Author information

Tatyana V. Varlamova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department “Construction materials, structures and technologies”; ORCID: 0000-0003-1928-8705; varlamova-t.v@yandex.ru

Tatyana K. Ksenofontova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department “Engineering structures”; ORCID: 0000-0002-3484-6894, SCOPUS ID: 57216621271; tksenofontova@rgau-msha.ru, Ksentanya@yandex.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Варламова Т.В., Ксенофонтова Т.К. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of Interest

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

Вклад авторов / Authors' contributions

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации. / All authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Статья поступила в редакцию / Submitted to the editorial office 05.11.2023

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 10.12.2023

Принята к публикации / Accepted for publication 15.12.2023

Varlamova T.V., Ksenofontova T.K. performed theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, have copyright on the article and are responsible for plagiarism.