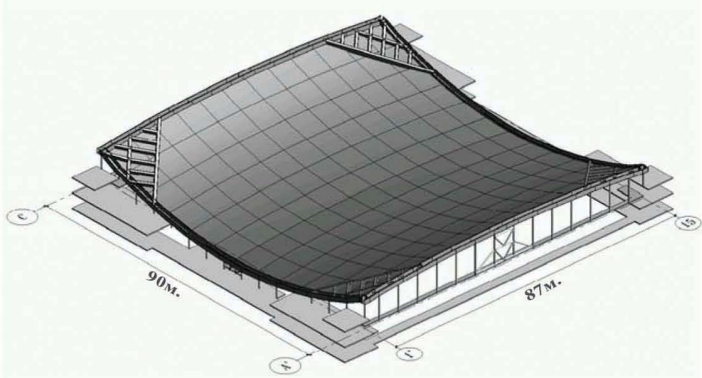


РЕАЛИЗОВАННЫЕ МЕМБРАННЫЕ ОБОЛОЧКИ РАСЧЁТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ВОЗВЕДЕНИЕ



Н.В. Канчели, П.А. Батов, Д.Ю. Дробот

РЕАЛИЗОВАННЫЕ МЕМБРАННЫЕ ОБОЛОЧКИ

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ
И ВОЗВЕДЕНИЕ



Издательство Ассоциации строительных вузов
Москва 2009

ББК 38.761.1.

УДК 628.1

П79

Рецензенты:

главный научный сотрудник ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, доктор технических наук, профессор, Заслуженный строитель РФ, Лауреат Государственной премии СССР *П.Г. Еремеев*; доктор технических наук, профессор *В.А. Савельев*.

Канчели Н.В., Батов П.А., Дробот Д.Ю.

Реализованные мембранные оболочки. Расчет, проектирование и возведение. Учебное пособие. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009 – 120 с.

ISBN 978-5-93093-659-9

Книга содержит информацию о двух построенных мембранных покрытиях:

– покрытие 200x110 м – для конькобежного дворца спорта в г. Коломне Московской области;

– покрытие 90x87 м – для зимнего дворца спорта в г. Ангарске Иркутской области.

На примере данных покрытий последовательно излагаются вопросы, встающие перед любым инженером, проектирующим конструкции большепролетного покрытия. Это такие вопросы, как: выбор оптимальной формы, предварительный ручной расчет, уточнение конструктивных решений по результатам этого расчета (назначение размеров, габаритов сечений, элементов и т.п.), определение порядка возведения конструкции.

ISBN 978-5-93093-659-9

© Издательство АСВ, 2009

© Канчели Н.В., Батов П.А.,

Дробот Д.Ю., 2009

Содержание

Предисловие	4
Введение	5
Раздел А. Покрытие главного зала конькобежного стадиона в г. Коломна	
Глава 1. Выбор оптимального покрытия и его приближенный расчёт. . . .	9
Глава 2. Конструктивное решение. Порядок монтажа	13
Глава 3. Компьютерный расчёт конструкции	14
§1. Предварительные исследования	14
§2. Расчёт с учётом последовательности монтажа	15
§3. Расчёт на неравномерно-распределенные снеговые загрузки	26
§4. Расчёт на предельную нагрузку	35
Глава 4. Испытания крупноразмерной модели	41
Глава 5. Схемы и чертежи возведенной конструкции	43
Глава 6. Фотографии возведенной конструкции	49
Раздел Б. Покрытие главного зала хоккейного стадиона в г. Ангарск	
Глава 1. Выбор оптимального покрытия и его приближенный расчет . . .	57
Глава 2. Конструктивное решение. Порядок монтажа конструкции	61
Глава 3. Компьютерный расчёт конструкции	64
§1. Расчёт с учётом последовательности монтажа	64
§2. Расчёт на неравномерно-распределенные снеговые загрузки	73
§3. Расчет на сейсмическое воздействие	73
§4. К оценке живучести мембранных покрытий	78
Глава 4. Схемы и чертежи возведенной конструкции	89
Глава 5. Фотографии возведенной конструкции	97
Вместо заключения	105
Литература	107
Приложение. Примеры реализованных объектов, выполненных специалистами отдела строительных конструкций ЗАО «Курортпроект» и ООО «Арkont»	108

ПРЕДИСЛОВИЕ

После длительного перерыва в России вновь начали строиться здания, способные встать на один уровень с лучшими достижениями инженерной и архитектурной мысли советского периода. На фоне бурного жилищного строительства, в большинстве своем использующего достаточно традиционные решения, в настоящее время сложились условия, позволившие увеличить объем строительства уникальных большепролетных зданий и сооружений. Одна из главных задач при проектировании любого сооружения – это выбор рациональной системы, формы несущих конструкций. При выборе той или иной конструктивной схемы большепролётного покрытия инженеру, занимающемуся проектированием, необходимо владеть информацией о возможных конструктивных схемах, знать их преимущества и недостатки, особенности расчёта и конструирования.

В предлагаемой книге авторы попытались на конкретных реализованных объектах показать особенности расчета, конструирования, технологии возведения и достоинства мембранных оболочек.

Книга состоит из двух основных разделов. Первый раздел посвящён покрытию конькобежного стадиона в г. Коломна, второй – хоккейному стадиону в г. Ангарск. Оба раздела написаны по одинаковой схеме, по которой, как правило, ведется проектирование конструкций любого большепролётного покрытия: на начальном этапе выбор оптимальной формы, предварительный приближенный ручной расчёт, на следующем этапе уточнение конструктивных решений по результатам этого расчёта (назначение сечений элементов и т.п.), далее, определение порядка возведения конструкции, компьютерный расчет при необходимости с учётом физической и геометрической нелинейности, а также с накоплением усилий в элементах конструкции на всех этапах монтажа; затем, аналогичные компьютерные расчёты на неравномернораспределенные снеговые загрузки и, наконец, расчёты, выявляющие наличие запасов конструкции при нагружении её повышенными нагрузками, расчеты на ветровой обдув. Каждый раздел снабжён схемами принципиальных конструктивных решений, а также фотографиями с натуры. Приведенные конструктивные решения следует рассматривать как решения, которые могут неоднократно дорабатываться и оптимизироваться при строительстве будущих сооружений.

Настоящую книгу необходимо рассматривать как продолжение и развитие материалов посвящённых мембранным оболочкам в книге Н.В. Канчели «Строительные пространственные конструкции». В связи с этим в некоторых главах есть повторения и ссылки. Книга рассчитана на широкий круг специалистов в области строительства большепролетных сооружений, в том числе студентов, аспирантов и инженеров.

Авторы считают своим долгом поблагодарить всех сотрудников отдела строительных конструкций ЗАО «Курортпроект», без кропотливой и ответственной работы которых была бы не возможна разработка проектов сооружений, отображенных в книге. Авторы признательны И.Ф. Ведяшину, принявшему участие не только в проектировании объектов, но и в оформлении материалов для данной книги.

Особая благодарность рецензентам: П.Г. Еремееву и В.А. Савельеву за их ценные советы, замечания и комментарии.

ВВЕДЕНИЕ

Любое творение человеческих рук, кроме, пожалуй, чистого искусства (музыки, живописи и т.д.), может быть оценено по трем основным характеристикам: степени удовлетворения функциональному назначению изделия или сооружения, его стоимости и красоте. Степень удовлетворения функции и стоимость достаточно понятны (удобные и дешевые предметы). Красота же объекта, как известно, есть субъективное ощущение человека, воспринимающего гармонию окружающего мира, которая в свою очередь отражает законы объективного материального мира. Эстетика сооружения складывается из гармонии пропорций и цветового решения, а также из воспринимаемой логичности конструктивного решения. У сооружений типа телебашен, мостов, залов с большепролетными покрытиями и т. д. основную лепту в эстетику вносит конструктивная логика. Логичная конструкция практически всегда красива и экономична. Такая связь красоты и экономичности – важнейшее свойство конструкций.

Сооружение становится настоящим произведением строительного искусства, когда в нем гармонично все: функция, пропорции, цвет и логичная конструктивная форма.

Процесс проектирования конструкций можно разбить на несколько последовательных составляющих: творческий замысел, расчет конструкции, ее конструирование. Первая компонента зависит от таланта, профессионального мастерства и эрудиции автора; вторая – от уровня развития теории расчета сооружений и уровня теоретической подготовки автора; третья – от возможностей строительной индустрии. Все компоненты проектирования строительных конструкций плавно развивались вплоть до 70-х годов 20-го века – начала эры широкой компьютеризации. Талантливые и эрудированные инженеры существовали всегда, а общий уровень строительной науки и производства неуклонно совершенствуется.

До внедрения ЭВМ расчеты необходимо было выполнять, решая уравнения строительной механики и теории упругости. Эти уравнения решались в замкнутом виде или приближенными методами только для самых простых систем: стержневых конструкций, простых плитных систем, оболочек простой формы (поверхности второго порядка, оболочки вращения) и т.д. Системы сложной формы с геометрически и физически нелинейной работой, с участками нарушения принципов безмоментности рассчитывались лишь приближенно.

Многие конструкции появились благодаря совершенствованию строительной индустрии. С начала 70-х годов в процесс проектирования стремительно ворвался компьютер, который не только стал помогать выполнять расчеты сооружения, но и открыл новые возможности для творческих фантазий автора. Современные программные комплексы позволяют рассчитать конструкцию самой произвольной формы. С помощью «мощных» вычислительных комплексов стало возможным формировать оптимальные поверхности оболочек над сооружениями любых планов, моделировать с высокой степенью точности процесс жизненного цикла конструкции, начиная с первых этапов строительства и заканчивая анализом реакции сооружения на возможные повреждения в ходе его эксплуатации; стало возможным рассчитывать предельную несущую способность конструкции, доводя ее до виртуального разрушения. Такой прогресс в области ЭВМ позволил существенно повысить надежность конструкций и тем самым частично отказаться от проведения модельных и натуральных испытаний. Таким образом, была открыта дорога для создания и анализа огромного разнообразия новых конструктивных систем.

Перспективы развития конструктивных систем в настоящее время связаны в основном с сокращением разрыва между современными возможностями компьютера и способностью конструктора их использовать**. Современному конструктору нет необходимости обладать умением точного ручного расчета конструкций, но он должен знать основные законы механики деформируемой среды, чувствовать «игру» сил в сооружении при действии статических и динамических нагрузок, знать принципы работы разнообразных конструктивных систем и уметь оценить результаты расчета. Не зная принципы работы различных видов пространственных систем, инженер-конструктор не сможет применить их в нужный момент.

Особый интерес среди всего многообразия строительных конструкций у человечества всегда вызывали большепролетные покрытия. Общее свойство большепролетных зданий заключается в их уникальности, и, как следствие, в высокой степени ответственности и безопасности, предъявляемой к ним. Специфичны и требования к интерьеру таких зданий, обеспечивающему комфорт, а также рациональность и безопасность эксплуатации. Разнообразие функционального назначения большепролетных зданий обусловило применение в их несущих каркасах практически всех видов конструктивных систем: балочных, рамных, арочных, преднапряженных, комбинированных и пр. Из множества большепролетных оболочечных систем можно выделить подкласс мембранных оболочек, которые принадлежат к числу новейших конструктивных систем. Рациональность таких систем определяется оптимальным использованием конструктивных свойств, применяемых строительных материалов: металлическая мембрана работает на растяжение в 2-х направлениях, а опорный контур, который может быть выполнен из железобетона, работает на сжатие и в незначительно меньшей степени на изгиб в 2-х направлениях.

Впервые мембранные оболочки были предложены гениальным русским инженером В.Г. Шуховым в начале 20 века. Достаточно длительное время, прошедшее о появления мембранных оболочек до начала их активного внедрения (около 60 лет), а также медленное распространение их в последующие годы связано со сложностью расчета, обусловленной нелинейностью их работы. Начиная со второй половины 50-х годов, происходит бурное развитие в теории формообразования и математического моделирования поверхностей мембранных конструкций. На рубеже 60-70-х годов мембранные конструкции уже покрывали огромные пространства, составляющие порой десятки тысяч квадратных метров. Однако, до настоящего времени можно назвать относительно небольшое количество мембранных оболочек, возведенных во всем мире. Наиболее известные среди них в зарубежной практике: спортивный зал в Вене (Австрия, 1970 г.), Крытый стадион в Мюнхене (ФРГ, 1972 г.), Универсальный спортивный зал в Курксхафене (ФРГ, 1975 г.) в отечественной практике – Плавательный бассейн в Харькове (1976 г.), Спортивно-концертный комплекс в Санкт-Петербурге (1978 г.), Крытый стадион «Олимпийский» в Москве (1980 г.), Велотрек «Крылатский» в Москве (1980 г.), Дворец спорта «Измайлово» в Москве (1980 г.).

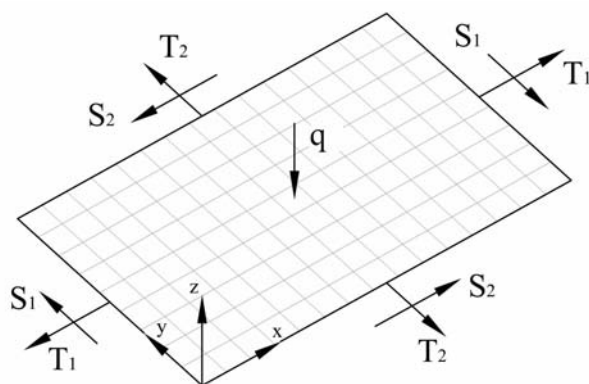
Настоящие перспективы для широкого распространения мембран открылись лишь с появлением персональных компьютеров и совершенствованием расчетных программных средств с 80-х годов прошлого века.

В сравнении с другими видами большепролетных конструкций мембранные покрытия, состоящие из тонкого металлического листа, закрепленного на контуре, явля-

** Однако приближенный расчетный анализ конструкций является крайне необходимым при разработке проекта.

ются одним из самых эффективных типов пространственных конструкций. При перекрытии больших пролетов (~300 м) толщина металлической мембраны по условию прочности, как правило, не превышает 1–5 мм, что обуславливает высокую экономичность покрытия. По соображениям коррозионной стойкости мембраны из листовой стали обычно выполняют толщиной не менее 3–4 мм. В случае применения листов из алюминиевых сплавов толщину мембранной оболочки назначают только по условию прочности, поскольку алюминиевые конструкции практически не подвергаются коррозии. В тонколистовых оболочках наиболее полно используется несущая способность материала. Мембрана работает в основном на растяжение в двух направлениях, без опасности потери устойчивости (см. рис. 1). Цепные усилия с пролетной конструкции воспринимаются замкнутым опорным контуром, работающим совместно с мембраной, которая, в большинстве случаев, обеспечивает его устойчивость. В этих системах в одном элементе (мембране) совмещаются одновременно несущие и ограждающие функции. Все это обеспечивает минимальный расход материалов на мембранные покрытия по сравнению не только с плоскостными, но и с известными пространственными системами. Существенное облегчение собственного веса мембранных покрытий, относительная простота их монтажа, применение большеразмерных рулонных полотнищ заводского изготовления предопределяют снижение трудоемкости и стоимости их возведения, сокращение сроков строительства.

Рис. 1. Схема усилий, действующих в элементе мембраны



Присоединенная к бортовому элементу по всей длине мембрана представляет собой для него упругое основание, так как растягивающие мембрану усилия, параллельные бортовому элементу, препятствуют его выгибу и сопротивление последнего возрастает с увеличением нагрузок на покрытие. Совместная работа бортового элемента и мембраны существенно увеличивает его критическую силу потери устойчивости в плоскости мембраны.

Основной принципиальной особенностью мембранных оболочек является нулевая изгибная жесткость поверхности оболочки, а, следовательно, невозможность ее «работы» на сжатие и изгиб. Но при этом в зоне примыкания мембраны к опорному контуру возникает 2 типа краевых эффектов: по мембранной группе усилий, по изгибной группе.

Первый тип связан со скачкообразным изменением усилий в месте примыкания сжатого контура к не способной «работать» на сжатие мембране, что вызывает в ней образование ортогональных к контуру складок.

Второй тип связан с локальным перегибом мембраны при примыкании к жесткому по повороту сечения контуру относительно его продольной оси. Проблемы обоих типов

краевых эффектов конструктивно решаются введением в поле оболочки усиления – «фартука» и поддерживающих его ребер. «Фартук» плавно меняет изгибную жесткость мембраны от «нуля» до некоторого максимума в месте примыкания к опорному контуру.

Другой важный вопрос для гибких оболочек – кинематическая жесткость при неравномерных нагрузках: снеговых, ветровых и сейсмических воздействиях и т.д. Необходимая кинематическая жесткость таких оболочек должна обеспечиваться сдвиговой жесткостью мембранного листа в своей плоскости с передачей сдвигового усилия на опорный контур. Стабилизация покрытия может достигаться различными способами: пригрузением покрытия, совместной работой полотна мембраны и элементов, придающих ей изгибную жесткость, или предварительным натяжением оболочки. Примером стабилизации за счет пригрузки слоем бетона может служить мембрана, примененная И.Г. Людковским при реконструкции покрытия одного из цехов в Москве. Примером второго способа – Крытый стадион «Олимпийский» в Москве. Следует отметить, что деформативность мембранных покрытий сильно зависит от формы их поверхности.

Поверхности мембранных оболочек могут быть 3-х основных типов:

- положительной гауссовой кривизны (перевернутые купола на круглом, эллиптическом или полигональном планах),
- нулевой гауссовой кривизны (перевернутые цилиндры на круглых, эллиптических и полигональных планах),
- отрицательной гауссовой кривизны (седлообразная форма на круглых, эллиптических и полигональных планах).

Покрытия с поверхностью нулевой гауссовой кривизны наиболее просты в изготовлении и монтаже. Но в таких оболочках поперечная нагрузка воспринимается работой покрытия в основном в одном провисающем направлении, поэтому прочностные свойства материала пролетной конструкции используются не полностью. Однако, их главный недостаток в том, что эти оболочки оказываются более деформативными, чем оболочки с другой формой поверхности. Фактор перекоса для покрытий с поверхностью нулевой и положительной гауссовой кривизны весьма реален, т. к. собственный вес покрытия (около 40 кг/м²), стремящийся сохранить начальную форму, в несколько раз меньше временной несимметричной нагрузки (100–400 кг/м²). Единственная самонапрягаемая оболочка имеет поверхность отрицательной гауссовой кривизны. Такое свойство седлообразных оболочек позволяет резко повысить их кинематическую жесткость за счет самонапряжения без увеличения веса и, соответственно, расхода материала.

Раздел А. ПОКРЫТИЕ ГЛАВНОГО ЗАЛА КОНЬКОБЕЖНОГО СТАДИОНА В г. КОЛОМНА

Конструкторский коллектив: Н.В. Канчели, М.М. Митюков, А.В. Тимофеевич,
Е.Н. Владимиров

Глава 1. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ И ЕГО ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ

Крупные спортивные сооружения занимают ведущее место среди наиболее сложных с конструктивной точки зрения зданий. Закрытые многофункциональные арены, футбольные стадионы, бассейны, катки жестко завязаны на геометрические параметры площадки или пространства, необходимого для конкретного вида спорта. Эти стандарты едины для всего мира. В этих условиях большепролетные конструкции (структурные оболочки, вантовые системы, фермы, перекрывающие пролеты в 100 м и более) – объективная необходимость. Сложность поставленной задачи стимулирует проектировщиков на создание сооружений столь же выразительных по объемно-пространственному решению, как и здания, изначально более свободные в формообразовании, – театры, музеи и выставочные залы.

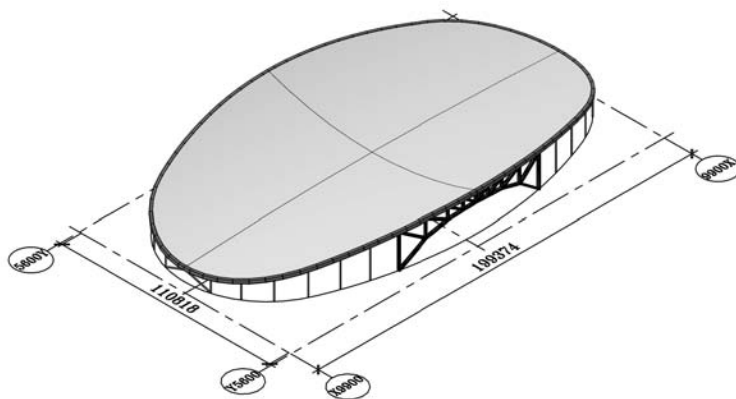


Рис. А.1.1. Аксонометрическая схема оболочки

С помощью большепролетных конструкций можно решать не только функциональные, но и эстетические задачи. Причем в зависимости от расположения стадиона они способны сделать его акцентом, доминирующим в окружающей застройке, либо максимально деликатно вписать в ландшафт. Прекрасными примерами первого варианта спортивных сооружений могут служить построенные недавно стадион «Локомотив» и Ледовый дворец в Крылатском. Сложнейшие внешние конструкции, поддерживающие покрытие, превращают стадионы в футуристические фантазии. Для того, чтобы реализовать придуманные архитекторами идеи, потребовалось все мастерство конструкторов и строителей.

Совсем другую роль выполняют уникальные большепролетные конструкции в Центре конькобежного спорта в подмосковном городе Коломне. Огромный спортивный комплекс, предназначенный для проведения соревнований международного уровня, предполагалось возвести на месте старого спортивного центра буквально в несколь-

ких сотнях метров от стен и башен Коломенского кремля, в границах охранной зоны. Агрессивное по архитектуре современное здание было бы неуместно в данном контексте, единственным приемлемым вариантом стало строительство здания-«невидимки». Требовалось «обернуть» в несущие и ограждающие конструкции главный зал с конькобежной дорожкой и трибунами, и при этом добиться красивой, выразительной формы.

О выработке концепции. Формулирование концепции здания и решение контекстуальных задач не были приоритетными на первом этапе работы над проектом. Правительство Московской области объявило тендер на проект будущего центра, пригласив к участию в нем конструкторов. Такой подход не случаен: без решения проблемы перекрытия огромного зала было бессмысленно обсуждать этот проект. Конкурсные предложения принимались скорее по экономическим, чем по эстетическим критериям. Прекрасно понимая важность этого аспекта, команда конструкторов ЗАО «Курортпроект» под руководством Н.В. Канчели представила на рассмотрение жюри не один вариант, а четыре, сравнив их по основным технико-экономическим показателям. По всем пунктам лидировала мембранная оболочка – элегантное седлообразное покрытие, словно обволакивающее пространство над катком (см. таблицу 1).

Эллипсоидная форма главного объема и пластичное покрытие оказывались наиболее экономичным вариантом по расходу стали и по сокращению отапливаемого объема здания, что напрямую связано с сокращением эксплуатационных затрат. Конечно, аналогичные конструкции последний раз строились в России десятки лет назад, но очевидные преимущества мембранного покрытия склонили чашу весов в пользу этого варианта, в котором с самого начала были найдены ответы на основные вопросы.

Можно сказать, что в поисках функциональной целесообразности в нем было определено единственно верное решение, отвечающее одновременно как конструктивным требованиям к будущему зданию и экономическим расчетам, так и эстетическим задачам, которые в дальнейшем были развиты командой архитекторов, присоединившихся к работе над проектом.

Заказчиком проекта выступила организация ГУП ПИ «Мособлстройпроект». Генеральным проектировщиком комплекса был выбран проектный институт ЗАО «Курортпроект». Научное сопровождение осуществляли специалисты ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Генеральным подрядчиком объекта стала корпорация «Трансстрой», производителем монтажных работ и разработчиком ППР – 1 МСМУ АО «Стальмонтаж». Спортивный комплекс разместился на прибрежной террасе у впадения реки Коломенка в реку Москва в непосредственной близости от коломенского Кремля. Все помещения здания, кроме центрального зала, расположены в стилобатной части, образующей искусственную береговую террасу реки Коломенка. Объем центрального зала врезан на 6 м в эту террасу и представляет собой эллипс. Зал перекрыт стальной мембраной. Применение всяческого покрытия на овальном плане позволило создать сооружение минимального объема при обеспечении соответствующих требований внутренней планировки, спортивной технологии, размещения трибун и зон видимости.

При разработке проекта авторы взяли за основу следующий тезис: «Форма большепролётного покрытия должна наиболее полно отвечать функции сооружения, которое оно перекрывает». При этом форма покрытия спортивного сооружения определяется 4-мя главными параметрами: вместимостью трибун, требуемой высотой помещения в зоне водостоков, в зоне центра сооружения и высотой в середине длинной стороны.

В соответствии с архитектурным заданием конькобежный стадион должен иметь вытянутую беговую дорожку с размерами 178x68 м и трибуны, расположенные вдоль

Учебное издание

Нодар Вахтангович Канчели
Павел Александрович Батов
Дмитрий Юрьевич Дробот

РЕАЛИЗОВАННЫЕ МЕМБРАННЫЕ ОБОЛОЧКИ

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ВОЗВЕДЕНИЕ

Редактор: *В.П. Бурмакин*
Верстальщик: *Е.М. Лютова*
Компьютерный дизайн обложки: *Н.С. Романова*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98.
Подписано к печати 17.03.09. Формат 70х100 1/16
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. 7,5 п.л. Тираж 500 экз. Заказ №

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)
129337 Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации – оф. 511
тел., факс: (499) 183-56-83, e-mail: iasv@mgsu.ru, <http://www.iasv.ru>