

УДК 502/504:627.83

А. П. Гурьев, профессор**Р. А. Хайруллин**, аспирант

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В СОПРЯГАЮЩИХ НАПОРНЫХ КОЛЕНАХ ШАХТНЫХ ВОДОСБРОСОВ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

С целью выявления пригодности использования существующих расчетных зависимостей для определения величины коэффициента сопротивления колена применительно к сопрягающим коленам шахтного водосброса в гидросиловой лаборатории кафедры комплексного использования водных ресурсов ФГОУ ВПО МГУП проведены исследования модели шахтного водосброса. Общие потери энергии в сопрягающем колене при напорном режиме работы можно принимать равными потерям по длине колена, увеличенным на 15...20 %.

There were carried out researches of the model of shaft water discharge in the hydro-power laboratory of the Chair of water resources complex usage in the Moscow State University of Environmental Engineering aiming at determination of the possibility of using the given estimated dependencies for finding a coefficient value of the bending resistance in conformity with the connecting bends of the shaft water discharge. Total losses of energy in the connecting bending under the pressure regime of work can be accepted equal to the losses along the length of the bend increased by 15...20 %.

Большое количество шахтных водосбросов сопрягается с отводящими водоводами коробчатого или прямоугольного поперечного сечения. При этом часто ствол шахты удается сопрягать с отводящим водоводом коленом тоже прямоугольного сечения. Нередко для уменьшения объемов работ в качестве

расчетного гидравлического режима при пропуске максимального расхода используют напорный режим всего водопроводящего тракта напорного водосброса либо ствола шахты и сопрягающего колена. В этом режиме сопрягающее колено шахтного водосброса работает по схеме, представленной на рис. 1.

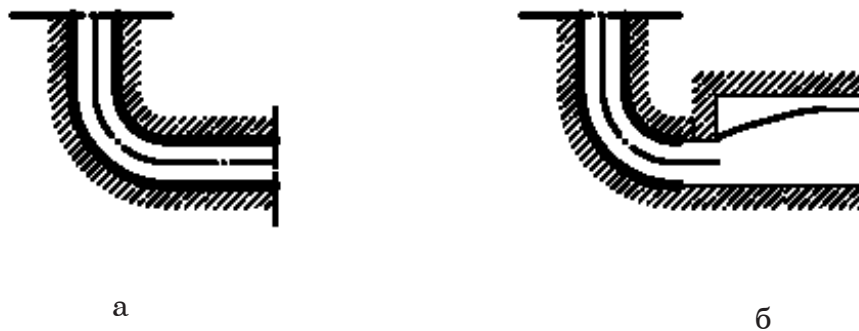


Рис. 1. Схема напорного режима сопрягающего колена шахтного водосброса: а — при работе в напорном режиме всего водопроводящего тракта; б — при работе в напорном режиме ствола шахты и колена

Определить потери энергии в сопрягающих коленах шахтных водосбросов теоретически невозможно, в связи с чем при гидравлических расчетах ис-

пользуют коэффициенты сопротивлений, полученные эмпирическим путем.

К сожалению, серьезных энергетических исследований сопрягающих ко-

лен шахтных водосбросов, несмотря на многочисленные модельные варианты, в настоящее время не проводят. При проектировании шахтных водосбросов для определения потерь энергии в сопрягающих коленах, работающих в напорном режиме, используют соответствующие коэффициенты, полученные для колен напорных водоводов.

Для коэффициента ξ_k сопротивления напорного колена прямоугольного поперечного сечения в справочной литературе имеется наиболее употребительна формула Вейсбаха [1] и результаты исследований И. Е. Идельчика [2], аппроксимированные авторами для угла поворота 90° :

формула Вейсбаха –

$$\zeta_{90^\circ} = \left[0,124 + 0,274 \left(\frac{h}{R} \right)^{3,5} \right], \quad (1)$$

формула И. Е. Идельчика –

$$\zeta_{90^\circ} = 0,209 \left(\frac{h}{R} \right)^{-0,47}. \quad (2)$$

Графики зависимости от относительной кривизны R_{oc}/h вогнутой грани сопрягающего колена коэффициента сопротивления ξ_k напорного прямоугольного колена с углом поворота 90° приведены на рис. 2. Кроме этих материалов А. Д. Альтшуль приводит аналогичные графики ряда авторов (рис. 2) [3].

Как видно из графиков, формула Вейсбаха дает завышенные значения коэффициента сопротивления сопрягающего колена прямоугольного поперечного сечения. Данные И. Е. Идельчика соответствуют верхней границе диапазона зоны коэффициентов сопротивлений, образуемой кривыми, приведенными в [3]. В диапазоне значений R_{oc}/h от 1,5...4,0 разброс значений величины коэффициента сопротивления ξ_k от среднего значения находится в диапазоне от ± 100 до 25 %.

С целью выявления пригодности использования приведенных расчетных зависимостей для определения величины коэффициента сопротивления колена применительно к сопрягающим ко-

Коэффициент сопротивления колена 90°

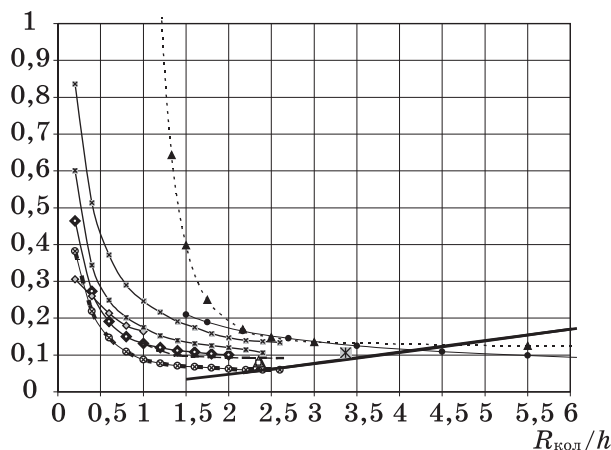


Рис. 2. Графики зависимости от относительной кривизны оси R_{oc}/h прямоугольного поперечного сечения сопрягающего колена коэффициента сопротивления ξ_k в напорном режиме: $\dots \blacktriangle \dots$ – Вейсбах; \blacklozenge – Ханжёнков; $\text{---} \times \text{---}$ – Вирт; $\text{---} \blacksquare \text{---}$ – Медисон; $\text{---} * \text{---}$ – Брюсе; $\text{---} \bullet \text{---}$ – Идельчик; $\text{---} \blacklozenge \text{---}$ – Гофман и др.; $\text{---} \times \text{---}$ – Д. Паркер; $\text{---} \circ \text{---}$ – И. Паркер; $\text{---} \text{---} \text{---}$ – Броун; $\text{---} * \text{---}$ – авторский эксперимент ($Q = 27,6$ л/с)

ленам шахтного водосброса в гидросиловой лаборатории кафедры комплексного использования водных ресурсов ФГОУ ВПО МГУП были проведены исследования модели шахтного водосброса. Исследовали работу сопрягающего колена прямоугольного поперечного сечения шириной в свету 100 мм с радиусом кривизны вогнутой грани колена $R = 21,7$ см и углом поворота $88,7^\circ$. Сопрягающее колено соединено со стволом шахты с помощью конфузора.

Было исследовано два варианта сопрягающего колена, работающего в напорном режиме: с высотой сечения $h = 76$ мм и $h = 56$ мм. Соответственно на выходе конфузор имел высоту 76 и 56 мм. Центр радиуса кривизны сопрягающего колена располагался в плоскости выходного сечения конфузора. Работу сопрягающего колена высотой 76 мм исследовали при расходах модели $Q = 29,0$ и $21,75$ л/с, а высотой 56 мм — при расходе 21,75 л/с.

Определение кинематических характеристик потока и величины гид-

равлических потерь определяли по данным измерения поля скоростей трубкой Пито диаметром 2,5 мм. Замеры проводили на пяти вертикалях в выходном сечении сопрягающего колена в 8...11 точках на каждой вертикали. Потери энергии в точках замера определяли как разницу показаний пьезометра уровня верхнего бьефа и показаний пьезометра динамического отверстия трубки Пито.

Основные результаты исследований работы сопрягающего колена в напорном режиме представлены в таблице и в графическом виде на рис. 3...6 для колена с высотой сечения $h = 76$ мм.

Измерение кинетических параметров потока при напорном режиме работы сопрягающего колена производили в выходном сечении сопрягающего колена и в отводящем безнапорном водоводе на расстоянии 172 см, чему соответствует 22,6 и 30,7 глубин потока. Поскольку в этом режиме входное сечение сопрягающего колена оказалось недоступным для измерений, величина потерь напора на участке от верхнего бьефа до входа в колено была определена расчетным путем. Предварительно в безнапорном режиме в выходном сечении сопрягающего конфузора были изучены параметры потока,

Основные результаты исследования кинематики потока в сопрягающем напорном колене прямоугольного поперечного сечения шахтного водосброса

Высота сечения колена h , мм	76,0	76,0	56,0
Расход Q , л/с	27,74	29,0	21,75
Потери энергии в колене, h_w , см	5,47	5,82	8,01
Средняя скорость потока на выходе v , см/с	365,0	381,6	388,4
Гидравлический радиус R , см	2,16	3,01	1,79
Гидравлический диаметр в среднем сечении $d_r = 4R$, см	8,64	8,64	7,18
Средний радиус осевой линии потока R_{oc} , см	17,87	17,87	18,87
Длина осевой линии потока, $l_{oc} = 1,547R_{oc}$, см	27,65	27,65	29,2
Относительная длина среднего радиуса осевой линии $\bar{R}_{oc} = R_{oc} / h$	2,35	2,35	4,07
Относительная длина осевой линии потока $\bar{l}_{oc} = l_{oc} / d_r$	3,2	3,2	4,05
Число Рейнольдса в среднем сечении потока Re	315 360	329 684	278 727
Коэффициент Дарси по формуле Альтшуля $\lambda = 0,11\sqrt{\frac{\Delta}{d_r} + \frac{68}{Re}}$	0,0212	0,0211	0,0221
Коэффициент сопротивления сопрягающего колена $\xi_k = h_{w,k} \cdot 2g / v^2$	0,0806	0,0784	0,105
Коэффициент сопротивления по длине сопрягающего колена $\xi_l = \lambda_1 l_{oc} / 4R$	0,0679	0,0685	0,0900
Коэффициент потерь на деформацию потока в колене	0,0130	0,0098	0,015
Доля от потерь напора по длине на деформацию потока, %	15,9	16,1	16,7

включая потери энергии, что позволило при напорном режиме работы сопрягающего колена вычислить потери энергии пропорционально квадрату расходов.

На рис. 3 приведено распределение скоростей по глубине потока на мерных вертикалях в выходном сечении сопрягающего колена высотой 76 мм для расходов $Q = 27,6$ л/с и $Q = 29,0$ л/с.

На рис. 4 приведены графики распределения на мерных вертикалях по глубине потока потерь напора от верх-

него бьефа до створа выходного сечения сопрягающего колена для расходов $Q = 27,6$ л/с и $Q = 29,0$ л/с.

Как видно из графиков, основные потери сосредоточены в потолочной зоне сопрягающего колена, где развивается отрывной пограничный слой с большими поперечными градиентами скоростей (рис. 4).

На рис. 5 приведено распределение осредненных скоростей по ширине потока в выходном сечении сопрягаю-

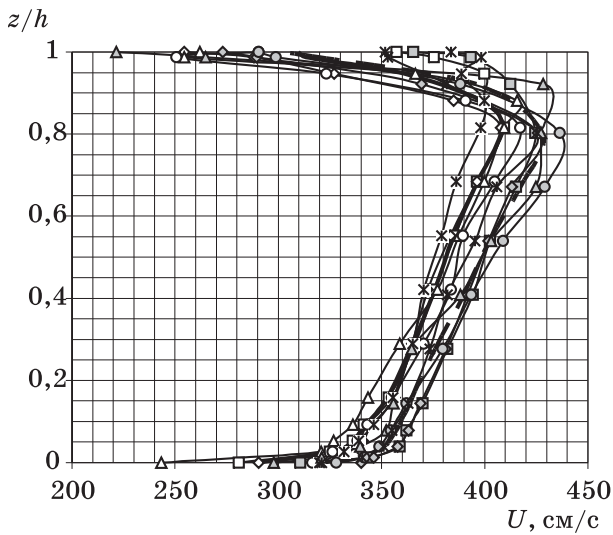


Рис. 3. Распределение скоростей по глубине потока на выходе из напорного колена ($h_{\text{кол}} = 76 \text{ мм}$): — U_{cp} ($Q = 27,6 \text{ л/с}$); — U_{cp} ($Q = 29,0 \text{ л/с}$); — (—□—) B-1; — (—◇—) B-2; — (—△—) B-3; — (—○—) B-4; — (—ж—) B-5

щего колена для расходов $Q = 27,6 \text{ л/с}$ и $Q = 29,0 \text{ л/с}$ и в мерном створе безнапорного туннеля при расходе $Q = 29,0 \text{ л/с}$.

На рис. 6 приведено распределе-

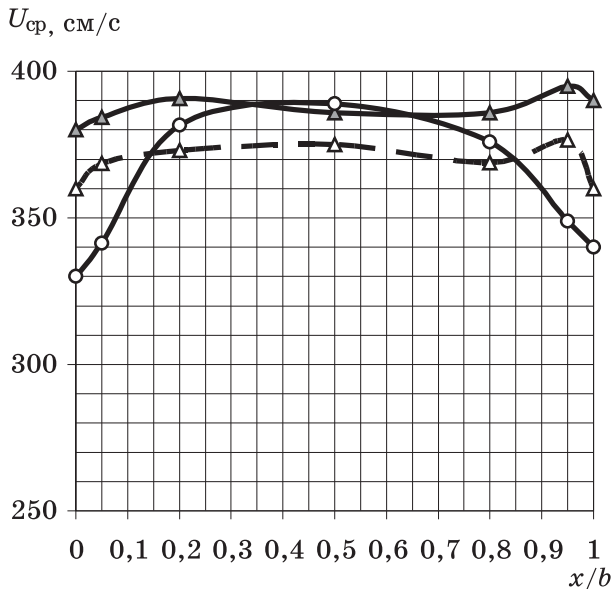


Рис. 5. Распределение осредненных скоростей по ширине потока при напорном колене ($h_{\text{кол}} = 76 \text{ мм}$): —△— — выходное сечение колена, $Q = 27,6 \text{ л/с}$; —△— — выходное сечение колена, $Q = 29,0 \text{ л/с}$; —○— — туннель, $Q = 29,0 \text{ л/с}$

при расходе $Q = 29,0 \text{ л/с}$.

Как видно из графиков, в выходном сечении сопрягающего колена потери напора достаточно равномерно рас-

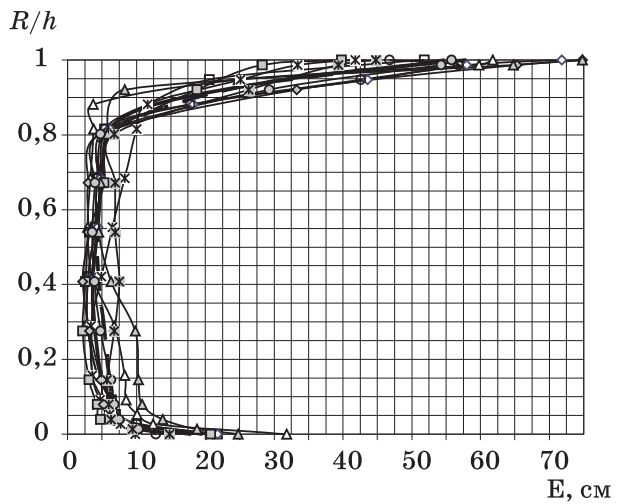


Рис. 4. Распределение потерь энергии по глубине потока на выходе из напорного колена ($h_{\text{кол}} = 76 \text{ мм}$): — dE_{cp} ($Q = 27,6 \text{ л/с}$); — dE_{cp} ($Q = 29,0 \text{ л/с}$); — (—□—) B-1; — (—◇—) B-2; — (—△—) B-3; — (—○—) B-4; — (—ж—) B-5

ние по ширине потока потерь напора от верхнего бьефа до створа выходного сечения сопрягающего колена для расходов $Q = 27,6 \text{ л/с}$ и $Q = 29,0 \text{ л/с}$ и в мерном створе безнапорного туннеля

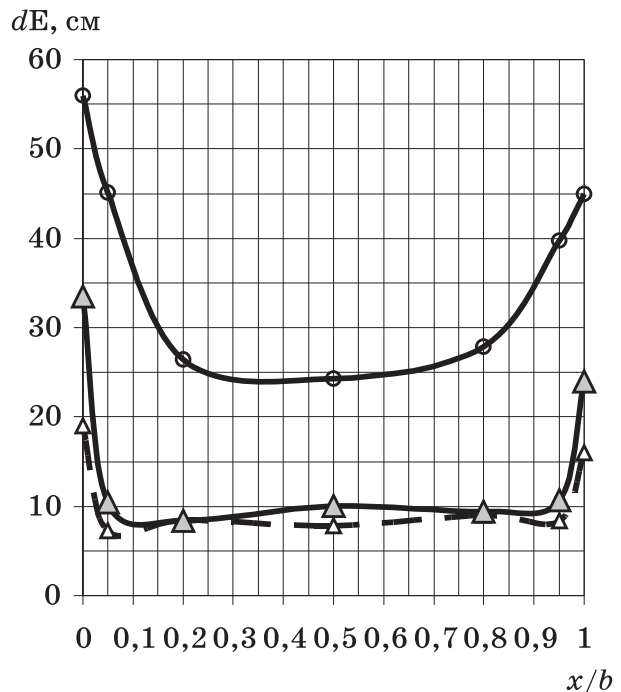


Рис. 6. Распределение осредненных скоростей по ширине потока при напорном колене ($h_{\text{кол}} = 76 \text{ мм}$): —△— — выход из колена, $Q = 27,6 \text{ л/с}$; —△— — выход из колена, $Q = 29,0 \text{ л/с}$; —○— — туннель, $Q = 29,0 \text{ л/с}$

пределены по ширине потока, за исключением пристенных зон (рис. 6). Это

можно объяснить тем, что ввиду относительно небольшой длины сопрягающего колена вдоль боковых стен и вогнутой грани колена пограничный слой еще не успевает развиться в полной мере по ширине потока, а по глубине его развитие в потолочной области также равномерное.

Иное дело распределение потерь напора по ширине потока в туннеле.

С одной стороны, достаточное большое расстояние до мерного створа создает условия для расширения пограничного слоя от боковых стен в сторону оси потока. Кроме того, на выходе из сопрягающего колена на поверхности потока в углах соединения потолка и боковых стен сопрягающего колена формируются две поверхностные волны, которые распространяются к оси и способствуют торможению верхних слоев потока, увеличивая в них гидравлические потери.

Получены следующие значения коэффициентов сопротивления напорного колена: $\xi_{\text{к}} = 0,0806, 0,0784$ для высоты выходного сечения конфузора $h = 76$ мм и расходов $27,74$ и $29,0$ л/с соответственно; $0,105$ — для высоты $h = 56$ мм с расходом $21,75$ л/с (таблица, рис. 2).

Как следует из рис. 2, полученные из экспериментов значения коэффициентов сопротивления напорного сопрягающего колена находятся в пределах приведенных кривых коэффициентов сопротивлений.

Для относительно высокого сечения колена $R_{\text{oc}}/h = 2,35$ экспериментальное значение коэффициента сопротивления напорного колена прямоугольного сечения находится в нижней части семейства кривых. Для $R_{\text{oc}}/h = 4,07$ экспериментальное значение находится в верхней части семейства кривых, что можно объяснить большей относительной длиной осевой линии и большим значением коэффициента λ . В то же время оказалось, что доля потерь напора, связанная с деформацией потока, в проведенных экспериментах находится в пределах

$15...16$ % от потерь по длине.

На рис. 2 приведена зависимость изменения коэффициента потерь энергии потока по длине колена от величины относительной длины R_{oc}/h радиуса кривизны осевой линии. Если сопоставить значения коэффициентов сопротивления напорного колена прямоугольного сечения по приведенным зависимостям и значения коэффициента потерь энергии потока по длине колена, то несложно заметить, что все приведенные зависимости имеют в пределе конечное значение, а должны стремиться к потерям по длине.

Выводы

В наиболее популярной справочной и специальной литературе, посвященной работе шахтного водосброса, отсутствуют материалы экспериментальных исследований работы в напорном режиме сопрягающего колена прямоугольного поперечного сечения.

Используемые при гидравлических расчетах шахтных водосбросов зависимости для определения потерь энергии в сопрягающих коленах работы прямоугольного поперечного сечения при напорном режиме дают завышенные в $1,5...2,0$ раза значения при $R_{\text{oc}}/h = 2...2,5$ и заниженные в $1,5...2$ раза значения при $R_{\text{oc}}/h = 3,5...4$.

Проведенные авторами эксперименты подтверждают вывод И. Е. Идельчика о том, что суммарные потери энергии в напорных коленах водоводов состоят из потерь по длине и потерь, связанных с деформацией потока.

Доля потерь энергии, связанная с деформацией потока в сопрягающем колена шахтного водосброса, находится в пределах $15...16$ % от потерь по длине. Учитывая результаты проведенных исследований, общие потери энергии в сопрягающем колена при напорном режиме работы можно принимать равными потерям по длине колена, увеличенным на $15...20$ %.

Целесообразно продолжить изучение работы сопрягающих колена шахтных водосбросов для расширения диапазона исследования конструктивных

параметров и гидравлических режимов работы.

Ключевые слова: проектирование шахтных водосборов, относительная кривизна оси прямоугольного поперечного сечения, коэффициент сопротивления в напорном режиме, кинематические характеристики потока, величины гидравлических потерь.

Список литературы

1. Павловский, Н. Н. Гидравлический справочник [Текст] / Н. Н. Павловский.

— Л.-М. : ОНТИ НКП СССР, 1937.

2. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И. Е. Идельчик. — М. : Машиностроение, 1975.

3. Альтшуль, А. Д. Местные гидравлические сопротивления при движении вязких жидкостей [Текст] / А. Д. Альтшуль. — М. : Гостехиздат, 1962.

4. Чистяков, В. Я. Модельные гидравлические исследования турбинных блоков ГЭС [Текст] / В. Я. Чистяков // Известия ВНИИГ. — 1961. — № 163.

УДК 502/504:624.014

Ф. В. Расс, канд. техн. наук, профессор
О. В. Иванова, магистр

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

ДЕРЕВЯННЫЕ КУПОЛА И ОБОЛОЧКИ

Обобщен опыт применения деревянных куполов и оболочек в производственных сельскохозяйственных и общественных зданиях. Выбраны перспективные направления конструктивных решений пологих деревянных куполов и оболочек положительной гауссовой кривизны. На основе анализа статического расчета подобраны сечения основных элементов двух вариантов сборных куполов и оболочек на прямоугольном плане: клефанерного сплошного и сетчатого из клееной древесины.

The experience of application of wooden domes and shells in production of agricultural and public buildings is generalized. There are chosen perspective directions of structural decisions of slanting wooden domes and shells of the positive gauss curvature. On the basis of the analysis of the static calculation there are chosen cross-sections of basic elements of two variants of prefabricated domes and shells on the right-angular plan: solid glued plywood and screened glued wood.

При строительстве производственных и общественных зданий в сельской местности в последние годы нередко применяют плоскостные конструкции в виде арок или ферм из дощатоклееных элементов. Опыт зарубежного и отечественного строительства с использованием покрытий пространственных деревянных конструкций показывает, что в определенных случаях они могут быть рациональны с функциональной и технико-экономической точек зрения. Формообразования из деревянных материалов — часто это цилиндрические оболочки нулевой гауссовой кривизны — обычно имеют относительно небольшие пролеты — до 24 м. Оболочки отрицательной кривизны в связи со своей особой формой, как правило, не-

редко используют там, где необходимо подчеркнуть своеобразное архитектурное решение — здания ресторанов, кафе и др. Для покрытий выставочных и спортивных залов, зданий рынков и складов применяют пространственные конструкции положительной гауссовой кривизны — ребристые купола диаметром до 80 м и более на основе дощатоклееных арок или сетчатые купола. Они позволяют перекрывать большие пролеты. Применяемые ранее дощатые купола-оболочки недостаточно индустриальны, ими можно перекрыть относительно небольшие пролеты. Есть примеры использования ребристых оболочек на прямоугольном плане с дощатоклееными ребрами и дощатой обшивкой по месту.