

С. Н. Якупов, И. Т. Мирсаяпов, Н. М. Якупов

## ТОНКОСТЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ ОБЪЕКТОВ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА И ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

*Ключевые слова:* покрытие отстойника очистных сооружений, известные покрытия, фрагменты тороидальной гофрированной оболочки, система каналов продувки, снижение коррозии.

Тонкостенные конструкции, сочетающие прочность, жесткость и минимальный вес получили широкое применение в агропромышленном комплексе, в частности, конструкции бункерного типа представляют собой цилиндрические оболочки, сочененные с конусом. Для решения экологических проблем – уменьшения вредных газообразных выбросов в атмосферу – открытые очистные сооружения закрываются покрытиями. Известные покрытия, используемые в сооружениях агропромышленного комплекса, а также в конструкциях отстойника относительно тяжелы и из-за конструктивных недоверий, и подвергаются быстрому коррозионному износу. Целью работы является анализ известной конструкции покрытия в виде синтеза цилиндрической и пологой конической оболочки. Задачами исследования являются разработка облегченного варианта конструкции покрытия с минимальной материалоемкостью и высокой долговечностью. В работе отмечаются некоторые известные покрытия; приводится анализ конструкции варианта отстойника в виде синтеза цилиндрической и гладкой пологой конической оболочки. Отмечается эффективность оболочечных куполообразных покрытий. Анализируются варианты гофрированной конической и тороидальной оболочки, отличающиеся минимальными весовыми свойствами; меняя параметры гофра можно в больших пределах изменять жесткостные характеристики оболочки. В центральной части необходимая жесткость конструкции обеспечивается наличием двухслойной гофрированной оболочки. Описывается новая конструктивно-силовая схема покрытия, исключающая отмеченные недостатки. Новый вариант покрытия, состоящий из целого из двух участков тороидальной оболочки, имеет в окружном направлении гофрированную структуру. Форма покрытия упрощает технологию отсоса газов из воздушного пространства бассейна. В нижней части покрытие закрывается антикоррозионным защитным экраном, формируя с гофрами продувочные каналы. Такую схему покрытия можно трактовать, как конструктивным решением проблемы коррозионного износа. Помимо отмеченных достоинств, покрытие экологически эффективна, имеет архитектурно выразительную форму, обеспечивает максимальную несущую способность при минимальном весе конструкции, имеет высокую долговечность. Рекомендуется использовать при проектировании новых покрытий отстойников.

S. N. Yakupov, I. T. Mirsayapov, N. M. Yakupov

## THIN-WALLED COATINGS OF AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX FACILITIES AND TREATMENT FACILITIES

*Keywords:* coating of a treatment plant settling tank, known coatings, fragments of a toroidal corrugated shell, system of blowdown channels, reduction of corrosion.

Thin-walled structures that combine strength, rigidity and minimum weight are widely used in the agro-industrial complex, in particular, bunker-type structures are cylindrical shells articulated with a cone. To solve environmental problems - reduce harmful gaseous emissions into the atmosphere - open treatment facilities are covered with coatings. Known coatings used in agro-industrial complex structures, as well as in settling tank structures, are relatively heavy and, due to design imperfections, are subject to rapid corrosion wear. The objective of the work is to analyze the known coating design in the form of a synthesis of a cylindrical and shallow conical shell. The objectives of the study are to develop a lightweight version of the coating design with minimal material consumption and high durability. The paper notes some known coatings; an analysis of the design of a settling tank variant in the form of a synthesis of a cylindrical and smooth shallow conical shell is provided. The efficiency of shell dome-shaped coatings is noted. Variants of a corrugated conical and toroidal shell, distinguished by minimal weight properties, are analyzed; By changing the parameters of the corrugation, it is possible to change the rigidity characteristics of the shell in a wide range. In the central part, the required rigidity of the structure is ensured by the presence of a two-layer corrugated shell. A new structural and power scheme of the coating is described, eliminating the noted disadvantages. The new version of the coating, consisting as a whole of two sections of the toroidal shell, has a corrugated structure in the circumferential direction. The shape of the coating simplifies the technology of gas extraction from the air space of the pool. In the lower part, the coating is closed with an anti-corrosion protective screen, forming purge channels with corrugations. Such a coating scheme can be interpreted as a constructive solution to the problem of corrosion wear. In addition to the noted advantages, the coating is environmentally friendly, has an architecturally expressive shape, provides maximum load-bearing capacity with minimum weight of the structure, and has a high durability. Recommended for use when designing new septic tank coatings.

### Введение

Тонкостенные конструкции, сочетающие прочность, жесткость и минимальный вес получили широкое применение. Не обошли они и

агропромышленные комплексы, в которых они являются несущими конструктивными элементами зерноочистительных агрегатов, бункерных сооружений различного назначения и т.д. Так, например, конструкции бункерного типа

представляют собой цилиндрические оболочки, сочлененные с конусом.

В связи с ужесточением требований к защите окружающей среды от загрязнения атмосферы и решения экологических проблем тонкостенные конструкции все более широкое распространение получают в качестве покрытий различных очистных сооружений. Отстойники – важная часть систем очистки на производстве. Они бывают разных видов и конструкций, каждый со своим назначением. Известны неподвижные и вращающиеся плоские и купольные покрытия [1,2] (рис. 1).



Рис. 1 – Купольные покрытия отстойников (журнал «Вода Magazine», №11, 87, 2014)

Fig. 1 – Dome covers for sedimentation tanks (from Water Magazine, 11, 87, (2014))

При этом у вращающихся покрытий каркас в районе борта опирается на колесные опоры. Появляются пластиковые покрытия, хотя до сих пор широкое применение получают куполообразные покрытия, состоящие преимущественно из металлического каркаса, обшитого сверху металлическими листами [3,4]. Анализ различных методов изготовления и монтажа пространственных металлических конструкций приведен в [5].

Как правило, отстойники очистных сооружений представляют собой круговые бассейны; в центральной части имеются агрегаты, обеспечивающие движение радиальной щетки по кругу [1,3].

Типовая схема поперечного сечения отстойника представлена на рис. 2а. Наличие в центральной части площадки обслуживания позволяет установить центральную опору для конструкции покрытия.

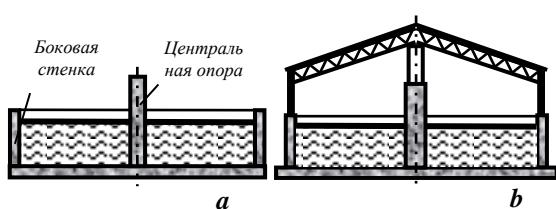


Рис. 2 – Схема типового отстойника: а - без покрытия; б - с покрытием

Fig. 2 – Diagram of a typical sedimentation tank: a – without coating; b – with coating

Был разработан вариант покрытия в виде синтеза цилиндрической и пологой конической оболочки, опирающейся на ферменные балки (рис. 2б). Несмотря на простоту такого покрытия, оно имело

существенные недостатки: несущие конструктивно-силовые ферменные балки находятся внутри замкнутой полости, образуемой покрытием и зеркалом жидкости отстойника; внутри полости среда агрессивная. Это было одним из основных причин быстрого коррозионного износа конструкции покрытия (долговечность конструкции 5 - 7 лет).

Из функционального назначения покрытия видно, что расстояние между зеркалом бассейна и покрытием должна быть минимальным (около 2,5 м) – при этом конструкция будет иметь минимальную парусность. В то же время форма покрытия должна быть такой, чтобы она обеспечивала прочность, жесткость и устойчивость при минимальной материалоемкости; при этом существенным является долговечность конструкции покрытия.

При проектировании покрытий возможны различные конструктивные решения. Поскольку варианты покрытия в виде оболочек имеют относительно небольшой вес при достаточной жесткости и прочности, то предпочтительны оболочечные варианты покрытия. Эффективны оболочечные куполообразные покрытия. Они наилучшим образом отражают тенденции в современной архитектуре [6-11]. Некоторые виды купольных покрытий рассмотрены в [12-17].

В качестве вариантов покрытия были рассмотрены покрытия в виде гофрированной торOIDальной оболочки, имеющей гофры различной формы по окружной координате. Форма варианта оболочки представлена на рис. 3а. Весовой анализ показал, что такая оболочка в два с лишним раза легче, чем вариант по рис. 2б; причем оболочка обеспечивает высокую жесткость конструкции. Т.е. применение оболочек двойкой кривизны наиболее эффективно при создании конструкций минимального веса.

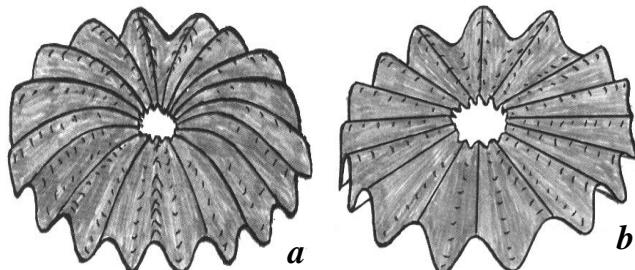
Однако такая конструкция имеет недостатки. Одним из недостатков является образование наружной воронкообразной полости в центральной части покрытия, которая является накопителем грязи и осадков. Возникают также трудности обеспечения отсоса газов из внутренней воздушной полости бассейна.

Был рассмотрен вариант гофрированной конической оболочки (рис. 3б), который оказался в полтора раза легче, чем вариант по рис. 2б, однако уступает по жесткостным свойствам торOIDальной гофрированной оболочке при равных весовых параметрах, но имеет простую технологию изготовления; меняя параметры гофра можно в больших пределах изменять жесткостные характеристики оболочки [13].

Упрощенный вариант гофрированной конической оболочки (складчатый купол) – уникальный элемент здания – использован в покрытии здания цирка в г. Бишкек. Купол состоит из 140 железобетонных секций, которые держатся без опорных колонн [7].

Эффективность использования оболочек с гофрировкой различной формы бесспорна. Очевидно, в дальнейшем такие оболочки найдут,

широкое применение. Возникла необходимость создания такой конструкции, которая позволяла бы обеспечить минимальную материалоемкость при максимальной прочности и жесткости, а также форма конструкции должна обеспечивать отсос газов из воздушного пространства бассейна.



**Рис. 3 – Схемы покрытий в виде гофрированных оболочек: а – торoidalная; б – коническая**

**Fig. 3 – Schematic diagrams of corrugated shell coatings: a – toroidal; b – conical**

#### Анализ известных аналогов

Для обеспечения безаварийной работы тонкостенных конструкций и сооружений необходимо реально оценить несущую способность. Известны покрытия вертикальных цилиндрических резервуаров большой емкости для хранения жидкости, выполненные со сферической оболочкой [18].

Известны пространственные покрытия, установленные на размещенные по периметру опоры, включающие центральный элемент в виде выпуклой оболочки и опертый на расположенные по его периметру боковые элементы, выполненные в виде оболочек [19].

Известно пространственное покрытие, включающее центральный элемент, выполненный из ферм, и боковые оболочки, опертые одним концом на центральный элемент, а другим – на размещенные по периметру покрытия опоры, и расположенные между боковыми оболочками и опорами консольные оболочки. Боковые оболочки выполнены составными конструкциями – из двух оболочек двойкой кривизны [20], имеющие следующие недостатки:

- при наличии внутренней агрессивной среды большие площади конструкции покрытия, включая центральный элемент, подвержены коррозии, что приводит к снижению долговечности конструкции; причем, как ранее установлено, несущие элементы конструкций, воспринимающие усилия растяжений, подвержены большему коррозионному износу;

- застойные зоны в покрытии на стыках боковых и консольных оболочек приводят к накоплению влаги, что также способствует повышенной коррозии;

- покрытие по рассмотренной форме способствует скоплению осадков на складах снаружи покрытия; в зимний период образуются снежные заносы;

- покрытие неприменимо для отстойников, где требуется обеспечение герметичности, например, для изоляции окружающей среды от выбросов различных вредных и зловонных продуктов.

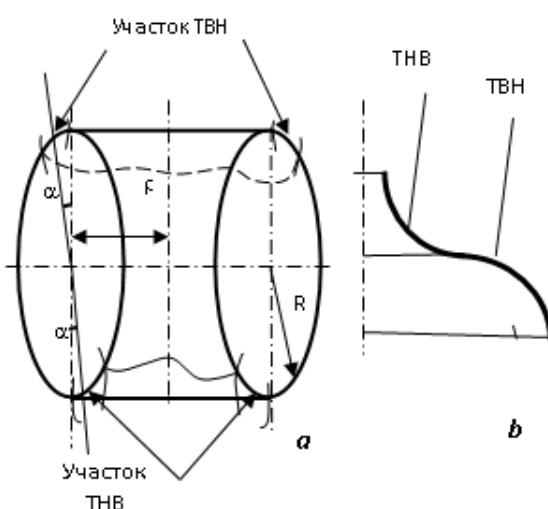
#### Вариант конструктивно-силовой схемы покрытия отстойника

Основной задачей являются повышение коррозионной стойкости и долговечности конструкции, увеличение несущей способности, облегчение технологии монтажа и обеспечение защиты окружающей среды. Идет постоянный процесс поиска новых способов защиты конструкций от коррозии; разрабатываются специальные функциональные, в том числе самовосстанавливающиеся покрытия для защиты от коррозии.

**Конструктивные особенности.** Известно, что покрытие, выполненное в виде оболочки, имеет архитектурно выразительную форму, отличается относительно малым весом, высокой жесткостью и прочностью.

Тороидальные оболочки, благодаря наличию двойкой кривизны, обладают высокой жесткостью и прочностью. Вариант покрытия состоит в целом из двух участков торoidalной оболочки (рис. 4).

Центральный элемент представляет собой в целом оболочку отрицательной кривизны – часть торoidalной оболочки (участок ТНВ) со специфическими гофрами; боковые оболочки представляют в целом оболочку положительной кривизны – часть торoidalной оболочки (участок ТВН) также со специфическими гофрами. Покрытие включает центральный элемент, опертый на центральную опору, и боковые оболочки, опертые одним концом на центральный элемент, а другим – на размещенные по периметру покрытия опоры.



**Рис. 4 – Тороидальная оболочка: а – участки ТНВ и ТВН, б – участки ТНВ и ТВН в покрытии отстойника**

**Fig. 4 – Toroidal shell: a – TNV and TVN sections, b – TNV and TVN sections in the sedimentation tank coating**

Центральный элемент представляет собой оболочку отрицательной кривизны и составлен из отдельных радиально расположенных расширяющихся от центра к периферии опорных желобов, которые обращены днищами вниз и сстыкованы друг с другом по радиальным контурам.

На центральном элементе и боковой оболочке с нижней стороны установлен антакоррозионный защитный экран, формирующий с желобами радиально расположенные продувочные каналы. Экран расположен в нижней касательной поверхности центрального элемента и боковой оболочки.

На центральный элемент сверху установлена дополнительная верхняя оболочка, составленная из верхних желобов, которые обращены днищем вверх и состыкованы друг с другом по радиальным контурам, причем для формирования дополнительных продувочных каналов верхние желоба сопряжены с опорными желобами по стыковочным ребрам.

Центральный элемент установлен на центральной опоре. При необходимости центральный элемент с боковой оболочкой и верхней оболочкой стягиваются к штоку центральной опоры посредством растяжек.

На рис. 5 представлен вид составного покрытия; направления потоков воздуха показаны стрелками. Изображение варианта такого покрытия приведено на рис. 6. На рис. 7 изображена простейшая схема сечения боковой оболочки.

Покрытие опирается на стенку 1 отстойника (резервуара) и центральную опору 2 (рис. 5). Резервуар представляет собой бассейн круговой формы в плане. Покрытие состоит из центрального элемента, боковых оболочек и верхней оболочки.

Центральный элемент представляет собой оболочку отрицательной кривизны и составлен из отдельных радиально расположенных расширяющихся от центра к периферии опорных желобов 3. Центральный элемент опирается на центральную опору 2 и фиксируется, например, анкерными болтами.

Боковая оболочка в целом является выпуклой, имеет положительную кривизну и составлена из отдельных радиально расположенных расширяющихся от центра к периферии основных желобов 10, которые обращены днищами вниз и сстыкованы друг с другом по радиальным контурам. При этом каждый основной желоб 10 изогнут в продольном направлении. Стыковка основных желобов друг с другом осуществляется непосредственно между собой, либо посредством усиленных стыковочных ребер. На торцевых кромках основных желобов 10 установлены формообразующие подкрепления из полосового материала.

Основные желоба 10 верхними концами опираются на нижние концы опорных желобов 3 центрального элемента с сопряжением упомянутых концов друг с другом.

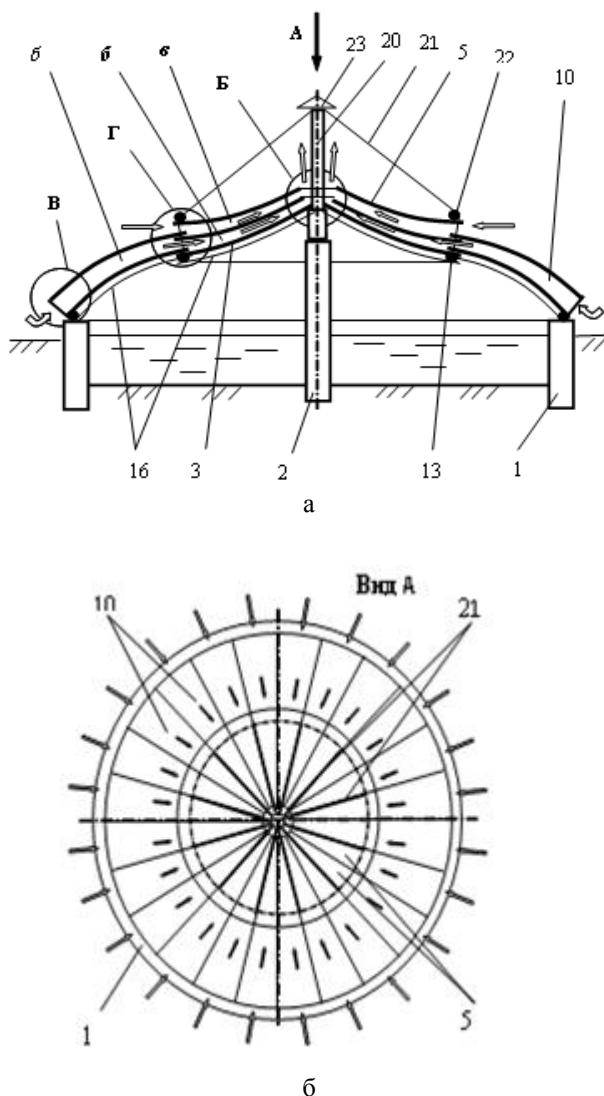
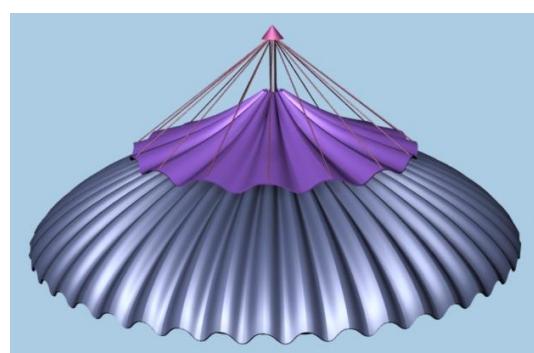


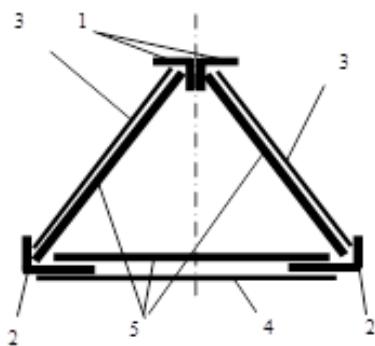
Рис. 5 – Вид покрытия: *a* - в разрезе, *b* - вид сверху

**Fig. 5 – View of the coating: a – cross-section, b – top view**



**Рис. 6 – Изображение покрытия**

**Fig. 6 – Image of the coating**



**Рис. 7 – Вариант простейшей схемы желобов боковой оболочки: 1, 2 – верхние и нижние уголки; 3 – боковые стенки; 4 – защитный экран; 5 – формообразующая нервюра**

**Fig. 7 – Simplest design of side shell gutters: 1, 2 – upper and lower corners; 3 – side walls; 4 – protective screen; 5 – form-forming rib**

Для повышения несущей способности покрытия устанавливается кольцевой шлангогут усиления 13, который жестко связывает нижние концы опорных желобов 3 центрального элемента.

Основные желоба 10 нижними концами опираются на размещенные по периметру стенки 1 подкладки и соединяются со стенкой 1 при помощи анкерных болтов. Вместо подкладок может быть использовано металлическое кольцо, лежащее на опорной площадке стенки 1.

На центральном элементе и боковой оболочке с нижней стороны установлен защитный усиливающий экран 16, формирующий продольные (радиально расположенные) продувочные каналы *б*. Экран 16 закреплен на стыковочных ребрах желобов посредством радиальных и окружных планок, причем экран расположен в касательной поверхности центрального элемента и боковой оболочки. Верхний конец каждого продувочного канала *б* связан с соответствующим продувочным отверстием *а*.

На опорные площадки желобов 3 центрального элемента сверху установлена дополнительная верхняя оболочка, составленная из верхних желобов 5, которые обращены днищем вверх и состыкованы друг с другом по радиальным сечениям, причем для формирования дополнительных продувочных каналов *в* верхние желоба 5 сопряжены с опорными желобами 3 по стыковочным ребрам. Для этого на стыковочных ребрах верхних желобов 5 предусмотрены ответные опорные площадки. Верхний конец каждого продувочного канала *в* связан с соответствующим продувочным отверстием *г*.

Выбор конфигурации поперечного сечения определяется проходным сечением канала, а также необходимой прочностью и архитектурой покрытия.

Для уменьшения веса конструкции покрытия рекомендуется центральный элемент в совокупности с боковой оболочкой и верхней оболочкой стянут к штоку 20 центральной опоры 2

посредством стяжки 21, которые могут быть выполнены из металлических стержней, троса или цепей. Один конец каждой растяжки 21 закреплен на штоке 20, а другой конец присоединен к верхнему кольцу 22. На верхнем конце штока установлен защитный колпак 23. На стыках между узлами конструкции установлены герметизирующие прокладки.

*О рекомендуемых материалах.* Выше акцентировано внимание на геометрических формах покрытия. Описанные особенности формирования покрытия позволяют эффективно решать проблему коррозионной защиты конструктивным путем. Говоря о рекомендуемых материалах, описанную конструкцию можно реализовать из различных материалов. Возможны варианты изготовления конструктивных элементов из металла, из полимера и смешанный вариант – в зависимости от возможностей исполнителя. В случае металлического варианта наиболее эффективно исполнение желобов по схеме, представленной на рис. 7. В случае полимерного варианта исполнения можно реализовать гладкие желабы по рис. 6. При этом можно использовать, например, подходы формования оболочек сложной геометрии по патентам РФ №2255864 и №2295446.

*Об алгоритме расчета напряженно-деформированного состояния (НДС).* Описанное покрытие представляет собой оболочечную систему, состоящую из двуслойных и трехслойных оболочек сложной геометрии. Для расчета НДС таких объектов рекомендуется использовать метод конечных элементов (МКЭ). При этом желательно использовать оболочечные элементы. Эффективным оболочечным подходом, является сплайновый вариант метода конечных элементов [21]. В этом методе, в отличие от традиционного метода МКЭ, вначале решается задача параметризации рассматриваемой области сложной геометрии параметрами канонической области; каноническая область разбивается на конечные элементы и в пределах каждого элемента искомые переменные задаются в виде кубического сплайна. Все это позволяет получать согласованные конечные элементы – обеспечивается геометрическая неразрывность между элементами, а также непрерывность искомых величин и их первых производных по линии соприкосновения элементов.

Желоба 10 можно рассматривать как гофрированную оболочку (рис.8). Тогда ТВН (по рис. 4) участок покрытия можно представить в виде синтеза сферической и гофрированной оболочки; сечение в окружном направлении, в частности, имеет вид, представленной на рис.9а. Участка покрытия ТНВ (по рис. 4) можно представить в виде системы трех оболочек: сферическая + гофрированная + гофрированная. Окружное сечение такой системы представлено на рис. 9б.



Рис. 8 – Гофрированная оболочка

Fig. 8 – Corrugated shell

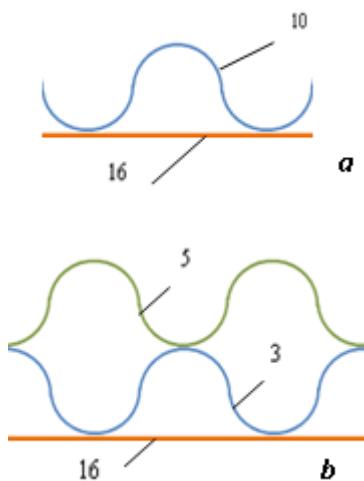


Рис. 9 – Сечение покрытия в окружном направлении: а – двухслойный участок, б – трехслойный участок

Fig. 9 – Cross-section of the coating in the circumferential direction: a – two-layer section, b – three-layer section

Вначале согласно подхода, изложенного в [21], решается задача параметризации каждой оболочки: для срединной поверхности каждой оболочки задается радиус-вектор  $\mathbf{r}$  как функцию от координат единичного квадрата  $t^1$  и  $t^2$

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t^1, t^2) \quad (1)$$

и далее определяются координатные векторы  $\mathbf{r}_i$ ,  $\mathbf{m}_i$ , компоненты первого  $a_{ij}$  и второго  $b_{ij}$  метрического тензора.

Единичный квадрат разбивается на конечные элементы (прямоугольники), в каждом из которых решение  $u$ ,  $v$ ,  $w$  – искомые неизвестные представляются в виде интерполяционного эрмитового кубического сплайна.

Разрешающие соотношения для каждой оболочки выводятся из вариационного уравнения Лагранжа:

$$\delta W - \delta A = 0, \quad (2)$$

$\delta W$  и  $\delta A$  – вариации потенциальной энергии деформации оболочки и работ внешних сил, соответственно.

Подставляя в (2) соответствующие величины для усилий, моментов и деформаций, выраженные через искомые неизвестные для каждой оболочки, решение задачи сводится к системе алгебраических уравнений:

$$[A_i] \{U_i\} = \{R_i\}, \quad (3)$$

где  $[A_i]$  – матрица жесткости системы ленточной структуры,  $\{R_i\}$  – вектор нагрузки,  $\{U_i\}$  – вектор неизвестных, состоящий из узловых перемещений и соответствующих первых и вторых производных по  $t^1$  и  $t^2$ .

Далее, стыкуя оболочки в соответствующих узлах радиального направления (по рис.9), получаем глобальную систему алгебраических уравнений для рассматриваемого варианта покрытия

$$\Sigma[A_i] \Sigma\{U_i\} = \Sigma\{R_i\}. \quad (4)$$

Из решения системы уравнений (4) получаем перемещения  $u$ ,  $v$ ,  $w$  и соответствующие повороты в узлах рассматриваемой сетки разбиения. Далее, по известным формулам вычисляются напряжения в рассматриваемых элементах оболочечной системы.

### О работе конструкции покрытия

Центральный элемент в сборе с дополнительной верхней оболочкой и шпангоутом усиления 13 служит основной опорой покрытия, являясь одновременно частью несущей поверхности. Растяжки 21 воспринимают часть нагрузки и разгружают центральный элемент.

Двухслойная оболочка в центральной части обеспечивает необходимую изгибную жесткость конструкции. Защитный усиливающий экран 16 изолирует силовую конструкцию покрытия от агрессивного воздействия внутренней среды отстойника. Помимо этого создается система каналов, обеспечивающих обдув поверхности оболочек. Образуемые в конструкции каналы «б» и «в» обеспечивают естественную продувку внутренних полостей металлических желобов. Тем самым снижается степень коррозионного износа.

### Заключение

Покрытие имеет архитектурно выразительную форму, образует минимальное функционально необходимое пространство и обеспечивает максимальную несущую способность при минимальном весе конструкции.

Покрытие состоит из простых элементов и узлов, которое упрощает технологию создания.

Геометрия покрытия позволяет максимально снизить объем накопления осадков. Форма покрытия упрощает также технологию отсоса газов из воздушного пространства бассейна. Наличие продувочных каналов обеспечивает естественную продувку внутренних полостей металлических обечайек, обеспечивая унос влажной среды от металлических поверхностей, а также охлаждение поверхности покрытия, снижая коррозионную активность окружающей среды как изнутри, так и снаружи.

Таким образом, в предложенном варианте покрытия удается увеличить долговечность и экологическую эффективность.

Работа выполнена за счет гранта Академии наук РТ, предоставленного молодым кандидатам наук (пост докторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-

исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Госпрограммы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

Материалы были представлены на Международной научно-практической конференции «Современные подходы и практические инициативы в инженерных науках», г. Казань, 2-3 октября 2025 г.

## Литература

1. Е.А. Курятников, А.М. Эль, Водоснабжение и санитарная техника, №8, 2014.
2. А.Н. Пахомов, С.А. Стрельцов и др., Водоснабжение и санитарная техника. 2011. №10. С. 68-72.
3. Н.М. Якупов, Н.И. Хисматуллин, Механики Нижнекамскнефтехима. Казань, 1996. 224 с.
4. П.Г. Еремеев, Современные стальные конструкции большепролетных покрытий уникальных зданий и сооружений. М.: АСВ, 2009. 336 с.
5. П.Г. Еремеев, Вестник НИЦ Строительство. 2020; 25(2):12-25.
6. Н.М. Якупов, Механика тонкостенных конструкций: история, диагностика, лечение. Казань: Изд-во КГАСУ, 2020. 159 с.
7. В.С. Семенов С-30 Современные пространственные конструкции: синтез искусства, техники и науки: Уч. пособие. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2010. 130 с.
8. Engel Heino. Load-bearing systems. M.: AST: Astrel, 2007. 344 p.
9. Sobek W. Light Works. Publishers for architecture and design. Ludwigsburg, Germany, 2008. 156.
10. 100 Wonders of Modern Architecture. M.: ZAO BMM, 2006. 240 p.
11. А.Э. Гутнов, Мир архитектуры: М.: Молодая гвардия, 1985. 351 с.
12. К.А Иванова, Е.Г Гоник, Вестник науки №5 (50) том 5. 2022. С.308-313.
13. Н.М. Якупов, Механика: проблема-идея-практика. КазГУ, 2010. 161 с.
14. Qinghua Han et al., Int. J. of Steel Structures 15(2): 261-269 (2015).
15. Thor L. Anderson, Acier. Mars 1974. V.39. No 3. Pp. 113-119.
16. В.И. Тур, Купольные конструкции: формообразование, расчет, конструирование: Уч. пос. М.: Изд-во ЛСВ. 2004. 96 с.
17. Е.В. Лебедь, А.Ю Алукаев, Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. 14(1). С.4-16.
18. Авт. свид. СССР №344085.
19. Авт. свид. СССР №815205.
20. Авт. свид. СССР №1011823.
21. Yakupov S.N., Kiyamov H.G., Yakupov, N.M. Mukhamedova I.Z. A new variant of the fem for evaluation the strength of structures of complex geometry with heterogeneous material structure // Case Studies in Construction Materials. Vol.19, 2023, e02360.

## References

1. E.A. Kuryatnikov, A.M. El, Water Supply and Sanitary Engineering, No. 8, 2014.
2. A.N. Pakhomov, S.A. Streletsov et al., Water Supply and Sanitary Engineering. 2011. No. 10. Pp. 68-72.
3. N.M. Yakupov, N.I. Khismatullin, Mechanics of Nizhnekamskneftekhim. Kazan, 1996. 224 pp.
4. P.G. Eremenko, Modern Steel Structures of Long-Span Roofs of Unique Buildings and Structures. Moscow: ASV, 2009. 336 pp.
5. P.G. Eremenko, Bulletin of the Research Center for Construction. 2020; 25(2):12-25.
6. N.M. Yakupov, Mechanics of Thin-Walled Structures: History, Diagnosis, Treatment. Kazan: KSUA Publishing House, 2020. 159 p.
7. V.S. Semenov S-30 Modern spatial structures: a synthesis of art, technology, and science: Textbook. Bishkek: KSUA Publishing House, 2010. 130 p.
8. Engel Heino. Load-bearing systems. Moscow: AST: Astrel, 2007. 344 p.
9. Sobek W. Light Works. Publishers for architecture and design. Ludwigsburg, Germany, 2008. 156.
10. 100 Wonders of Modern Architecture. Moscow: ZAO BMM, 2006. 240 p.
11. A.E. Gutnov, The World of Architecture: Moscow: Molodaya Gvardiya, 1985. 351 p.
12. K.A. Ivanova, E.G. Gonik, Bulletin of Science No. 5 (50) Volume 5. 2022. P. 308-313.
13. N.M. Yakupov, Mechanics: Problem-Idea-Practice. KazGU, 2010. 161 p.
14. Qinghua Han et al., Int. J. of Steel Structures 15(2): 261-269 (2015).
15. Thor L. Anderson, Acier. Mars 1974. V.39. No 3. Pp. 113-119.
16. V.I. Tur, Dome Structures: Forming, Calculation, Design: Textbook. Moscow: LSV Publishing House. 2004. 96 pp.
17. E.V. Lebed, A.Yu. Alukaev, Structural Mechanics of Engineering Structures and Buildings. 2018. 14(1), 4-16.
18. Author's certificate USSR No. 344085.
19. Author's certificate USSR No. 815205.
20. Author's certificate USSR No. 1011823.
21. Yakupov S.N., Kiyamov H.G., Yakupov, N.M. Mukhamedova I.Z. A new variant of the FEM for evaluating the strength of structures of complex geometry with heterogeneous material structure // Case Studies in Construction Materials. Vol.19, 2023, e02360.

© С. Н. Якупов – к.т.н., старший научный сотрудник, Институт механики и машиностроения (ИММ) ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия; И. Т. Мирсаяпов – д.т.н., доцент, заведующий кафедрой, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань, Россия; Н. М. Якупов – д.т.н., профессор, чл.-корр. Российской инженерной академии, ведущий научный сотрудник ИММ ФИЦ КазНЦ РАН, yzsrr@mail.ru.

© S. N. Yakupov – PhD (Technical Sci.), Senior Researcher, Institute of Mechanics and Mechanical Engineering (IMME), Federal Research Center (FRC) Kazan Scientific Center (KazSC) of Russian Academy of Sciences (RAS), Kazan, Russia; I. T. Mirsayapov – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Associate Professor, Head of Department, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russia; N. M. Yakupov – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Corresponding Member of the Russian Engineering Academy, Leading Researcher, IMME, FRC KazSC RAS, yzsrr@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 07.11.25.  
Дата принятия рукописи в печать – 05.12.25