

**ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ
СТРОИТЕЛЬСТВО,
ГИДРАВЛИКА
И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ**



УДК 627.418.2

Ф.А. ПАЩЕНКО

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ ПОДПОРНЫХ СТЕНОК
УГОЛКОВОГО ТИПА**

В составе гидроузлов часто встречаются подпорные стенки углового типа. В их функции входит защита основных бетонных и железобетонных сооружений от обрушения и сползания грунтовых массивов. Подпорные стены характеризуются значительными размерами, сравнительно невысоким содержанием арматуры, наличием горизонтальных межблочных швов, что существенно влияет на особенности работы и состояния подпорных стен.

В период проектирования и строительства большинства подпорных стенок (1960–1980-е гг.) нормативные документы имели определенные недостатки, касающиеся неполного учета их характерных особенностей, которые вызвали отклонения от проектных предпосылок при эксплуатации. Так, отмечались чрезмерные смещения верха консолей, раскрытия горизонтальных межблочных швов, высокие значения напряжений в сжатой и растянутой арматуре у лицевой и тыловой граней, которые превышали проектные значения.

Целью работы являются экспериментальные и теоретические исследования железобетонных подпорных стенок углового типа.

Методы исследований работы железобетонных подпорных стенок углового типа включали в том числе классические методы сопротивления материалов, теории упругости, строительной механики, экспериментальные методы.

Для определения напряженного состояния в элементах железобетонной конструкции подпорной стенки (в бетоне и арматуре) была разработана методика расчета напряженного состояния подпорных стенок, которая позволяет определять компоненты напряженного состояния (напряжения в бетоне сжатой зоны, а также напряжения в растянутой и сжатой арматуре) в горизонтальных сечениях вертикальной консольной части подпорных стенок.

Была разработана программа экспериментальных исследований железобетонных подпорных стенок.

К л ю ч е в ы е с л о в а: гидротехнические подпорные стенки углового типа, характерные особенности, межблочные горизонтальные швы, сжимающие и растягивающие напряжения, теоретические и экспериментальные исследования.

DOI 10.32683/0536-1052-2020-735-3-68-75

Подпорные стенки являются наиболее распространенными сооружениями гидроузлов, при этом распространены подпорные стенки углового типа [1–5].

© **Пащенко Ф.А., 2020**

Действующие в период проектирования подпорных стенок нормативные документы не в полной мере учитывали характерные особенности железобетонных конструкций, в том числе наличие горизонтальных межблочных швов. Также важнейшей особенностью является образование наклонных трещин, выходящих из раскрывшихся горизонтальных межблочных швов [6–9].

При участии автора была разработана методика расчета напряженного состояния в горизонтальных сечениях вертикальной консольной части подпорных стенок, в том числе с учетом наличия горизонтальных межблочных швов [10].

Разработана программа экспериментальных исследований железобетонных моделей гидротехнических подпорных стенок уголкового типа.

Конструкция модели железобетонной подпорной стенки. Размеры модели составили: высота 143,0 см; толщина 30,0 см; ширина в корневом сечении 33,0 см. По высоте модели моделировались три горизонтальных межблочных шва: нижний шов протяженностью 29,9 см на расстоянии 14,0 см от нижней грани; средний шов протяженностью 25,2 см на расстоянии 35,4 см от нижней грани; верхний шов протяженностью 17,5 см на расстоянии 70,8 см от нижней грани. Конструкция модели представлена на рис. 1.

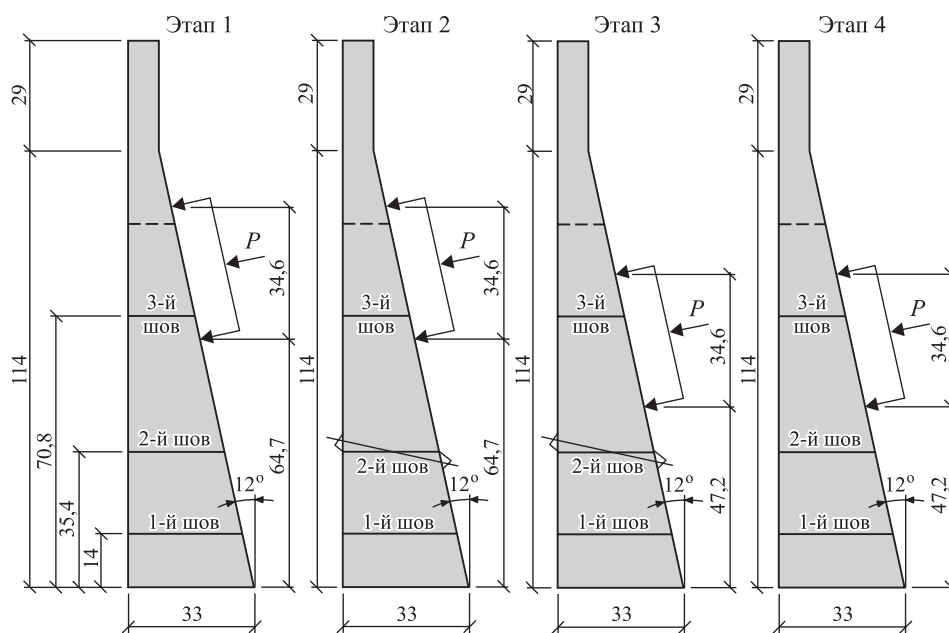


Рис. 1. Конструкция модели

Рабочее армирование у тыловой грани модели стенки выполняется в виде трех диаметров 12 мм А-III (А400), у лицевой грани – одного диаметра 12 мм А-III (А400). Бетон моделей класса В25.

Методика экспериментальных и теоретических исследований подпорных стен уголкового типа. При проведении экспериментальных исследований планируется использовать следующие средства испытаний:

- стенд для испытания моделей железобетонных конструкций;

- гидроцилиндр (домкрат) ДГС-63 с максимальным усилием 630 кН;
- тензорезисторы для измерения деформаций с точностью до 10×10^{-5} (0,00001) е.о.д.;

- тензометрическая станция ZET 017-T8;

- индикаторы часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм;

- микроскоп МПБ-3 для измерения величины раскрытия трещин.

В ходе экспериментальных исследований планируется определять следующие показатели:

- нагрузка образования трещин (в том числе по горизонтальным межблочным строительным швам) и характер образовавшихся трещин;
- ширина раскрытия горизонтальных межблочных швов и трещин;
- перемещение верха модели;
- деформации элементов усиления модели (наклонных хомутов);
- разрушающая нагрузка и характер разрушения модели;
- прирост нагрузки для усиленной модели (по сравнению с неусиленной конструкцией).

Предусматривается следующий порядок проведения экспериментальных исследований модели железобетонной подпорной стенки.

При проведении экспериментальных исследований нагрузка прикладывается ступенями по 10 % от нагрузки разрушения (по 5 % при величине нагрузки более 90 % от планируемой разрушающей нагрузки) с выдержкой 15 мин.

Схема установки контрольно-измерительной аппаратуры на железобетонной модели подпорной стенки представлена на рис. 2.

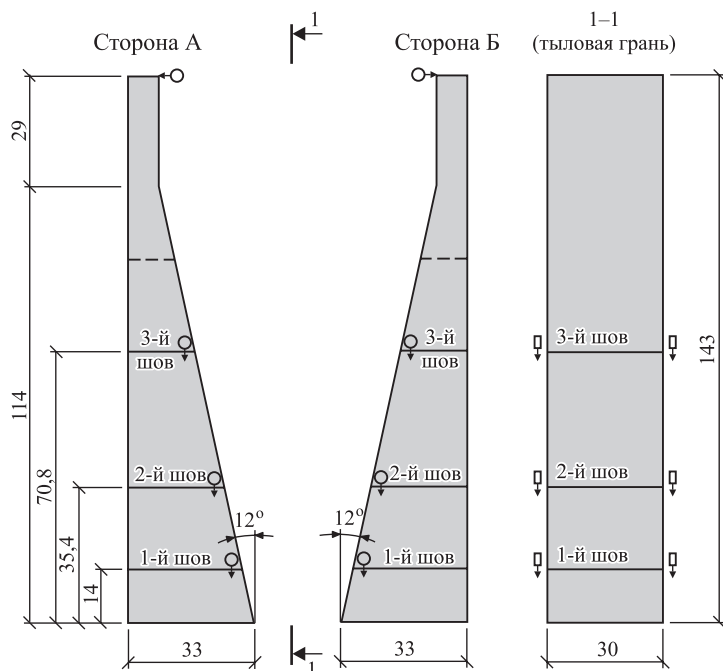


Рис. 2. Схема установки контрольно-измерительной аппаратуры на железобетонной модели подпорной стенки

Раскрытие горизонтальных межблочных швов контролируется посредством установленных вертикально индикаторов часового типа.

Трещинообразование в железобетонной модели подпорной стенки контролируется визуально с применением микроскопа отсчетного МПБ-3 (трубки Бриннеля).

Для контроля перемещения верха модели устанавливаются прогибомеры – индикаторы часового типа.

Теоретические исследования напряженного состояния железобетонных конструкций подпорных стенок проводились с применением методов строительной механики, сопротивления материалов, теории железобетона.

Разработка программы экспериментальных исследований подпорных стен. Железобетонная модель подпорной стенки высотой 143,0 см, подверженная действию силовой нагрузки, вертикально устанавливается в стенде. Схемы испытаний представлены на рис. 1.

На этапе 1 проводятся экспериментальные исследования неусиленной модели подпорной стены при расположении равнодействующей нагрузки на высоте 82,0 см от корневого сечения.

На этапе 2 проводятся экспериментальные исследования модели подпорной стены, усиленной посредством наклонных хомутов диаметром 10 мм из арматуры класса А400, установленных по боковым граням под углом 15° к горизонтали в зоне среднего межблочного шва.

На этапе 3 проводятся экспериментальные исследования неусиленной модели подпорной стены при расположении равнодействующей нагрузки на высоте 64,5 см от корневого сечения.

На этапе 4 проводятся экспериментальные исследования модели подпорной стены, усиленной посредством наклонных хомутов диаметром 10 мм из арматуры класса А400, установленных по боковым граням под углом 15° к горизонтали в зоне среднего межблочного шва.

Результаты разработки методики расчета в горизонтальных сечениях вертикальных консолей подпорных стен. Для определения напряженного состояния в элементах железобетонной конструкции подпорной стены (в бетоне и арматуре) была разработана методика расчета напряженного состояния подпорных стен.

При этом рассматривалось горизонтальное сечение в вертикальной консоли стены. Схема действия внешних и внутренних усилий в горизонтальном сечении представлена на рис. 3.

Условие равновесия при действии сил:

$$N_b + N'_s = N + N_s, \quad (1)$$

где N – вертикальная сжимающая сила;
 N_b – усилие в бетоне сжатой зоны;
 N'_s – в сжатой арматуре;
 N_s – в растянутой арматуре.

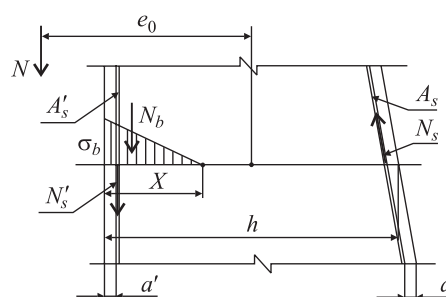


Рис. 3. Схема действия внешних и внутренних усилий в горизонтальном сечении

Условие равновесия при действии изгибающих моментов (относительно равнодействующей вертикальных сжимающих напряжений в бетоне сжатой зоны):

$$N(e_0 - 0,5h + 0,33x) = N_s(h_0 - 0,33x) + N'_s(0,33x - a'). \quad (2)$$

Разработка данной методики проводилась на основе гипотезы плоских сечений; при этом были установлены зависимости между относительными деформациями в бетоне сжатой зоны ε_b , в растянутой (ε_s) и сжатой (ε'_s) арматуре.

В итоге напряжения в растянутой арматуре σ_{st} с учетом сжатой арматуры определяются по формуле:

$$\sigma_s = \frac{N(h_0 - x)}{D}, \quad (3)$$

$$\text{где } D = \left[0,5bx^2 \left(\frac{E_b}{E_s} \right) + A'_s(x - a') - A_s(h_0 - x) \right].$$

Напряжения в растянутой арматуре σ_s без учета сжатой арматуры определяются по формуле:

$$\sigma_{st} = \frac{N}{\left[0,5 \left(\frac{x}{h_0 - x} \right) \frac{E_b}{E_s} \right] xb - A_s}, \quad (4)$$

где x – высота сжатой зоны бетона.

Заключение. Выполнен анализ конструктивных особенностей подпорных стен гидротехнических сооружений (которые определяют характер их работы), в том числе вызывающих отклонения от проектных предпосылок при эксплуатации.

Установлено, что нормативные документы, действовавшие в период проектирования большинства подпорных стен гидротехнических сооружений, не в полной мере учитывали характерные особенности таких сооружений (в первую очередь, наличие межблочных контактных швов), что приводило к отклонениям от проектных предпосылок.

В результате проведенных исследований была разработана методика, позволяющая определять компоненты напряженного состояния (напряжения в бетоне сжатой зоны, а также напряжения в растянутой и сжатой арматуре) в горизонтальных сечениях вертикальной консольной части подпорных стен.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рассказов Л.Н., Бестужева А.С., Малаханов В.В., Толстиков В.В., Орехов В.Г., Саинов М.П., Анискин Н.А., Солдатов П.В. Гидротехнические сооружения (речные). Ч. 2. М.: ЛитРес, 2016. 538 с.
2. Волосухин В.А., Дыба В.П., Евтушенко С.И. Расчет и проектирование подпорных стен гидротехнических сооружений. М.: АСВ, 2015. 96 с.
3. Волосухин В.А., Воропаев В.И., Яицкий Л.В. Расчет подпорных стен гидротехнических сооружений. Учеб. пособие. Новочеркасск, 2000. 81 с.
4. Семенюк С.Д., Котов Ю.Н. Железобетонные подпорные стены // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. 2018. № 4(61). С. 86–101.

5. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Нефедов А.В., Черненко В.Н., Пономарев Д.И., Мукашов Р.З., Лисичкин А.С. Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния подпорной стенки первого яруса ЛВ-1 водоприемника Загорской ГАЭС, в том числе с учетом данных синхронных замеров при суточном изменении уровня верхнего аккумулирующего бассейна // Безопасность энергетических сооружений. 2013. Вып. 18. С. 38–50.
6. Лисичкин С.Е., Рубин О.Д., Атабиев И.Ж., Мельникова Н.И. Расчетные исследования устойчивости и прочности подпорных стен первого яруса водоприемника Загорской ГАЭС // Природообустройство. 2012. № 2. С. 44–48.
7. Рубин О.Д., Пономарев Д.И., Мельникова Н.И. Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния подпорных стен первого яруса водоприемника Загорской ГАЭС // Природообустройство. 2011. № 5. С. 51–55.
8. Николаев В.Б., Гун С.Я., Лисичкин С.Е., Ляпин О.Б. Прочность железобетонных подпорных стенок // Гидротехн. стр-во. 1988. № 10. С. 54–58.
9. Лисичкин С.Е., Ляпин О.Б. Поперечное армирование массивных конструкций энергетических сооружений // Энерг. стр-во. 1989. № 11. С. 40–43.
10. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Пашенко Ф.А. Разработка методики расчета напряженного состояния в горизонтальных сечениях гидротехнических подпорных стен углового типа // Строит. механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 5. С. 339–344.

Пашенко Федор Александрович, асп.; E-mail: lenair@lenair.ru
АО «ПИИНИИ ВТ «Ленаэропроект», г. Санкт-Петербург

Получено 06.02.2020

Pashchenko Fedor Alexandrovich, Post-graduate Student; E-mail: lenair@lenair.ru
JSC «Lenaeroproekt», Saint Petersburg, Russia

EXPERIMENTAL-THEORETICAL STUDIES OF HYDROTECHNICAL ANGULAR-TYPE RETAINING WALLS

As part of hydraulic structures, angular-type retaining walls are often found. Their functions include protecting the main concrete and reinforced concrete structures from the collapse and sliding of soil masses. Retaining walls are significant in size; relatively low content of reinforcement; the presence of horizontal interblock seams; which significantly affects the features of work and the state of retaining walls.

During the design and construction of the most retaining walls (1960s–1980s), regulatory documents had certain shortcomings regarding the incomplete consideration of their characteristic features, which caused deviations from the design premises during operation. So, there were excessive displacements of the top of the consoles, the opening of horizontal interlock joints, high stresses in the compressed and stretched reinforcement at the front and rear faces, which exceeded the design values.

The aim of the work is the experimental and theoretical studies of the reinforced concrete angular-type retaining walls. Research methods for the operation of the reinforced concrete angular-type retaining walls, including, including classical methods of resistance of the materials, elasticity theory, structural mechanics; experimental methods. To determine the stress state in the elements of the reinforced concrete structure of the retaining wall (in concrete and reinforcement), a methodology was developed for calculating the stress

state of the retaining walls, which allows you to determine the components of the stress state (stress in concrete in the compressed zone, as well as stress in stretched and compressed reinforcement) in horizontal sections of the vertical cantilever part of the retaining walls. A program of the experimental studies of the reinforced concrete retaining walls was developed.

Key words: hydrotechnical angular-type retaining walls, characteristics, interblock horizontal seams, compressive and tensile stresses, theoretical and experimental studies.

REFERENCES

1. Rasskazov L.N., Bestuzheva A.S., Malakhanov V.V., Tolstikov V.V., Orekhov V.G., Sainov M.P., Aniskin N.A., Soldatov P.V. *Gidrotekhnicheskiye sooruzheniya (rechnyye). Chast' 2 [Hydrotechnical structures (river)]. Part 2.* Moscow, LitRes, 2016. 538 p. (in Russian)
2. Volosukhin V.A., Dyba V.P., Evtushenko S.I. *Raschet i proyektirovaniye podpornykh sten gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Calculation and design of retaining walls of hydraulic structures].* Moscow, ASV, 2015. 96 p. (in Russian)
3. Volosukhin V.A., Voropaev V.I., Yaitskiy L.V. *Raschet podpornykh sten gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. Uchebnoye posobiye [Calculation of the retaining walls of hydraulic structures. Study guide].* Novocherkassk, 2000. 81 p. (in Russian)
4. Semenyuk S.D., Kotov Yu.N. *Zhelezobetonnyye podpornyye steny [Reinforced concrete retaining walls]. Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta [Bulletin of the Belarusian-Russian University].* 2018. No. 4 (61). Pp. 86–101. (in Russian)
5. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Nefedov A.V., Chernenko V.N., Ponomarev D.I., Mukashov R.Z., Lisichkin A.S. *Raschetnyye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya podpornoj stenki pervogo yarusy LV-1 vodopriyemnika Zagorskoy GAES, v tom chisle s uchetom dannykh sinkhronnykh zamerov pri sutochnom izmenenii urovnya verkhnego akkumuliruyushchego basseyna [Computational studies of the stress-strain state of the retaining wall of the first tier LV-1 of the receiving water of the Zagorskaya PSPP, including taking into account the data of synchronous measurements with daily changes in the level of the upper storage pool]. Bezopasnost' energeticheskikh sooruzheniy [Safety of the energy structures].* 2013. Issue 18. Pp. 38–50. (in Russian)
6. Lisichkin S.E., Rubin O.D., Atabiev I.Zh., Mel'nikova N.I. *Raschetnyye issledovaniya ustoychivosti i prochnosti podpornykh sten pervogo yarusy vodopriyemnika Zagorskoy GAES [Computational studies of the stability and strength of the retaining walls of the first tier of the receiving basin of the Zagorsk PSPP]. Prirodoobustroystvo [Environmental engineering].* 2012. No. 2. Pp. 44–48. (in Russian)
7. Rubin O.D., Ponomarev D.I., Mel'nikova N.I. *Raschetnyye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya podpornykh sten pervogo yarusy vodopriyemnika Zagorskoy GAES [Computational studies of the stress-strain state of the retaining walls of the first tier of the receiving water of the Zagorsk PSPP]. Prirodoobustroystvo [Environmental engineering].* 2011. No. 5. Pp. 51–55. (in Russian)
8. Nikolaev V.B., Gun S.Ya., Lisichkin S.E., Lyapin O.B. *Prochnost' zhelezobetonnykh podpornykh stenok [Strength of reinforced concrete retaining walls]. Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo [Hydrotechnical construction].* 1988. No. 10. Pp. 54–58. (in Russian)

9. Lisichkin S.E., Lyapin O.B. Poperechnoye armirovaniye massivnykh konstruksiy energeticheskikh sooruzheniy [Transverse reinforcement of massive structures of power facilities]. Energeticheskoye stroitel'stvo [Energy construction]. 1989. No. 11. Pp. 40–43. (in Russian)
 10. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Pashchenko F.A. Razrabotka metodiki rascheta napryazhennogo sostoyaniya v gorizontal'nykh secheniyakh gidrotekhnicheskikh podpornykh sten ugolkovogo tipa [Development of the methods for calculating the stress state in horizontal sections of hydraulic engineering angular-type retaining walls]. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings]. 2019. Vol. 15. No. 5. Pp. 339–344. (in Russian)
-