

Пушкин Б. А.

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КАРКАСЫ «КК»



**Нюрнберг
2023**

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

РАЗДЕЛ I Мой опыт разработки, возведения и исследования структурных покрытий

- 1.1 Разработка и натурные испытания экспериментального блока покрытия размером в плане 24x12 м
- 1.2 Склад – пристройка в г. Видное
- 1.3 Магазин «Миллион мелочей» в г. Москва (Бибирево, 1-я очередь)
- 1.4 Покрытие трибун стадиона «Машук» в г. Пятигорск
- 1.5 Покрытие склада фирмы «Актис» в г. Новочеркасск
- 1.6 Покрытие внутреннего двора ТРЦ «Горизонт» в г. Ростов-на-Дону
- 1.7 Покрытие дельфинария в Лазаревском районе г. Сочи
- 1.8 НИР Усиление покрытия на ТРЦ «Горизонт» в г. Ростове-на-Дону

РАЗДЕЛ II Конструкция, технология изготовления и сборки типовых элементов каркаса

- 2.1 Общие положения
- 2.2 Типовой узловой элемент (коннектор)
- 2.3 Типовые стержневые элементы
- 2.4 Решение некоторых задач, для соединительных механизмов отвечающим требованиям, сформулированным ниже
- 2.5 Ручной инструмент для механизированной сборки-разборки каркасов

РАЗДЕЛ III Конструкция, технология изготовления и сборки нетиповых элементов

- 3.1 Общие положения
- 3.2 Опорные узлы и опорные узловые элементы
- 3.3 Стержневые «изгибаемые» элементы и их стыки с коннекторами
- 3.4 Конструкции и технологии выполнения шпренгелей и затяжек

РАЗДЕЛ IV Расчет структурных «КК»-каркасов и элементы их оптимизации

- 4.1 Постановка задачи по разработке программы N 2015
- 4.2 Процесс расчета структурного блока по программе N 2015
- 4.3 Работа сжатого стержня в структурном каркасе «КК»
- 4.4 Приёмы оптимизации структурных каркасов в ходе их расчета по программе N 2015.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ИСТОЧНИКИ

ВВЕДЕНИЕ

Недавно мне исполнилось 80 лет, и я задумался о том, чем занимался всю свою сознательную жизнь. Оказалось, что все эти годы были заполнены изучением и улучшением средств использования в массовом отечественном строительстве пространственных каркасов типа «MERO-KK». Эти каркасы собирают на стройплощадке из отдельных стержневых и узловых элементов (стержней и коннекторов) [1].

В 1959 году известный испанский специалист в области тонкостенных оболочек Эдуардо Торроха основал IASS (МАСС). Эта международная ассоциация и её основатель поставили своей целью достижение прогресса путем обмена идеями между всеми, кто интересуется облегченными пространственными системами, независимо от их специализации (архитекторы, конструкторы), политических взглядов, национальности и места проживания на земле. Вначале предметом рассмотрения IASS были железобетонные оболочки покрытий, но в дальнейшем в область объектов рассмотрения были включены и другие конструкции. Итоги полувековой деятельности IASS подведены в юбилейном издании «Fifty Years of Progress for Shell and Spatial Structures» [14]. В начале этой книги кратко рассмотрены итоги деятельности Эдуардо Торрохи до 1960 г., а затем, итоги деятельности IASS по каждому из десятилетий с 1960 по 2009 год (главы 1 - 6).

Основное содержание книги включает главы 7 - 12 с описанием основных объектов и результатов исследований и строительства IASS. В главе 13 предложен взгляд в будущее облегченных пространственных конструкций, как его себе представляет Джон Ф. Абель (John F. Abel), – один из редакторов книги [14]. К числу пространственных конструкций в этой книге относится широкий класс конструкций, включая: тонкостенные железобетонные и стальные «Металлические пространственные конструкции», оболочки, мосты, мачты, башни и т. д. и т. п. Содержание моей книги имеет прямое отношение только к главе 9.1 этой книги.

Исследования, проведенные японскими учёными на многих десятках объектов, подтвердили, что пространственные металлические конструкции воспринимают сейсмические воздействия гораздо лучше традиционных. Есть основания использовать их в качестве убежищ при сейсмических ударах, но для этого должны быть улучшены нормы их проектирования. В частности, необходимо проектировать структуры методами CAD-CAM, с различного рода поглотителями энергии, снабжать конструкции виброаппаратурой. В книге отмечена роль советских и российских учёных роль в работе IASS. Их краткие жизнеописания приведены в книге [14] на стр. 71, 84, 85.

В книге отмечена роль советских и российских учёных роль в работе IASS. Их краткие жизнеописания приведены в книге [14] на стр. 71, 84, 85.

С 1966 года, с образованием Суррейского университета, состояние и перспективы развития подобных строительных систем наиболее полно отражены в материалах конференций «SPACE STRUCTURES», регулярно проводимых этим университетом. Изучая материалы конференций, можно заключить, что в сегодняшней мировой практике для построения пространственно-стержневых каркасов в качестве основной принята строительная система «KK». Впервые они введёны и использованы, как таковые, в системе «MERO-KK» Максом Менджерингхаузенем (патент от 12.03.1943; «KK» – Kugel Knoten – шаровидные узлы). Широко известные системы каркасов покрытия, разработанные и исследованные в последующие десятилетия (японские «NS», «KT» и немецкая «ZÜBLIN» и т.п.), относятся к системам «KK» [1, 2].

В настоящее время Суррейский университет и IASS готовятся совместно провести в августе 2021 седьмую конференцию «SPACE STRUCTURES -7».

Как ни странно, начало развития пространственно стержневых систем в СССР (под именем «структуры») тесно связано с появлением в нашей стране американских перебежчиков Староса и Берга [3]. Эти ребята смогли убедить Н. С. Хрущёва в необходимости развивать микроэлектронику.

В 1965 г. на базе ГКРЭ было образовано Министерство Электронной Промышленности СССР (МЭП), которое возглавил А. И. Шокин [4]. МЭП имело в своем составе специализированный (отраслевой) проектный институт МГСПИ, в котором заместителем директора по научной работе был И. Г. Гохарь-Хармандарян - известный архитектор и специалист по модульному проектированию промзданий [5]. С

подачи И. Г. Гохар -Хармандаряна модульный принцип был положен в основу формирования предприятий радиоэлектронной промышленности.

В МГСПИ был создан специальный отдел, который занимался только «структурами». Здесь в то время работали такие специалисты, как Б. И. Кормилицын, В. М. Ермаков, А. Г. Поуков, Г.М. Хорин и другие. Как архитектор И. Г., тесно сотрудничал с Московским Архитектурным Институтом (МАрхИ), где в то время проректором по науке был А.Н. Попов, а его сын А.А. Попов заведовал кафедрой инженерных конструкций. Поповы были хорошо знакомы с зарубежным опытом применения структур, в т.ч. «MERO-KK», и В. К. Файбишенко после окончания в 1962-ом году МИИТ поступает в аспирантуру к А. А. Попову. Тогда я и познакомился с В. К. Файбишенко, который со временем стал заведующим кафедрой инженерных конструкций МАрхИ и крупнейшим в СССР специалистом по «структурным» конструкциям. На основе модульного принципа МГСПИ в сотрудничестве с МАрхИ разрабатывают одноэтажные модули с применением «структурных» конструкций для электронной промышленности. В 1967-ом В.К. Файбишенко защищает кандидатскую диссертацию «Исследование перекрестно-ребристых систем квадратных в плане при различных вариантах опирания» [7].

В 1968-ом году А.И. Шокин создает на базе бывших механических мастерских ГКРЭ Фрязинский экспериментальный завод (ФЭЗ), а в 69-ом году в результате совместной работы МГСПИ, МАрхИ и ФЭЗ был произведен первый советский структурный «модуль» типа «MERO-KK». Этот модуль прошел успешные испытания расчетной нагрузкой в г. Кисловодск, а в 70-ом такой же модуль был использован в покрытии здания на заводе «Микрокомпонент» в Учкекене, хотя технология сборки и монтажа таких покрытий была еще недостаточно освоена [6 - стр. 54].

Казалось, что успешная работа МЭП и МАрхИ сплотит участников, но не тут-то было. Начались дразги, связанные с дележом полученного результата, и в итоге МАрхИ отпадает от сложившейся коалиции, целиком присвоив себе разработку под именем «МАрхИ». После гибели А. А. Попова в авиакатастрофе В.К.Файбишенко «приватизирует» результаты совместной работы, «позабыв», что «МАрхИ» отличают от «MERO-KK» только отдельные упрощения в конструкции и технологии, которые внесены, в основном, ФЭЗ.

Особенность первого структурного покрытия типа «КК», возведенного в Учкекене, состоит в том, что соединения переходных наконечников и трубчатых корпусов стержней выполнены без сварки. На цилиндрической поверхности каждой переходной детали проточены две кольцевые канавки, заполняемые материалом трубы при обкатке ее роликами. Такое конструктивно-технологическое решение соединения трубы с переходным наконечником было по-настоящему новым и могло бы стать серьезным признаком, отличающим систему «МАрхИ» от «MERO-KK», но оно вызвало слишком много вопросов. В первую очередь под сомнение была поставлена малоцикловая усталость такого соединения. МГСПИ заключает договор на выполнение соответствующих исследований не с МАрхИ, а с РГУ, где с 68-го года я работал по этой тематике на кафедре теории упругости. В течение 1971-72 г. я провёл эксперименты на натурных образцах, которыми установлена не только недостаточная малоцикловая, но также и статическая прочность такого соединения в исполнении ФЭЗ. В результате в системе «МАрхИ» принято сварное соединение трубы с переходным наконечником, что устранило единственное существенное отличие в первоначальном её варианте от «MERO-KK». Таким образом, первая попытка применить к решению поставленной задачи методов ОМД (обработка металлов давлением) оказалась неудачной.

Важную роль в развитии лёгких строительных металлических конструкций (в т.ч. «структурных») в нашей стране сыграло постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР №381 от 29 мая 1972 г. «Об организации производства и комплектной поставки легких металлических конструкций промышленных зданий» [8]. Постановлением намечена обширная комплексная программа по созданию процесса проектирования, специализированного заводского изготовления поставки и монтажа легких металлических несущих и ограждающих конструкций промышленных зданий. В частности, по постановлению №381 Минмонтажспецстроем организован ряд производств общей производительностью 8 млн. м² в год, выпускающих структурные конструкции по схеме опирания, предложенной В. К. Файбишенко (в Киреевске, Выксе, Ташкенте и в других местах). Организован институт ЦНИИПроектлегконструкция (ЦНИИЛМК), который, назначен головным в области проектирования и исследования легких металлических конструкций. Вскоре ЦНИИЛМК разрабатывает типовые структурные покрытия комплектной поставки «Кисловодск». Учитывая, что стоимость металла составляла тогда около 70% общей стоимости конструкций, при их разработке особое внимание обращалось на металлоемкость [12].

Отечественные исследования (в т. ч. мои) ориентированы на объекты массового строительства: промышленные здания, склады, терминалы, сетевые магазины и т. п., где решающую роль играет цена 1м² перекрываемой площади. В противоположность этому в настоящее время конструкции «MERO-TSK» (современное название фирмы «MERO») применяют только в уникальных объектах, где стоимость металла не имеет большого значения [1].

Из тех средств, которые обеспечивают эффективное использование «структурных» каркасов в массовом

- расчет с возможностью оптимизации геометрической схемы каркаса и подбором сечения каждого стержневого элемента в отдельности;
- автоматическое изготовление элементов по технологии, тесно увязанной с их конструктивными особенностями;
- сборка каркасов на стройплощадке и их подъем в проектное положение крупными блоками.

Конечно, все эти средства как-то переплетаются, влияют друг на друга, невозможно даже корректно расположить их в подобном списке по степени важности. Однако, они всё же достаточно самостоятельны, чтобы каждому из них посвятить раздел книги, отражающий мой личный опыт, накопленный в каждом из перечисленных направлений.

Среди упомянутых средств наименее разработаны технологии подъема блоков на проектную отметку, т. к. они в наибольшей степени зависят от характера объекта и строительной площадки, т.е. от случайных факторов. Можно указать лишь общие принципы разрезки каркаса покрытия массового строительства на блоки с учётом их экономичного монтажа:

- ничто не должно препятствовать сборке блока на «земле» и его подъему на проектную отметку;
- зазоры между блоками должны быть равны или соизмеримы с шагом узлов в блоках;
- к блоку перед его подъемом должны быть присоединены его опорные узлы или их части;
- выполнение работ на высоте нежелательно и требует технико-экономического обоснования.

Здесь надо отметить, что большего внимания и развития заслуживает метод подъема блоков с помощью надколонников, предложенный в [35]. Более крупные блоки в особенности арочные или купольные могут быть подняты методом Pantadome, который изображён в книге [14] на стр. 122 и на стр. 313 рис. 9.1.21, а также в книге [43] на стр. 84 и 143, 147, 150.

Расчет пространственных каркасов был первой темой, которой я занялся, поступив в аспирантуру НИИ Строительства в Ростове-на-Дону в 1963 году. В то время этот вопрос был нетривиальным, т.к. электронная вычислительная техника делала свои первые шаги. Первый точный расчет каркаса «КК», как пространственной фермы, был выполнен мною методом «сил» для квадратного блока 8x8 ячеек, опертого по углам. С учетом симметрии блока относительно восьми плоскостей в нем оказалось 12 неизвестных метода «сил». Решение системы канонических уравнений выполнено в ОМИТР Ростовского Промстройниипроекта (ПСП) методом Гаусса на полноклавишной электромеханической машине типа «Рейнметалл». Этот расчет с грохотом и лязгом длился несколько часов и, естественно, возникла мысль обратиться к более простым расчетным моделям, в частности, перекрестно-балочным. Результаты этих разработок подробно описаны в моей кандидатской диссертации «Статический расчет плоских структурных перекрытий массового строительства» [33].

Уже к моменту защиты моей кандидатской диссертации (1973 г.) и с выходом книги В. И. Трофимова и Г. Б. Бегуна [6] стало ясно, что темпы развития вычислительной техники не оставляют места для приближенных методов. К тому же, я перешел на работу в РГУ и познакомился с В.Ф. Соколовой, ведущим программистом НИИ Механики и Прикладной Математики (НИИМиПМ), которая вскоре стала моей женой. Мы вместе начали работать над программой расчета «структур».

1975 - особый год в моей биографии, когда я, очнувшись от переживаний, связанных с защитой кандидатской диссертации, всерьез задумался о дальнейшей своей работе в избранной мною области. В то время я увидел только две актуальные задачи.

Первая задача касалась монтажа многопролетных структурных покрытий, включающих несколько блоков. Первая задача решена мною тогда же. Её решение состоит в применении универсального приема, когда блоки покрытия устанавливают с зазором, равным или близким к шагу узлов (3 - 4 м) в

поясных решетках. Это решение применено А. Н. Усановым (главным инженером ЦНИИЛМК) в типовых структурах «Кисловодск» серии 400 с индексом «А» [12].

Вторая задача касалась выполнения корпусов стержневых элементов бесшовными, т.е. из единой трубчатой заготовки. Вторая задача - оказалась более сложной и пока не решена в России окончательно, хотя за рубежом существует система «ZÜBLIN», как пример решения этой задачи (фото 2.1).

В конце 70-х годов я занялся прибором «Динатон» для измерения усилий, фактически действующих в стержнях структурного каркаса. Эта задача была поставлена МГСПИ МЭП для контроля ошибок, возникающих при вычислении усилий в стержнях, прежде всего, вследствие нарушения допусков на их длину. Принцип работы прибора «Динатон» состоит в использовании зависимости частоты его поперечных колебаний от действующего в нем продольного усилия. Уже в первых опытах на натурной конструкции выяснилось, что закрепление концов стержня не соответствует принятой в расчете шарнирной схеме и создает существенные защемления. В дальнейшем эти защемления были учтены в методике измерения продольных усилий прибором «Динатон». Во время моего очередного отчета в «Лаборатории новых форм металлических конструкций» в ЦНИИСК её сотрудник И. Л. Пименов заметил, что возможность измерить прибором «Динатон» защемления концов сжатого стержня важнее, чем измерение усилия в нем. И это стало исходным мотивом моих дальнейших исследований работы сжатого стержня в структурном каркасе. Правда, через много лет (около 2009 г.) в результате этих исследований выяснилось, что определение усилия в стержне по частоте его вертикальных колебаний некорректно в принципе [25]. По этой причине работа по созданию прибора в течение нескольких лет не представлена в этой книге.

В 1984 году ЦНИИСК выпустил «Рекомендации по проектированию структурных конструкций», в которых обобщён опыт, накопленный в нашей стране и за рубежом в течение предыдущих 12-ти лет [54]. Здесь перечислены известные преимущества «структурных» конструкций, к которым я бы добавил возможность более точного подбора сечения каждого стержня в соответствии с воспринимаемыми им усилиями и другими условиями работы. В «Рекомендациях...» затронут широкий круг проблем проектирования структурных каркасов, но в предлагаемой книге это, практически, не нашло отражения по следующим причинам.

Во-первых, я рассматриваю только системы «КК», хотя в рекомендациях наряду с ними рассматриваются и другие системы пространственных каркасов. Соответствующие результаты оказываются слишком универсальными и, соответственно, сложными для использования [54].

Во-вторых, с момента опубликования в 1984 году прошло уже более 35-ти лет. Многие проблемы расчёта структур, связанные, в основном, с памятью и быстродействием ЭВМ, устарели, т.к. за минувшие годы они были устранены быстрым развитием вычислительной техники [54].

В-третьих, оптимизация основных параметров структур по «приведенным затратам» проведена в то время, когда цены на материалы, труд, энергию и т.п. были строго определены, но сегодня это невозможно. К тому же, оптимизационный расчёт, выполненный в Приложении 1 [54], не учитывает один из вариантов компоновочного решения здания, когда его утепление выполнено изнутри каркаса. В этом варианте высота каркаса покрытия не влияет на отапливаемый объём здания и, следовательно, на её оптимальное значение не зависит от этого объёма.

Идея выполнить корпус стержня из единой заготовки подхвачена разработчиками отечественных и зарубежных «КК» систем и в середине 80-х я снова возвращаюсь к этой задаче. Новые варианты её решения в виде «бутылочного» стержня появились в связи с разработками по обкатке трубы, которые выполнены под руководством В. Г. Капоровича в Краматорском Индустриальном Институте (КИИ) [47].

Вскоре я подписал договор с заводом «Экспостроймаш» на передачу своих разработок, касающихся изготовления стержней с бесстыковыми корпусами. Именно на этом заводе было окончательно отработано оборудование, представленное на рисунке раздела 7 моего сайта. Правда, моя работа в этом направлении несколько противоречила разработкам заводских технологов по внедрению сварки трением. Но в итоге, обе эти работы не были завершены, т.к. руководство завода потеряло к ним интерес в связи с крутыми политическими изменениями в стране.

К теме, связанной с «бутылочными» стержнями я вернулся около 2006 года, когда узнал о появлении финского ОМД оборудования «FINN-POWER» и нашёл в Ростове-на-Дону фирму «ГИДРОФЛЕКС», которая обладает такими прессами. На этой фирме были изготовлены натурные образцы корпусных

деталей из трубы $\Phi 60$, включающие переходные наконечники и испытанные растяжением в лаборатории НИИМиПМ РГУ. Испытания показали, что бесстыковой корпус можно выполнить с потерей прочности не более 3%, в сравнении с исходной прочностью трубчатой корпусной детали.

С 3 по 5 апреля 2017 года в г. Пятигорск состоялась научно-практическая конференция «45 лет отрасли легких металлоконструкций: от модуля Кисловодск до модуля Пятигорск». Ее материалы опубликованы [58; 59]. Среди этих материалов особый интерес для меня представляют статьи Файбишенко В. К., директора Научно-проектного центра «ВИКТОРИЯ» и главного инженера этой организации, Неласова В. С. [58]. В частности, я не согласен с тем, что для каркасов типа МЕРО или МАРХИ необходим единый «законный» сортамент трубчатых элементов, хотя согласен, что этот сортамент, должен быть чаще в области труб малых сечений.

В последние годы всё чаще приходится видеть в интернет рекламу ЛСТК (легких стальных тонкостенных конструкций). Опыт их применения в РФ уже накоплен, но по-прежнему авторы рекламных материалов призывают пользоваться услугами специализированных организаций, например, «Lstkclub». Системы ЛСТК включают элементы каркаса и ограждения, причём элементы ограждения чаще всего включают утеплитель из минеральной ваты [60]. С другой стороны, имеется опыт строительства холодильников, ограждения которых пришиваются изнутри каркаса. Если использовать, например, узлы, соединения стен и подвесных потолочных ограждений, которые приведены, например, в источниках [61; 62], то это может послужить началом разработки новых покрытий, высота которых не входит в отапливаемый объем здания. Здесь теплоизоляционное чердачное перекрытие подвешено к структурному каркасу покрытия здания, как показано на рис. 6.2 в источнике [61]. Здесь необходимо отметить, что поток новых нормативных материалов [70 - 73], а также материалов по исследованию структур всё нарастает.

Цель моих исследований состоит в том, чтобы снизить суммарные затраты на проектирование, изготовление элементов, и возведение пространственных каркасов покрытия системы «КК» в условиях массового их строительства. Речь идет об улучшении, прежде всего, основных экономических показателей каждого каркаса, т.е. его металлоемкости и трудоемкости «в деле». Строгая постановка и решение такой общей задачи в целом слишком сложно, если в принципе возможно, т.к. на стоимость объекта оказывают влияние цены на материалы, рабсилу, энергию и т.п., зависящие от рыночной конъюнктуры и заранее неизвестные. Они могут сильно меняться в зависимости от района строительства и свойств строительной площадки. Таким образом, в данной книге я (в меру своих знаний и опыта) занимаюсь поиском наилучших решений

для отдельных конструкторско-технологических и расчетных задач,

что определяется их соответствием общим и специальным требованиям, предъявляемым к решению. Такие улучшения я предполагал рассмотреть, начиная с расчетных задач, и завершить книгу изложением накопленного мною опыта строительства. Когда этот опыт был изложен, я увидел, что именно он является основой для поиска новых решений в таких областях, как конструирование и технология изготовления элементов. Так, сложилась структура данной книги.

В книге имеются примечания, якобы, не имеющие отношение к решаемым задачам, но как-то связаны с связанными с человеческими отношениями. Они взяты рамки и выделены курсивом.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ выделены наиболее существенные результаты моей работы за прошедшие годы и намечены пути их развития.

РАЗДЕЛ I

Опыт разработки, возведения и исследования структурных покрытий

В отечественных системах структурных каркасов покрытия для массового строительства «МАрХИ» и «Кисловодск» часто остаются нереализованными потенциальные возможности повышения их экономичности за счёт уменьшения числа элементов. Из известных приемов достижения этой цели наиболее просты и эффективны следующие: разрежение структурного каркаса и использование беспрогонных схем. В РАЗДЕЛЕ I приведен ряд примеров использования этих приёмов в моей практике разработки структурных покрытий.

Следует упомянуть ещё один приём из того же ряда: увеличение модуля (шага узлов структуры в осях). В наше время, когда стандарт на модуль (3000 мм) стал для отечественных структурных систем необязательным. Ростовская Строительная Компания Югэнергоспецстрой получила от его увеличения солидный экономический эффект, приняв модуль структуры 4000 мм.

В описании объектов особо выделены те их элементы, которые обладали новизной на момент разработки каркаса и повышали его экономичность.

Как правило, я занимался и разработкой и реализацией своих проектов и это отражено в тексте.

1.1 Разработка и натурные испытания экспериментального блока покрытия 24x12

для производственных зданий из элементов «Кисловодск» выполнены мною в ЦНИИЛМК в 1987- 88 годах совместно с ЦНИИСК им. Кучеренко по Заказ - наряду №0008 [16]. Изготовление элементов блока, его сборка и испытания выполнены на территории и с участием Кисловодского ЗМК. После испытаний опытного образца блока на той же площадке был собран второй такой же блок и они составили каркас покрытия производственного здания 24 x 24 м, где до сих пор изготавливают стержневые элемент для структурных покрытий «Кисловодск».

1.1.1 В целом эту НИР нельзя признать удачной, хотя она позволила достичь целей, которые были перед нею поставлены:

- экспериментально изучить особенности процесса разрушения сжатых трубчатых стержней системы «Кисловодск» в реальной конструкции «КК» с минимальным числом «лишних» связей;
- проверить применимость к таким конструкциям нормативных положений по расчетной оценке несущей способности сжатых стержней, в особенности, малого сечения Ф48 x 2.8;
- апробировать и предложить для внедрения новое конструктивно - компоновочное решение блока покрытия для одноэтажных зданий массового строительства.

Этому способствовал ряд конструктивных решений структурного каркаса, использованных в отечественной практике, по-видимому, впервые.

Во-первых, блок посередине пролета имеет такой перелом, что обе его половины имеют скат 10% под, например, кровельный настил из сэндвич - панелей или профлиста.

Во-вторых, каркас блока подкреплен двумя затяжками (1.1 - «вид по А-А»), которые выполнены по шпренгельной схеме, т.е. имеют разноуклонные участки и соединены с блоком стойками.

В-третьих, узловые элементы в зоне перелома выполнены из стандартных заготовок, причем узловые элементы верхнего пояса имеют грани, фрезерованные под углом уклона кровли (узел-«Б»), а узловые элементы нижнего пояса выполнены посередине блока разрезными (узел-«А»).

В-четвертых, в зоне перелома блока стержни верхнего пояса имеют большую длину (3400 мм), чем другие (3000 мм), но во всем остальном не отличаются от стержней «Кисловодск».

В-пятых, совмещены функции прогонов и продольных стержней верхнего пояса. Поскольку расчётные продольные усилия в этих стержнях незначительны, они выполнены из гнутого швеллера 120 x 60 x 5 мм (узел-«Б»).

1.1.2 Специально разработана безопасная система нагружения блока, позволяющая плавно увеличивать нагрузку при приближении её к разрушающей (1.2). К сожалению, она не была в полной мере использована из-за преждевременного разрушения блока, которое вызвано неверным подбором сечений

контурных сжатых стержней верхнего пояса. Здесь не учтено, что эти стержни слабо заземлены в крайних узлах, к которым практически шарнирно прикреплены стержни-прогоны.

1.1.3 В разработанном блоке достигнуто близкое к минимально возможному количество стержневых элементов - 0.62 шт/м² (включая прогоны и затяжки), что определяет его низкую трудоемкость. Металлоемкость блока 15,38 кг/м² - близка к металлоемкости (15.2 кг/м²) наиболее экономичного типового решения под нагрузку 300 кг/м² (с учетом прогонов и стоек под них). Технология сборки и монтажа блоков, а также транспортировки их элементов мало отличается от технологий, применяемых при возведении типовых покрытий «Кисловодск» [16].

1.2 Склад-пристройка в г. Видное (ближнее Подмосковье) со структурным покрытием построен компанией «ЮКС» при моём непосредственном участии в 1996 году из конструкций, изготовленных АООТ «Экспостроймаш» по моему проекту [18].

1.2.1 Компановка каркаса пристройки определена её расположением вдоль стены существующего корпуса № 453 ГИАП (Государственный институт азотной промышленности) высотой 15 м. Этим обусловлена односкатная пролётно-консольная схема покрытия (15+6) м, обеспечивающая:

- надежный водоотвод с кровли;
- благоприятные условия для устройства фундаментов;
- экономичность конструкции при наличии мощного снегового мешка с нагрузкой до 640 кг/м²;
- достаточно большой зазор между каркасом покрытия пристройки и существующей стеной и тем самым независимость вертикальных перемещений каркаса покрытия относительно стены.

1.2.2 Несущий каркас покрытия пристройки выполнен из пятнадцати пространственных блоков с размерами в плане до 19.5 x 9 м. Структурные блоки покрытия наклонены к горизонту под углом 5°, что соответствует углу уклона кровли. Опорные узловые элементы **1** блока по оси «И» выполнены из стандартных заготовок шарнирными путем введения грибовидных вставок **2** (1.3 узел-«А»). Это обеспечивает центрированное приложение к нему опорных реакций независимо от погрешностей угла наклона блока и опорных столиков на колоннах. Восприятие отрицательных ветровых воздействий на блок обеспечивают болт **3** и кольцо **4**. Опорные узлы по осям «К» и «Л» выполнены аналогично с уменьшением высоты и диаметра грибовидной вставки **2**.

1.2.3 Блоки собраны на земле из типовых стержневых и узловых элементов типа «МАРХИ» и «Кисловодск», а также нетиповых «изгибаемых» стержней, которые работают в составе верхней поясной решетки структурного каркаса и выполняют функции прогонов. На этом объекте впервые были применены «изгибаемые» стержни, имеющие составное сечение, включающее два или три уголкового профиля (**5+6+7**), соединенных прерывистой сваркой. Испытания, проведенные мною на заводе «Экспостроймаш» на специально созданной установке, показали, что такой профиль работоспособен. Он оказался достаточно технологичным в производстве и сборке каркаса. После того, как уголки соединены в составные профильные стержни, приблизительно половину из них снабжают наконечниками, как показано на рис. 1.3 «По Б - Б», а к остальным приваривают только планки **8**. При сборке каждого блока стержни с приваренными наконечниками располагают по его продольным сторонам, а затем их соединяют стержнями, к которым приварены только планки **8**, развернув их в плане в плане на 180°.

1.2.4 Каждый из структурных блоков покрытия массой до 3.5 т поднят на проектную отметку одним автокраном «Ивановец». После подъема очередного блока на проектную отметку его положение выверяют и приваривают кольца **4** к опорным столикам колонн. Далее, их соединяют с ранее поднятым блоком в уровне верхней поясной решетки стержнями-прогонами с приваренной планкой **8**. Стыки стержней-прогонов с узловыми элементами верхнего пояса каркаса выполнены с использованием сварки, т. к. коннекторы выполнены из стали 25Г2С.

1.2.5 Металлоемкость каркаса покрытия можно оценить, как суммарную его массу 40819 кг (лист 9), отнесенную к суммарной перекрываемой каркасом площади, которая равна (лист 6) 180 x 21 – 27 x 6 =

3618м². Таким образом, усредненная металлоемкость каркаса покрытия, включая прогоны, составляет: 40819 / 3618 = 11.3 кг/м².

1.3 Магазин «Миллион мелочей» в Бибирево (г Москва) - один из крупнейших объектов, каркас которого я проектировал и строил в 1997-98 годах по договору фирмы-застройщика с институтом ЦНИИЛМК [19]. Завод АООТ «Экспостроймаш» изготовил элементы структурного покрытия МАРХИ, а также элементы опорного каркаса здания габаритами 75 x 46.5 x 15м (1.4).

1.3.1 Главная особенность данного проекта состоит в том, что трехэтажное здание имеет покрытие, структурный каркас которого не мог быть собран и поднят на проектную отметку без чрезмерных затрат после устройства междуэтажных перекрытий. Устройство же перекрытий было невозможно из-за незавершенности архитектурной планировки этажей. Чтобы сэкономить время, было решено: сначала осуществить покрытие здания, а затем под ним выполнить монтаж перекрытий.

Каркас покрытия здания смонтирован из четырёх блоков 36 x 21 м по сетке колонн 24 x 12 м согласно плану на рис. 1.4. Сборка блоков покрытия (1.5) выполнена на дне котлована, подготовленного для подвального этажа.

Для подъема блоков на проектную отметку применены два мобильных крана, из которых первый постоянно размещался на дне котлована, а второй - у его контура котлована снаружи. Чтобы обеспечить перемещение первого крана по дну котлована, сборка и подъем блоков выполнены поэтапно: сначала собрали и подняли одну пару блоков по одну сторону от продольной оси здания, а затем вторую пару по другую сторону от его продольной оси.

Чтобы облегчить работу блока при подъеме желательнее максимально приблизить узлы строповки к его опорным узлам. В данном случае это достигнуто удалением стержней - прогонов, показанных на рис. 1.5 пунктиром, и смещением крестовых связей устойчивости в соседние ячейки. Благодаря этому узлы строповки располагаются прямо на осях опирания блока, а после его подъема стержни, показанные пунктиром, устанавливаются на место.

1.3.2 Структурный каркас покрытия выполнен, в основном, в системе «МАРХИ» по ТУ400-28-101-75, но при этом имеет ряд существенных особенностей.

Во-первых, блоки покрытия наклонены к горизонту под углом 2.5% (~1.5°), соответствующим заданному уклону кровли. Это устраняет разновысокие вспомогательные элементы, создающие уклон, но несколько усложняет «Опорные узлы», показанные на рис. 1.4. Каждый из таких узлов включает два элемента. Первый содержит детали 1 - 3, соединенные болтом 4. При этом вставка 2 обеспечивает центрированную передачу опорной реакции независимо от угловых погрешностей при изготовлении колонн. Второй элемент включает листовые детали 5 и 6, которые соединены сваркой. В процессе монтажа эти элементы разделены. Первый входит в состав блока, а второй прикреплен к оголовку соответствующей колонны болтами 7 (М20), которые пока не затянуты. После установки конических опор 3 на пластины 6 (чему помогают направляющие 5), и последующей выверки положения блоков, болты 7 и 4 затягивают до упора, опоры 3 приваривают к пластинам 6, а сами эти пластины - к оголовкам колонн.

Во-вторых, из регулярной стержневой системы удалены все «лишние» связи, придающие ей статическую неопределимость и даже некоторое количество связей (стержней), обеспечивающих геометрическую неизменяемость блоков в плоскости их верхнего яруса. В принятой беспрогонной схеме неизменяемость блоков в этой плоскости обеспечивается на стадии эксплуатации жестким диском профнастила. Однако, для обеспечения неизменяемости на стадии монтажа, когда настила еще нет, в указанной плоскости введены облегченные крестовые связи пруткового сечения (Св-8). Эти связи сопрягаются с регулярной структурой блока через модифицированный тип узлового элемента (У-1м), как показано на рис. 1.4, узел «А».

В-третьих, верхние пояса блока, расположенные поперек ската, выполнены из двутаврового профиля, прочно соединены с профнастилом и выполняют функции прогонов. Для реализации данного беспрогонного решения потребовалась разработка новых типов «изгибаемых» стержней (С-7, С-8, С-9), сопрягаемых с типовыми узловыми элементами систем «МАРХИ» и «Кисловодск».

В-четвертых, в беспрогонной, предельно разреженной системе количество элементов почти вдвое меньше, чем в типовых покрытиях «МАрХИ», но в то же время уровень расчетных усилий в стержнях сильно возрастает. В частности, в растянутых поясах он приближается к 30-ти тоннам. Использование трубчатых стержневых элементов из номенклатуры «МАрХИ» при таком уровне растягивающих усилий экономически и технически нецелесообразно. Поэтому вновь введенный тип стержня двутаврового профиля (С-7) разработан, с учетом возможности его усиления и использования не только в верхнем, но и в нижнем ярусе структурной системы.

1.3.3 Металлоемкость каркаса покрытия можно оценить, как его суммарную массу 50511 кг, отнесенную к суммарной перекрываемой каркасом площади (лист 24), т.е. к $46,5 \times 75 = 34875 \text{ м}^2$. Таким образом, получаем:

$$50511 / 34875 = 14.5 \text{ кг/м}^2.$$

Это близко к металлоемкости наиболее экономичного типового каркаса покрытия СП27-300А под нагрузку 300 кг/м^2 при сетке колонн $18 \times 18 \text{ м}$ [12].

Необходимо отметить, как сказался на строящемся объекте ураган, пронесшийся над Москвой в ночь с 20 на 21 июня 1998 года. В момент его возникновения было уже смонтировано два блока покрытия и на каждом из них настелен и прочно закреплен профнастил, т.е. были созданы условия для отрыва блоков силами отсоса. Все зависело от скорости и направления ветра. Этого я не знал и наутро 21 июня подъезжал к стройплощадке с тяжелым чувством, но выйдя из метро улицу, увидел:

все в порядке, крыша не улетела!

Позже я узнал из прессы, что скорость ветра колебалась от 15-ти до 31 м/сек [20], причем, направление ветра вначале северное, стало склоняться в районе Бибирево к западу. Иными словами, угол атаки ветра по отношению к настилу был близок к нулю, т.е. отсос, если и был, то минимальный. Поэтому прочность болтов 4 М18 («Опорный узел»), удерживающих блоки от взлета, оказалась достаточной. Мы не знаем, что было с крышей, если б отсос достиг максимума...

К этому вопросу мы ещё вернемся в п.3.2.1.

1.4 Покрытие трибун стадиона «Машук» (ныне «Центральный») в г. Пятигорск выполнено в течение марта - апреля 2003г по договору между Генпроектировщиком «Кавказкурортпроект» и Кисловодским ЗМК в соответствии с ТЗ Генпроектировщика [21].

1.4.1 Согласно предложенной в ТЗ компоновочной схеме мною был запроектирован и под моим руководством реализован несущий каркас покрытия трибун из элементов "Кисловодск", который опирается на эстакаду длиной 114, высотой 11, шириной 6 м с шагом колонн 6 м (1.6). Покрытие трибун площадью $120 \times 25,5 \text{ м}$ выполнено по консольной схеме с вылетом 18 м и разделено на 10 монтажных блоков габаритами $25,5 \times 12 \times 2.12 \text{ м}$, рассчитанных на следующие воздействия:

- равномерно распределенная нагрузка от собственного веса и снега - 140 кг/м^2 ;
- равномерно распределенная отрицательная ветровая нагрузка (отсос) - 70 кг/м^2 ;
- сейсмичность - 8 баллов.

1.4.2 Сборка и монтаж покрытия осложнялись тем, что его блоки не могли быть собраны на месте уже существующих трибун. Для этого могла быть использована только свободная полоса, расположенная параллельно трибунам, но по другую сторону от опорной эстакады. При этом масса каждого блока была строго ограничена, т.к. арендованный кран СКГ-25 не мог поднять более 3.5 т при необходимом вылете стрелы 11 - 12 м. Более мощный крана не смог бы маневрировать среди фундаментов эстакады. Таким образом, потребовалось уменьшить массу блока уже не только из экономических, но также и из технологических соображений.

1.4.3 Каркас покрытия трибун выполнен в системе «Кисловодск», но с существенными отличиями от известных типовых решений.

Во-первых, блоки покрытия расположены с уклоном 5% в сторону опорной эстакады. Уклон блоков образован разностью отметок опорных столиков на колоннах внутреннего и наружного ряда

эстакады 300 мм (1.6 - «Разрез по А - А»). В опорных узлах коннекторы 1 соединены с колоннами через специальные сварные башмаки 2 из полосовой стали. Каждый башмак жестко соединен с колонной двумя болтами 3 (М22), а его шарнирная связь с коннектором 1 выполнена с помощью гладкой шпильки 5 и двух гаек 5* (М22). В процессе монтажа блока башмаки сначала ставят и прикрепляют болтами 3 к столикам колонн, не затягивая их окончательно. Затем, после выверки взаимного расположения всех смежных блоков их закрепляют окончательно, затягивая болты 3, гайки 5 и приваривая каждый башмак к колонне.

Во-вторых, структурный каркас покрытия - беспрогонный со стержнями - прогонами из гнутого швеллера 120 x 60 x 5. Узловые элементы верхнего яруса из стали 25Г2С приварены к этим швеллерам на заводе швами 12, что потребовало некоторого изменения обычной технологии сборки блоков. Пришлось начинать сборку с подъема и фиксации стержней - прогонов на высоте около 2.3 м, для чего на заводе были специально изготовлены временные Х-образные опоры.

Кроме того, принятая беспрогонная схема каркаса потребовала введения стыковых элементов из того же гнутого швеллера 120 x 60 x 5, соединяющих пятиметровые участки прогонов и в пределах каждого блока и между блоками болтами 13 (1.6 -узел «А»; «План каркаса»). В пределах блока стыковые элементы прогона вводят в процессе сборки блока, а между блоками их устанавливают после выверки положения блоков.

В-третьих, при подборе сечений для стержней каркаса покрытия выяснилось, что на складе есть труба $\Phi 102 \times 4$, но она не проходит по прочности на растяжение без физического контроля стыковых сварных швов, прикрепляющих наконечник к трубе. Хотя это касалось всего сорока наиболее нагруженных растянутых стержней, я взялся решить эту проблему и разработал сварное соединение наконечника с трубой, не требующее физического контроля (1.6 -узел «А»). В этом решении существенно использовано использование муфты 6, которая выполнена из той же трубы, что корпус стержня. Разрезав муфту 6, уменьшают её диаметр, а затем приваривают к наконечнику 7 швом 8. После этого муфту 6 вставляют в трубчатую корпусную деталь 11 и соединяют её с наконечником кольцевым швом 9. Кроме того, выполняют продольные угловые швы вдоль кромок четырёх пазов 10 на концах трубчатой заготовки корпусной детали 11.

В-четвертых, проект каркаса покрытия предусматривает устройство наклонного экрана по наружным продольным его сторонам, который резко уменьшает отрицательную ветровую нагрузку на покрытие (отсос).

1.4.4 При всех усложнениях монтаж конструкций покрытия, а также устройство опорной эстакады и кровельного настила выполнено Кисловодским заводом металлоконструкций за 50 дней. Масса блока удержана в пределах 3,5 т, что соответствует металлоемкости каркаса покрытия - 11,5 кг/м².

1.5 Покрытие склада фирмы «Актис» в г. Новочеркасск на территории завода «Нефтемаш» спроектировано и возведено под моим руководством в течение июня - августа 2003 года в соответствии с договором ООО «Актис» с Кисловодским ЗМК.

1.5.1 Заказчик поставил задачу: возвести покрытие - навес над открытой складской площадью 5.2 тыс. м² в кратчайшие сроки и с минимальными затратами. Возводимое холодное покрытие должно допускать возможность его утепления, а также разборку и повторный монтажа. Сетка колонн должна быть достаточно просторной, чтобы не мешать работе напольных подъемно-транспортных средств. Всем этим требованиям, отвечает типовое структурное покрытие СП27-300А [12], кроме экономичности, т.к. для организации водоотвода с него требуется надстройка над «структурой» высотой около трёх метров. Кроме того, типовое покрытие рассчитано на нагрузку 300 кг/м², а в Новочеркасске установлен второй снеговой район и полная расчетная равномерно распределенная нагрузка не превышает 200 кг/м².

1.5.2 Принятую за основу схему каркаса СП27-300А, для повышения её экономичности пришлось модифицировать в следующих пунктах.

Во-первых, для четырех блоков покрытия габариты в плане приняты 28.5 x 33 м и для одного блока - 28.5 x 30 м. Это зависит от их расположения на плане покрытия (1.7).

При этом для всех блоков получена неизменная сетка колонн 18 x 18 м и уменьшение количества фундаментов и колонн на 20%, по сравнению с базовым вариантом.

Во-вторых, каждый блок покрытия установлен с уклоном 8%, для чего в каждой паре колонн, одна имеет надколонник высотой 1440 мм. Опорные узлы выполнены так, что компенсируют неточности изготовления и сборки элементов в двух вертикальных плоскостях. Кроме того, они имеют крепежные детали в виде болтов М16, воспринимающие отрицательные вертикальные нагрузки на кровле блока (отсос).

В-третьих, принята беспрогонная схема структурного каркаса, разреженная настолько, что может рассматриваться, как система, составленная из отдельных трехгранных стропильных ферм, опирающихся на такие же подстропильные фермы. «Изгибаемые» элементы, составленные из двух уголков, соединены с коннекторами верхнего яруса структуры из стали 09Г2С через коротыши из уголка, приваренные к коннекторам. С учётом возможности разборки такое соединение содержит стандартный болт М16 x 40, после затяжки которого головку прихватывают сваркой к полке уголка. Гайка предохранена от саморазвинчивания путем отгиба на её грань стопорной шайбы из листовой оцинкованной стали.

В-четвертых, «изгибаемые» стержни верхнего яруса, расположенные над опорами, сильно растянуты (до 25 Тс). Они имеют нетиповые сечения и соединения с узловыми элементами, которые определены составом сечения этих элементов: круг+ уголок (1.7 - «вид по В - В»).

Наиболее интересно здесь включение в конструкцию стержня двух коннекторов по его концам. Тем самым устраняется необходимость сильной затяжки стыков этих стержней с коннекторами при сборке каркаса, т.к. эта операция выполняется в процессе изготовления стержней.

В-пятых, компоновочная схема каркаса блока покрытия дополнена по продольным сторонам наклонными щитами, которые защищают покрытие от чрезмерного отсоса и в то же время на 5.5% увеличивают перекрываемую площадь (1.7 - узел «А»). Для установки щитов в каркас введены следующие дополнительные элементы:

- продольный неразрезной ригель из гнутого швеллера 120 x 60 x 5;
- распорки из трубы $\phi 48 \times 2.8$, установленные с шагом 6 м;
- подвески, поддерживающие ригель и распорки, из прутка $\phi 10$ с шагом 6 м.

В-шестых, геометрическая неизменяемость стропильных ферм и каждого блока в целом в его пролетной зоне обеспечивается отдельными типовыми стержнями «Кисловодск», в нижнем ярусе структуры, а в консольных зонах – профнастилом.

1.5.3 Перечисленные меры позволили снизить металлоемкость каркаса покрытия в среднем до 11 кг/м^2 при учете дополнительных элементов, введенных в каркас, и площадей, покрытых с их помощью. Эта металлоемкость намного ниже, чем в базовом варианте СП27-300А (14.7 кг/м^2), что составляет основную долю общей экономии стали по объекту (более 25т).

1.6 Покрытие внутреннего двора ТРЦ «Горизонт» в г. Ростов-на-Дону выполнено по ТЗ Генпроектировщика (Ростовский Промстройиниипроект). В соответствии с ТЗ от 28.07.03, каркас покрытия в поперечном разрезе имеет круговое очертание радиусом 172 м. По договору между Кисловодским ЗМК и ТРЦ «Горизонт» я разработал проект покрытия на стадии КМ и КМД, руководил сборкой каркаса покрытия на стройплощадке и к концу 2003 года конструкции были готовы к подъему. В этот момент было решено учесть в проекте каркаса изменения, внесенные в СНиП 2.01.07-85* с 1 июля 2003 года [22]. В частности, согласно этим изменениям, расчетная снеговая нагрузка в Ростове-на-Дону увеличена от 100 до 120 кг/м^2 . Уточнённое ТЗ Генпроектировщика от 06.04.04 [22] предписывает изменить проект покрытия в связи с увеличением расчетной снеговой нагрузки и изменением конструкций фонаря. Заказчик, со своей стороны, требует минимизировать дополнительные затраты, связанные с усилением и реконструкцией каркаса покрытия. В результате решено, в основном, оставить без изменения ранее принятые компоновочные и конструктивно-технологические решения.

1.6.1 Каркас покрытия размером в плане 36 x 48 м (1.8) состоит из двух блоков 36 x 24 м, которые объединены на проектной отметке. Схема опирания каркаса капитальная по сетке колонн 24 x 12 м. шириной 12 м. Примыкание торца покрытия к стене высотой 12 м над кровлей образует снеговой мешок

с максимальной расчетной нагрузкой до 640 кг/м². На каркас покрытия опирается продольный двускатный фонарь верхнего естественного освещения.

Беспрогонный каркас покрытия в пролетной зоне покрытой фонарем, освобожден от продольных поясов. Здесь он представляет собой, по существу, решетчатую складку. Только в надпорных полосах структурный каркас полностью сохранен. Он выполняет здесь функцию подстропильных ферм, на которые опираются наклонные стропильные фермы, образующие складку.

Изгиб каркаса в поперечном сечении достигается увеличением длины верхних поясов структуры, по сравнению с нижними, на 37 мм и введением сферической контактной поверхности между шестигранной муфтой **2** и коннектором **1**, что осуществлено с помощью сферической шайбы **3** (1.8 - узел «А»). Сферическая контактная поверхность введена также между головкой болта **4** и наконечником **5**. В этом же узле показаны комбинированные сечения «изгибаемых» стержней и их сопряжения с типовым узловым элементом «Кисловодск» из стали 25Г2С, к которому приварен коротыш **6** из уголка 50 х 5.

1.6.2 Существенное изменение в компоновочной схеме каркаса, связанное с ростом снеговой нагрузки, заключается во введении дополнительной колонны, поддерживающей каркас покрытия в зоне снегового мешка. Реализация этой идеи вызвала немалые затруднения, которые мне удалось преодолеть, в основном, на стадии расчета. Дело в том, что введение дополнительной колонны в ранее принятой расчетной модели каркаса вызывает в ней такое перераспределение сил, которое потребовало бы полной разборки, а затем повторной комплектации и сборки блока №1.

Более приемлемый вариант был получен путем удаления из модели каркаса какого-то количества стержней. По существу, этот способ решения задачи сводился к перебору вариантов расчетной модели с разными схемами разрежения в поисках варианта, в котором минимальное число стержней потребует замены. Это стало возможным, т.к. к тому времени была в основных чертах готова программа расчета структурных каркасов N_2015, представленная в РАЗДЕЛЕ IV.

Программа N_2015 позволяет в диалоговом режиме редактировать конфигурацию модели каркаса, получая на экране распределение усилий в каждом варианте за 1 - 2 минуты, что позволило довольно быстро найти наиболее благоприятный из них. Он состоял в удалении трёх поясных стержней над дополнительной колонной и замене около 15% стержней в каркасе блока №1.

1.6.3 Особенность измененной расчетной модели блока №1 состоит в том, что дополнительная колонна воспринимает только снеговые нагрузки. Это достигается благодаря конструкции «Опорного узла доп. колонны», которая изображена на рис. 1.8 и реализуется при отсутствии снеговых нагрузок следующим образом:

- ходовой винт **7** с двумя гайками **8** и штифтом **9** вставляют в основание **10**;
- основание **10** устанавливают на «доп. колонну» и закрепляют болтами **11**, не затягивая их;
- гайки **8** перемещают по винту **7** до тех пор, пока штифт **9** не войдет целиком в коннектор **1**;
- нижнюю гайку **8** слегка затягивают, болты **6** затягивают до отказа, а верхнюю гайку **8** используют, как контргайку для нижней гайки **8**.

1.6.4 Откорректированный проект каркаса покрытия был реализован, но фактически возведенная система сильно отличается от модели, принятой в расчете. Так, в принятой расчетной модели не учтено, что в реализованной системе на отметке +5 000 введены антресольные железобетонные перекрытия, которые резко уменьшают горизонтальную податливость оголовков колонн. Введение уточненной податливости колонн в расчетную модель каркаса здания показало, что все крайние сжатые стержни нижнего яруса в пролетных складках, имеющие минимальное сечение (ф48 х 2.8), несколько перегружены. Проект усиления этих стержней разработан, передан мною Заказчику и реализован в 2005 году.

1.7 Каркас покрытия дельфинария в Лазаревском районе г. Сочи возведен с сентября 2004 года по май 2005 года по моему проекту и под моим руководством по договору между ООО «Тарас-98» (заказчик) и ООО «Стройкомгрупп» (подрядчик). Согласно ТЗ Генпроектировщика от 10.09.04 г. (СО

СА РФ ООО «Сочиархпроект»), покрытие дельфинария представляет собой навес из профнастила, уложенный по плоскому структурному каркасу из элементов "Кисловодск".

1.7.1 Моя работа по проектированию данного объекта началась в процессе его реализации, когда «нулевой цикл» был практически завершен силами Заказчика. В результате, в пределах площади покрытия не оказалось места для фундаментов, способных нести его массу на 15-ти метровой высоте в условиях 8-балльной сейсмичности. При этом общий план объекта был размечен на строительной площадке весьма небрежно и сопряжен с уже построенным зданием в осях «Н» - «О» с ошибкой до 0.5 м вдоль оси «А» (1.9).

В этих условиях требовали своего решения не только задачи размещения фундаментов для каркаса покрытия, но также его сборки и монтажа. Решение последних совмещено с проектированием каркаса гостиницы между осями «А» - «Б», которое взял на себя отдел ростовского отделения ЦНИИ ПСК под руководством Н. Н. Рац. По предложению этого опытного проектировщика покрытие структурного каркаса вдоль его торцов было оперто на соседние здания дельфинария, как показано на рис. 1.9 («продольный разрез»).

1.7.2 Весьма существенно, что каркас покрытия дельфинария выполнен из элементов системы "Кисловодск", доставленных из Армении после разборки существовавших типовых покрытий. Поэтому мне пришлось прямо на стройплощадке организовать участок по дефектации и ремонту элементов структуры. Однако использование элементов БУ в этом каркасе сделало экономию металла не столь важной задачей.

1.7.3 Поставленные задачи архитектурного и конструктивно - компоновочного характера были решены сочетанием тривиальных и нетрадиционных приемов, которые тесно связаны с принятой последовательностью сборки и монтажа каркаса.

Во-первых, каждый блок по своим продольным сторонам опирается на две наклонные стойки, расположенные под углом 12° к вертикали в поперечном разрезе, причем пролет между опорными узлами блока составляет 30 м, а пролет между узлами опирания стоек на фундаменты - 34,8 м, что позволило свободно разместить эти фундаменты.

Во-вторых, структурный каркас выполнен из двух плоских блоков, которые расположены с продольным уклоном 7° и с перепадом 2,2 м в их стыке. Здесь предусмотрено светопрозрачное ограждение, которое защищает блок 1 от ветровых отрицательных перегрузок и создает небольшой снеговой мешок на блоке 2 (1.9 - «продольный разрез»).

В-третьих, в каждой зоне опирания блока на наклонную стойку он усилен снизу трехгранной фермой из типовых элементов «Кисловодск». Аналогичной поперечной фермой усилен блок 1 вдоль своей стороны, смежной блоку 2. Связи «в», соединяющие блоки 1 и 2 посередине пролета, частично передают нагрузку от снегового мешка на эту трёхгранную ферму.

1.7.4 Введение наклонных стоек исключает использование ранее известных решений опорных узлов и соответствующих приемов монтажа структурных блоков. Особенность использованной технологии монтажа состоит в том, что перед подъемом блока наклонные стойки размещают под ним и подвешивают к его опорным узлам. По мере подъема блока стойки постепенно раздвигаются и, наконец, свободно повисают. После этого их башмаки разводят в стороны и опускают на фундаменты вместе с блоком. Для этого специально разработанные опорные узлы обладают шарнирной подвижностью в двух плоскостях и в требуемых пределах. Наклон стойки существенно меняет конструкции её сопряжения с фундаментом и с каркасом покрытия (1.9 - узлы «А» и «Б»). Эти изменения, связанные, в основном, с технологией монтажа каркаса, рассмотрены ниже.

1.7.5 Последовательность формирования каркаса покрытия такова:

- верхние узлы Δ -опор подкрепляют временными связями «а»;
- собирают и монтируют первый блок каркаса покрытия;
- монтируют каркас гостиницы в осях «А» - «Б»;

- собирают и монтируют 2-й блок каркаса покрытия;
- вводят горизонтальные связи «б» между блоками по их наружным продольным сторонам;
- удаляют временные связи «а» с конструкциями корпуса по осям «Н» - «О»;
- вводят вертикальные связи «в», соединяющие блоки посередине пролета.

1.7.6 Сборку и монтаж первого блока выполняли в следующей последовательности:

- 1) на специально подготовленное место укладывают колонны;
- 2) собирают плоский блок размером в плане 36 x 30 м;
- 3) устанавливают прогоны;
- 4) поднимают плоский блок и устанавливают на временные опоры высотой не менее 2.2 м;
- 5) каждую колонну подвешивают к опорному узлу с помощью пары серег 4 и двух болтов 5;
- 6) собирают три подкрепляющие фермы и две капители с опорными узлами «А» и «В»;
- 7) блок строят вблизи опорных узлов «А» и поднимают с помощью двух автокранов на высоту, когда колонны свободно повисают, а сам блок имеет уклон несколько больший проектного;
- 8) опорные узлы капителей устанавливают на опорные столики Δ - опор и закрепляют болтами 6, не затягивая их до отказа;
- 9) опорную часть каждой стойки одновременно отводят наружу на 2.4 м и опускают их в прямки фундаментов размером 700x700 мм (1.9 - узел «Б»);
- 10) установочными винтами 7 корректируют положение стоек;
- 11) выверенное положение опорной плиты фиксируют наклонными 8 планками и сваркой 9;
- 12) выполняют подливку 10 опорных плит с вибрацией;
- 13) каждый опорный узел «А» фиксируют установкой второй пары серег 4, затяжкой болтов 5 и монтажной сваркой вокруг серег;
- 14) каждый опорный узел «В» фиксируют затяжкой болтов 6 и монтажной сваркой.

Сборка и монтаж второго блока выполнялся в той же последовательности, но с некоторыми отличиями от вышеизложенного в следующих пунктах:

- в п.1) габариты плоского блока в плане 36 x 27 м;
- в п.5) собирают две подкрепляющие фермы, а опорные узлы «В» соединяют непосредственно с угловыми узлами нижнего яруса блока;
- в п.7) для подъема блока добавляют третий автокран посередине стороны блока со стороны оси «Б», регулирующий уклон блока во время монтажа;
- в п.8) опорные узлы «В» устанавливают на элементы каркаса гостиницы.

1.7.7 Как видим, использование необычной компоновочной схемы не имевшее здесь своей целью решение определенной архитектурно-композиционной задачи, в целом определило оригинальный, хорошо узнаваемый облик всего сооружения.

Особого упоминания заслуживают подробности монтажа первого блока. Заказчик упорно настаивал на том, что подъем этого блока массой более 20 т должен выполнить найденный им случайный крановщик, не имеющий соответствующих документов. Мы долго спорили на эту тему и в конце концов я, сняв с себя ответственность за результаты, отступился.

И был неправ!

Уже в начале подъема блока ржавые стропы того крана, о котором мы спорили, порвались и блок рухнул на землю, повредив несколько десятков стержней. Это было весьма скромной платой за то легкомыслие, которое я допустил в столь важном и опасном деле. Трудно даже вообразить те последствия, которые нас ожидали в том случае, если бы стропы оказались чуть прочнее и порвались бы не вначале, а в конце подъема, когда свободно подвешенные стойки уже смогли бы опереться на землю...

1.8 Проект усиления покрытия внутреннего двора ТРЦ «Горизонт» в Ростове-на-Дону.

Руководство ТРЦ «Горизонт» в начале 2016 года поставило задачу усилить покрытие внутреннего двора, чтобы подвесить к нему дополнительные рекламные конструкции. К этой работе в качестве Генпроектировщика привлечено Ростовское отделение ООО «ЦНИИПСК им Н.П. Мельникова» и на субподряде «Институт математики, механики и компьютерных наук» ЮФУ (договор №213-01-14/2016-20 с ЦНИИПСК). Как автор проекта и руководитель работ по возведению покрытия, я возглавил и работы по его усилению. Отчет об этой работе, выполненной совместными усилиями Ростовского отделения ЦНИИПСК и ЮФУ, опубликован на моем сайте [15; p15] и отослан в журнал [International Journal of Space Structures]. Поэтому ниже дано лишь краткое её описание.

1.8.1 Признаю, что к решению этой задачи у меня был собственный и очень большой интерес.

Дело в том, что в конце 2015 года была завершена сертификация программы N_2015, наиболее существенным преимуществом которой, является возможность определения несущей способности сжатого стержня по неплоской форме его продольного изгиба (СП 16.13330.2011 п.10.2.6). Оставалось только на реальном объекте проверить экономическую эффективность уточненного расчета сжатых стержней, причем желательным было это сделать именно на таком объекте, где реконструкция и усиление стержней наиболее сложны и дороги.

И вот в первый же год официальной работы программы N_2015 такой случай представился!

Экономическую эффективность уточненного расчета сжатых стержней по программе N_2015 теперь можно было «пощупать» непосредственно и это составило первую дополнительную задачу исследования. Вторая дополнительная задача связана с тем, что сертификация программы N_2015 была проведена без серьезных её верификационных испытаний и эта процедура была отложена на неопределенный срок. В общем, эти две задачи оказались в числе решаемых по договору №213-01-14/2016-20, наряду с основной задачей по разработке проекта усиления каркаса покрытия по ТЗ.

1.8.2 Главный пункт моего проекта усиления покрытия состоит во введении трёх затяжек между его опорными узлами по осям 3, 5, 7 (1.10). Это моё решение, принятое соисполнителями и Заказчиком без возражений, значительно облегчало работу растянутых стержней нижнего пояса в пролетной части покрытия, но осложнило работу ранее усиленных сжатых стержней по краям пролета. Так возник вопрос об оптимизации сечения затяжки и он был решен в процессе расчета каркаса по программе N_2015 с результатом около 12 см².

1.8.3 Как следует из описания программы N_2015, коэффициент заземления сжатого стержня по концам сильно зависит от изгибной жесткости его сопряжения с узловым элементом (ρ кГс x м/рад). Значение ρ определено в расчете по экспериментальным данным, полученным на специальной установке (1.12) без учета момента затяжки сопряжения, т.е. довольно приблизительно. По этим данным расчетное значение $\rho = 10000$ при размере шестигранной муфты под ключ $S = 36$, который принят постоянным для всех стержней данной структуры. Однако, возникает вопрос, в какую сторону и насколько фактическое значение ρ отличается от принятого расчетного значения, т.к. именно это определяет безопасность расчетов сжатых стержней.

Этот вопрос решается путем сравнения двух значений R_p и R_y , полученных для каждого из обследуемых узлов конструкции расчетным и экспериментальным путем. Здесь R - жесткость сопротивления повороту узлового элемента в какой-либо вертикальной плоскости, которую создают все стержни, соединенные с ним при учете жесткостей ρ их стыков с коннекторами.

1.8.4 R_p не может быть непосредственно вычислено по программе N_2015, но это становится возможным при введении виртуального стержня, соединенного с исследуемым узлом. Чтобы уменьшить влияние виртуального стержня на работу каркаса, его погонную жесткость r и усилие ($-N$) принимаем минимальными. Жесткость сопряжения виртуального стержня с исследуемым узлом $\rho_1 = \infty$, а на другом его конце $\rho_2 = 0$. Следуя принятой системе измерения углов ϕ поворота узла, ось виртуального стержня направлена вниз от узлового элемента вертикально или с малым отклонением от вертикали (до 5°).

По программе N_2015 команда \square на панели «Коррекция» формирует таблицу параметров всех сжатых стержней, в т.ч. виртуальных. В таблице приведено главное значение k_{\min} , а также $n_1 = K_{\max}/k_{\min}$ для того конца виртуального стержня, который жестко ($\rho_1 = \infty$) прикреплен к узлу каркаса. Поскольку погонная жесткость r виртуального стержня задана, нетрудно найти главные значения расчетной жесткости закрепления узла в каркасе: $R_{p\min} = k_{\min} \times r$; $R_{p\max} = n_1 \times R_{p\min}$.

1.8.5 Метод измерения жесткости R_3 состоит в том, что к исследуемому узловому элементу в заданной вертикальной плоскости прилагают момент M и измеряют угол поворота ϕ этого узла в той же плоскости. Тогда искомая жесткость $R_3 = M/\phi$. Такой метод определения, R_3 в принципе прост, но при его реализации необходимо учесть ряд разнообразных обстоятельств.

Во-первых, фактическое значение параметра ρ зависит от множества случайных факторов, в первую очередь от точности обработки сопрягаемых деталей и от уровня предварительной затяжки стыка, которые нам неизвестны. Это значит, что методика измерений должна быть легко повторяемой на многих узлах и давать материал для последующей статистической обработки.

Во-вторых, измерение R_3 экономически целесообразно только в консольных зонах покрытия, где на отметке +5 м существует антресольное перекрытие. Для экспериментального исследования доступны лишь узлы нижнего пояса покрытия, нагруженного только постоянной нагрузкой от его собственного веса. В таких узлах и при такой нагрузке были вычислены R_p для сравнения с R_3 .

В-третьих, ввиду ограниченности зон доступности, измерения проводились, зачастую, на узлах, имеющих идентичные расчетные схемы и при этом расположенные по обе стороны от плоскости симметрии каркаса покрытия. Такие узлы с одинаковым значением R_p , объединены в группы, для которых при сравнении R_3 и R_p , принято единое значения R_3 , - минимальное значение R_3 в данной группе.

При статистической обработке учитывается и число узлов, входящих в группу, как их «вес».

В-четвертых, количество измерений может быть резко сокращено, если ϕ измерять в главных плоскостях жесткости узла, чему соответствует соотношение $\phi_x \ll \phi_y$. Поэтому желательно использовать для измерения ϕ двухосевой прибор, измеряющий ϕ_x и ϕ_y одновременно. При этом по предварительной оценке погрешность измерения ϕ не должна превышать 0.0001 mrad.

1.8.6 В качестве средства измерения углов поворота ϕ_x и ϕ_y выбран высокоточный двухосевой инклинометр NIVEL 210 швейцарской фирмы Leica. Он закрепляется на очередном узловом элементе с помощью испытательного приспособления моей разработки (1.11). С его помощью инклинометр можно установить строго горизонтально и поворачивать его вокруг вертикальной оси узла вместе с плоскостью приложения момента, определяемой положением рычага. Измерение ϕ инклинометром NIVEL 210 осуществляется через компьютер по программе Nivel Tool. При этом погрешность измерения ϕ в диапазоне ± 1.5 mrad составляет ± 0.005 mrad [23].

1.8.7 В качестве меры сравнения R_3 и R_p принято отношение $v = R_3 / R_p$. Рассматривая значения v , можно заметить:

- во всех случаях v значительно больше единицы, что говорит о надежности результатов;
- отношения v для R_{\max} везде значительно ниже, чем R_{\min} , что говорит о принадлежности v для R_{\max} и R_{\min} к различным генеральным совокупностям.

Статистическая оценка нижней границы v_{\min} доверительного интервала, в котором может находиться v для R_{\max} и R_{\min} , выполнена по программе EXCEL с доверительной вероятностью не менее 0.99 для трех вариантов выборки v :

- для R_{\max} $v_{\min} = 1,17$;
- для R_{\min} $v_{\min} = 1,19$;
- для $R_{\max} + R_{\min}$ $v_{\min} = 1,05$.

То, что оценка v_{\min} для $R_{\max} + R_{\min}$ значительно отличается от других, еще раз подтверждает, что R_{\max} и R_{\min} относятся к различным генеральным совокупностям. Однако, это не может сильно повлиять на точность вычисления несущей способности сжатых стержней по программе N_2015, так как значения коэффициентов заземления по концам стержня связаны, в основном, с R_{\min} .

1.8.8 Верификация программы N_2015 в отношении уточненного расчета сжатых стержней выполнена с помощью конечно - элементного программного пакета ANSYS. Для верификации были частично использованы результаты вычисления R_p для их сравнения с R_s , но были поэтапно повторены в ANSYS и все операции по расчету сжатого стержня по программе N_2015. Правда, это сделано только на примере только одного стержня, но в совокупности с другими результатами верификации, сравнение, приведенное в таблице 1.1, говорит о достаточной точности и высокой безопасности расчета несущей способности сжатых стержней по программе N_2015

Таблица 1.1

	k_1	n_1	k_2	n_2	δ	μ	N^*
По ANSYS	1,47	1,34	1,57	1,27	3,0°	0,797	10,595
По N_2015	1,4	1,4	1,5	1,3	0,7°	0,908	10,497

1.8.9 Более детально с результатами НИР по усилению покрытия внутреннего двора на ТРЦ «Горизонт», можно ознакомиться на моем сайте, где приведен полный текст, иллюстрации и приложения к отчету о выполненных работах [15; p15].

1.8.10 Подводя итоги подраздела 1.8, ограничусь следующими замечаниями:

- А.** Решена основная задача НИР: разработан и представлен Заказчику проект усиления каркаса покрытия внутреннего двора ТРЦ в соответствии с ТЗ. Казалось бы, вынужденное решение стыка стержневого и узлового элементов оказалось наиболее надежным и экономичным для структурных конструкций, т.к. позволяет более строго центрировать усилия в узлах без повышения точности изготовления элементов. Как показало данное исследование, именно конструкция стыка обеспечивает приемлемую симметрию в его работе при перемене знака момента.
- Б.** Экономический эффект от уточненного расчета сжатых стержней по программе N_2015 составил на данном объекте около 1 800 000 рублей, что почти вдвое превышает сумму затрат на выполнение всех задач НИР. Решены обе дополнительные задачи, упомянутые в п. 1.8.1. Итоги верификации программы N_2015 с использованием программного комплекса ANSYS подтверждают достаточную надежность уточнённого расчета сжатых стержней.
- В.** Огромную роль в выполнении этой НИР сыграл Александр Ляпин, к.ф.м.н., доцент кафедры теории упругости ЮФУ.
Во-первых, он освоил методику работы с прибором NIVEL210 через компьютер и провел все измерения ϕ на объекте.
Во-вторых, им выполнена вся работа по верификации программы N_2015 с применением ANSYS.

Таким образом, именно Александр Ляпин обеспечил успешное выполнение данной НИР

РАЗДЕЛ II

Конструкция, технология изготовления и сборки типовых элементов каркаса

2.1 Общие положения.

2.1.1 В то время, когда система «MERO-КК» была единственной, в своем роде, системой каркасов, сложилось представление, что все подобные системы состоят из элементов двух типов:

узловых и стержневых.

Однако, с развитием других «КК» систем, в особенности японских «NS» и «КТ», появилась необходимость ввести в рассмотрение третий независимый элемент

соединительный механизм,

который при сборке каркаса позволяет соединять стержневые элементы с коннекторами. Обычно соединительные механизмы «КК» систем включают крепёжные детали с наружной резьбой (болты, винты, шпильки).

Именно такое представление о «КК» системе, как о системе, включающей элементы трех типов, положено в основу настоящего раздела книги. Его цель состоит в том, чтобы, приняв за основу некоторые требования, следующие из мирового и моего собственного опыта, наметить пути совершенствования каждого из этих элементов структурного каркаса и предложить конкретные их решения.

2.1.2 Все элементы каркаса подразделяются на две категории:

типовые и нетиповые.

К типовым узловым элементам будем относить только те, которые соединяют типовые стержни. К типовым стержням будем относить те, которые образуют регулярную решетку структурного каркаса какой-либо известной («MERO», «КТ», «ZÜBLIN» и т.п.) или новой системы «КК» в ее прогонном исполнении.

Далее, типовые стержни структурных каркасов разделяются на:

«рядовые», «сжатые» и «растянутые»,

причем для каждого из видов типового стержня может существовать свой тип соединительного механизма, наиболее соответствующий характеру его конструкции и работы в каркасе.

К нетиповым будем относить несущие изгибаемые элементы верхней поясной решетки в верхнем ярусе беспрогонного покрытия а также опорные узлы, которые опираются на несущие колонны каркаса здания. К нетиповым будем относить также элементы типа затяжек и шпренгелей, подкрепляющих структурные блоки, а также узловые элементы, конструктивно связанные с ними.

2.1.3 Существуют **общие** требования, которым должна соответствовать любая конструкция, в особенности, предназначенная для массового применения в строительстве:

- функциональность, технико-экономическая эффективность;
- соответствие нормативным требованиям, например, действующему в РФ СП 16.13330.2011;
- доступность для освоения малым отечественным производителям с их ограниченными возможностями;
- учёт усложнения архитектурно-эстетических задач, решаемых при создании объектов массового строительства и соответствующего усложнения их габаритных схем. Могут возникать и **особые** требования, предъявляемые к отдельным типам элементов структурного каркаса «КК». Они формулируются в ходе разработки конкретных элементов каркаса покрытия.

2.2 Типовой узловой элемент (коннектор).

2.2.1 Конструкция типового коннектора должна отвечать ряду *общих* и *особых* требований, из которых наиболее важны следующие:

- обеспечить соединение многих (до 18-ти) стержневых элементов, оси которых пересекаются в центре узлового элемента пространственного каркаса под различными углами (от 30° до 180°);
- получить максимально возможную длину резьбы в крепежных отверстиях при заданных габаритных размерах коннектора.

Этим требованиям наиболее полно отвечает конструкция коннектора системы «ZÜBLIN», которая аналогична коннектору «NS» типа UX [2] и обладает лучшими показателями в сравнении с граненым коннектором «MERO» и «КТ» (фото 2.1) .

Коннектор «ZÜBLIN» имеет снаружи единую сферическую контактную поверхность, наиболее технологичную в массовом автоматизированном производстве, а его полость позволяет обрабатывать крепежные резьбовые отверстия, как сквозные. Благодаря этому значительно снижается расход инструмента в сочетании с заметным ростом производительности. Кроме того, несколько возрастает длина крепёжного резьбового отверстия при прочих равных, что увеличивает несущую способность резьбового соединения.

2.2.2 Приняв за основу конструкцию коннектора «ZÜBLIN», необходимо, прежде всего, решить вопрос о технологии получения полой шаровой заготовки. К сожалению, все мои попытки узнать подробности производства заготовок для коннекторов фирмой «ZÜBLIN» не увенчались успехом. Поэтому задачи, связанные с производством коннекторов типа «ZÜBLIN» в нашей стране, сегодня таковы:

Задача 2.1 - разработать технологию получения пустотелой шаровой заготовки коннектора;

Задача 2.2 - разработать технологию механической обработки коннектора, которая включает:

Задачу 2.2.а - разработать технологию обработки базовых поверхностей (осевого отверстия и сферической наружной поверхности);

Задачу 2.2.б - разработать технологию выполнения в шаровой пустотелой заготовке резьбовых крепежных отверстий.

2.2.3 К решению **Задачи 2.1**.

В России производят, главным образом, катанные помольные шары для горнорудной и цементной промышленности. Непосредственное использование таких шаров в качестве заготовок затрудняет их высокая твердость, т.е. необходимость дополнительной термообработки. Получение прокаткой полого шара проблематично.

По-видимому, наиболее целесообразно производство полых шаровых заготовок методомковки или горячей штамповки. Совместными усилиями МГТУ «Станкин» и Рязанского завода «Тяжпрессмаш» разработан и апробирован способ штамповки стальных шаров с полостью [55]. Здесь образование мелющих шаров осуществляют из исходной заготовки, отрезанной от нагретого кругляка, в три перехода: осадка, обратное выдавливание и обжим. Обратным выдавливанием получают заготовку (промежуточную) в виде стакана с шаровидным днищем. Если диаметр стакана составляет 0.9 - 0.92 диаметра шара, его обжим в полусферических матрицах происходит без облоя и с хорошим их заполнением. При использовании автоматических станков «Тяжпрессмаш» производительность предложенного способа штамповки может достигать 70-ти шаров в минуту [34].

Возможно, технология получения ковкой полых шаровых заготовок для узловых элементов для фахверков «ZÜBLIN» в чём-то подобна технологии «Станкин». Эта технология пока не нашла широкого практического применения, возможно, из-за повышенной ее сложности. Она может быть сильно упрощена и удешевлена при использовании вместо кругляка толстостенной трубы, хотя её цена такой трубы значительно выше, чем кругляка. В принципе, не исключено использование катаных шаров без полости, которые могут оказаться вполне конкурентоспособными благодаря возросшему их качеству, низкой цене, а также корректировке конструкции коннектора.

Несколько лет назад в интернет появился коллективный труд преподавателей из Казани «Выбор и

способы изготовления заготовок для деталей машиностроения» [57]. В этой книге очень детально представлены методы получения заготовок литьём и ОМД. Из приведенных в этой книге рекомендаций следует, что наиболее рационально применение обоих этих методов: сначала отлить пустотелый шар, а затем его обжечь, пока он не остыл ниже температуры рекристаллизации. Разумеется, на каждом из этих этапов должны быть применены наиболее рациональные способы литья и ОМД. Это значит, что шаровые коннекторы следует производить на специализированном предприятии, например, на рязанском «Тяжпрессмаше» или питерском «Энерголите», владеющих соответствующим оборудованием [36; 34].

Так или иначе, технологическая *Задача 2.1* о получении шаровых заготовок должна быть решена и её решение целесообразно начать с компьютерного моделирования процессов горячей обработки металла давлением, например, с помощью программного комплекса, например, QForm 7 [37; 38].

2.2.4 К решению *Задачи 2.2* (см. п. 2.2.2).

Механическая обработка диаметрального базового отверстия и сферической контактной поверхности может быть выполнена стандартными средствами на токарном станке ЧПУ или на станке без ЧПУ, но со специальными приспособлениями. Таким образом, *Задача 2.2* сводится к *Задаче 2.2.б*.

Выполнение резьбовых крепежных отверстий при наличии современных станков и ОЦ с ЧПУ также не вызывает затруднений. Однако, не всякое малое предприятие способно их приобрести. Возникает вопрос о разработке специальных приспособлений и приемов обработки, позволяющих применить доступное по цене оборудование.

Оси крепежных отверстий в коннекторах могут располагаться под различными, в общем случае, произвольными углами. Их положение проще всего задать в полярных координатах, используя экваториальную плоскость шара радиуса r в качестве фундаментальной (2.1). Если на эту экваториальную плоскость спроектировать ось какого-либо крепежного отверстия, её положение определится двумя угловыми координатами:

- зенитной, равной углу α между самой осью и её проекцией ($-60^\circ < \alpha < +60^\circ$);
- азимутальной, равной углу β между проекцией и произвольно выбранным радиальным лучом, лежащим в экваториальной плоскости ($0 < \beta < 360^\circ$).

Современное ЧПУ оборудование позволяет автоматически позиционировать заготовку относительно инструмента в соответствии с заданными конкретными значениями α и β для каждого очередного отверстия. Например, если на платформе наклонно-поворотного стола RT160 «HAAS» закрепить шаровую заготовку коннектора, её наклоном можно автоматически задать α , а поворотом - β . Однако, в процессе нарезания резьбы необходимо удерживать центр шара на оси инструмента, обеспечив достаточную жесткость закрепления заготовки, а также его прочность, которая должна превышать уровень усилий при нарезании резьбы.

Стоимость и производительность оборудования, отвечающего всем этим требованиям, зависит, в основном, от выбора одного из двух альтернативных способов нарезания резьбы:

фрезой или метчиком.

2.2.5 Нарезку резьбы фрезой выполняют, как правило, на обрабатывающем центре (ОЦ), имеющем функцию винтовой интерполяции, при частоте вращения шпинделя порядка 5000 об/мин и скорости резания около 300 м/мин. Отверстия под резьбу при обработке полых шаровых заготовок типа «ZÜBLIN» также целесообразно выполнять фрезами. Для этого могут быть использованы специальные фрезы «Sandvik» или корончатые фрезы.

Скоростное фрезерование имеет ряд преимуществ, по сравнению с нарезанием резьбы метчиком:

- снижение усилий резания, практически, на порядок;
- измельчение стружки, облегчающее ее удаление;
- стабильность процесса, стойкость инструмента.

Интересна также возможность фрезеровать одной фрезой резьбы различного диаметра, имеющие одинаковый шаг или даже различные шаги.

Снижение усилий резания дает возможность использовать для позиционирования заготовки самые легкие ЧПУ устройства типа упомянутого стола RT без каких-либо дополнительных фиксирующих средств. Установка RT на двухосевом столе ОЦ позволяет автоматически компенсировать то горизонтальное смещение центра заготовки, которое возникает при изменении координаты α и тем самым автоматически удерживать центр заготовки на оси инструмента.

Если ориентироваться на использование самых легких ОЦ, таких, например, как VF-1 или VF-2 «НААС», то стоимость только основных составляющих комплекта оборудования (ОЦ + RT160) составит не менее \$100 тысяч, а всего комплекта – около \$150 тысяч. Продолжительность обработки на ОЦ одного отверстия M22 ÷ M33 составляет около 30 секунд, чему соответствует 120 отверстий в час или в среднем 12 коннекторов в час. Для малых предприятий РФ, которым, в первую очередь, адресован этот текст, единовременное капитальное вложение порядка \$150 тыс. затруднительно, а с другой стороны, достигаемая производительность - чрезмерна. Всё это заставляет искать решения с применением более доступного по цене оборудования.

2.2.6 Нарезка резьбы метчиком может быть выполнена на любом сверлильном станке, имеющем функцию резбонарезания. Сам станок может быть оснащен или не оснащен ЧПУ, но на его столе должно быть установлено двухосевое ЧПУ устройство позиционирования и фиксации шаровой заготовки, подобное наклонно-поворотному столу (2.2).

Оно должно отличаться от, например, стола RT160 тем, что:

- при изменении углов α и β центр коннектора должен оставаться неподвижным;
- средства позиционирования могут быть грубее и дешевле;
- после установки заданных значений α и β шаровая заготовка должна быть достаточно жестко и прочно зафиксирована для восприятия значительных усилий резбонарезания метчиком.

По своей схеме установочное приспособление аналогично наклонно-поворотному столу RT «НААС», который содержит наклоняемую люльку, снабженную поворотной платформой. Чтобы избежать смещений коннектора в горизонтальной плоскости и исключить управление по третьей оси, люлька должна быть настолько глубока, чтобы центр коннектора лежал на ее оси. Для наклона люльки и поворота платформы можно использовать наиболее простые, компактные и недорогие комплектующие, например, поворотные столы RT100, RT150 «ОPTIMUM» или компактные редукторы «TRAMEC» серии X [39].

Стол «ОPTIMUM», обладают достаточной разрешающей способностью порядка нескольких угловых минут, однако шаговый привод, которым они комплектуются, не обеспечивает требуемой скорости поворота. Оснащение столов сервоприводом **BaltSistem** или **Delta** повышает скорость позиционирования в нужной мере. Стоимость такого стола с устройствами управления и программным обеспечением составляет \$ 5 тыс. (по данным ООО «Промэлектроникасервис» [40]).

Требуемая жесткость и прочность закрепления заготовки коннектора определяется моментом резбонарезания крепежных отверстий, который для отверстий M33 может достигать 250 Нм. Средство фиксации заготовки, включенное в установочное устройство, должно развивать достаточное усилие. В частности, тиски, способные удерживать силами трения шар диаметром 100 мм при моменте 250 Нм, должны развивать усилие около 50 кН. Отсюда следует, что в едином установочном блоке средства фиксации должны быть функционально отделены от средств позиционирования, чтобы освободить их от чрезмерных нагрузок. При этом установочный блок должен иметь габариты порядка 500x500x500, чтобы свободно размещаться на столе сверлильного станка подходящей мощности. Так, недорогой станок В 50 GSM «ОPTIMUM» (\$14 тыс.) имеет стол 600x600, расстояние от шпинделя до стола – 800, может нарезать резьбу по стали до M42.

2.2.7 Предварительные конструкторские проработки показали, что создание установочного блока, отвечающего всем перечисленным требованиям вполне возможно. В результате получено техническое решение, защищенное Патентом №158157RU на полезную модель «Наклонно-поворотное станочное приспособление для позиционирования и фиксации шаровой заготовки в процессе формирования в ней радиальных отверстий» (2.2) [46]. Его стоимость не превышает \$15 тыс., а общая стоимость основных средств механической обработки резьбовых отверстий с использованием метчика не превышает \$20 тыс.

Жёсткий корпус 1 приспособления устанавливают на стол 2 сверлильного или фрезерного станка. На правую стойку корпуса 1 опирается привод 3, например, сервопривод, наклоняющий заготовку 4 коннектора относительно оси X совместно с люлькой 5, которая имеет две боковые стенки и перекладину. Правая стенка люльки жестко соединена с приводом 3, а левая стенка люльки опирается на подшипник 6, размещенный на левой стойке корпуса 1. На перекладине люльки 5 размещен привод 7, например, сервопривод, вращающий заготовку вокруг оси Y, совпадающей с осью базового отверстия 8 заготовки 3. Шпиндель 7 снабжен цанговым устройством 9 передачи вращения от шпинделя 7 к заготовке 4 через её базовое отверстие 8.

Кроме люльки 5, со шпинделем 3 соосно соединено по резьбе базовое кольцо 10 с конической контактной поверхностью, обращенной в сторону шаровидной заготовки 4, которая определяет её положение во время обработки крепёжных отверстий. Фиксация этого положения достигается с помощью гидроцилиндра 11, размещенного на левой стойке корпуса 1, снабжённого штоком 12 и коническим диском 13. При отсутствии прижимного усилия заготовка 4 опирается на станину 5 через упругую опору 14. Обработка крепёжных резьбовых отверстий с помощью приспособления, изображённого на (2.2), может быть выполнена, например, в следующей последовательности:

- 1) заготовку коннектора 1 устанавливают в приспособление так, чтобы взаимортогональные его оси X, Y, Z проходили через центр заготовки, а ось базового отверстия 13 совпала с осью Y;
- 2) вращая заготовку 1 вокруг оси X вместе с люлькой 5 приводом 3, придаем ей угол α_1 , равный зенитной координате первого отверстия;
- 3) зафиксировав положение заготовки в кольце 10 гидроцилиндром 11 через шток 12 и диск 13, сверлят первое отверстие сверлом 1_c , закрепленном на шпинделе 3;
- 4) заменяют в шпинделе сверло 1_c на метчик 1_m и производят нарезание резьбы в отверстии 1;
- 5) освобождают заготовку от давления штока 12, меняют в шпинделе метчик 1_m на сверло 2_c и одновременно поворачивают заготовку коннектора на углы $\alpha_2 - \alpha_1$ и $\beta_2 - \beta_1$ ($\beta_1 = 0$), используя приводы наклона 3 и поворота 7 заготовки, поворачивающие её относительно осей X и Y;
- 6) заготовку фиксируют гидроцилиндром 11 и сверлом 2_c высверливают второе крепёжное отверстие, меняют сверло 2_c на метчик 2_m и нарезают этим метчиком резьбу второго крепёжного отверстия;
- 7) далее, подобно п. 5) при переходе от обработки отверстия i к отверстию $i + 1$, значения угловых координат заготовки должны быть изменены на $(\alpha_{i+1} - \alpha_i)$ и $(\beta_{i+1} - \beta_i)$.

2.2.8 Для уменьшения суммарной длительности обработки коннектора, порядок выполнения операций по обработке его крепёжных отверстий может быть сильно изменён, по сравнению с приведенным выше. В опытном образце приспособления, созданном мною для Кисловодского ЗМК в сотрудничестве с ООО «Промэлектроникасервис» [40], предусмотрена автоматическая смена координат заготовки по специальной программе сервоприводами 3 и 7. Испытания этого образца, проведенные на ЗМК, показали, что угловые координаты заготовки можно менять с приемлемой скоростью, но их точность недостаточна, т.е. примененные приводы 3 и 7, а также системы их управления требуют совершенствования.

Основное технологическое время обработки резьбового отверстия с использованием метчика не превышает времени обработки фрезой, но здесь значительно увеличивается вспомогательное время на ручную смену инструмента, изменение режимов резания, удаление стружки и т.п. операции. В результате производительность обработки отверстий уменьшается в $2 \div 3$ раза.

Таким образом, актуальные задачи совершенствования установочного блока состоят в следующем:

- увеличить точность и скорость позиционирования заготовки;
- автоматизировать смену инструмента.

В случае успешного решения этих задач потеря в производительности может быть частично скомпенсирована применением станочных приспособлений, например, предложенного типа. С учётом этих перспектив или без их учета, на сегодня ясно, что для небольшого предприятия в РФ

технология нарезания резьбы метчиком более доступна и целесообразна, чем фрезой.

2.3 Типовые стержневые элементы.

2.3.1 В системе «MERO-KK» принят принцип максимальной унификации конструктивных решений. Считалось, что он дает решающее преимущество структурам в их производстве. Того же принципа придерживались конструкторы отечественных систем «МАрХИ» и «Кисловодск», но современные методы обработки достаточно эффективны и при невысоком уровне унификации изделий. Так, например, в японская система «КТ» включает стержневые элементы различной конструкции, которая соответствует и знаку и модулю воспринимаемых ими усилий [1; 2].

Я принимаю это соответствие в качестве общего требования, которое касается, в первую очередь, выбора профиля стержня и способа соединения переходного наконечника с корпусной деталью.

Учитывая, что структурный каркас представляет собой пространственную ферму, будем различать следующие разновидности типовых стержней по воспринимаемым ими продольным усилиям:

- «рядовые» - под небольшие (до 20Тс) продольные усилия обоих знаков - более 50%;
- «сжатые» - под сжимающие усилия более -20Тс (по модулю) - 10-20%;
- «растянутые» - под растягивающие усилия более +20Тс (по модулю) - 10-20%.

Указанные диапазоны изменения усилий для каждого наименования в классификации стержней ориентировочны. Данные о массовости их применения еще более приблизительны, т.к. сильно изменяются от объекта к объекту. Они здесь приведены для того, чтобы как-то охарактеризовать сравнительную массовость использования стержней различных типов.

Корпус типового стержня включает корпусную деталь постоянного профиля и переходные наконечники, соединенные к корпусной детали по ее концам или выполненные из единой с нею заготовки. В системе «КТ» выбор профиля корпусной детали для типовых стержней уже сделан:

- для «рядовых» стержней - круглая труба $D \times s$ с наружным диаметром D и толщиной стенки s ($D = 48 \div 102$ мм; $s = 2.5 \div 3.5$ мм);
- для «сжатых» стержней - круглая труба $D \times s$ ($D = 102 \div 219$ мм; $s = 3 \div 8$ мм);
- для «растянутых» стержней - круг диаметром D ($D = 35 \div 120$ мм).

Этот выбор вполне обоснован многолетним опытом применения в Японии системы «КТ» и «MERO-TSK» [27]. Теперь я его принимаю, как правило.

Перед нами стоит теперь следующая конструкторско-технологическая задача:

Задача 2.3 - выбрать способ соединения переходных наконечников с корпусными деталями для каждой разновидности типового стержневого элемента.

2.3.2 К решению **Задачи 2.3** для типовых стержней.

Способ и технологию соединения наконечника с корпусной деталью для «рядового» стержня выбираем, исходя из основного требования – максимально использовать прочностные свойства металла корпусной детали и наконечника при растяжении, сжатии и изгибе (ρ). При растяжении это, практически, равно требованию равнопрочности соединения самой корпусной детали. При сжатии стержня предпочтительны решения с высокой жесткостью ρ , но она зависит, в основном, от конструкции стыка стержня с коннектором (Тур_i). В [15; p13] этот вопрос рассмотрен подробнее.

Использование сварного соединения дуговой сваркой не даёт производителям ожидаемой прочностной надежности и экономичности стыка переходных наконечников с корпусной деталью.

Во-первых, по отечественным нормам прежнего (СНиП II-V.3-72) и нашего времени (СП16.13330.2011) для стыкового сварного соединения можно обеспечить стопроцентную равнопрочность при растяжении только в случае сплошного физического контроля швов, что резко повышает трудоемкость и стоимость изделий. При сварке без физического контроля швов нормы требовали и требуют снижения на 15% расчетного сопротивления шва, по сравнению с его исходным значением R_y для трубы. Иными словами, пока нам приходится мириться с увеличением металлоемкости структурных каркасов на 5 ÷ 7%.

Во-вторых, наложение поперечных швов дуговой сваркой не позволяет соблюсти строгие допуски на длину стержня порядка 0.5 мм. При обычных у нас допусках на изготовление корпусных деталей усадка швов после сварки неравномерна. Эта проблема решена на заводе в г Вюрцбург внедрением лазерной сварки, не требующей зазора для укладки шва. Однако, и здесь надежность швов обеспечивают сплошным физическим контролем, включая прямые испытания стержней растяжением. В наших условиях нельзя рекомендовать малому предприятию принятие таких мер. Их дороговизна уже заставила тот же завод в Вюрцбурге сначала отказаться от объектов массового строительства, а потом и сведения к минимуму производства структурных каркасов вообще.

Поиск решения **Задачи 2.3** для «рядового» типового стержня можно вести в нескольких различных направлениях. Ниже рассмотрены эти направления и другие вопросы, связанные со стыковкой корпусной детали с переходными наконечниками стержня.

2.3.3 **Бесстыковой корпус** может быть выполнен только средствами ОМД. Такой корпус применён, например, в системе «ZÜBLIN» (фото 2.1). Технология производства стержней из единой трубчатой заготовки диаметром от 60 до 150 мм, в принципе, не отличается, от той технологии, которую разработал В. Г. Капорович в Краматорском Индустриальном Институте (КИИ) [47]. Разница состоит в том, что обкатку труб для «ZÜBLIN» осуществляют, по-видимому, без трения, т.е. роликами.

Другой вариант такого бесстыкового корпуса был разработан мною в ЦНИИЛМК в конце 80-х годов и защищен патентом на изобретение № 2004732(RU) от 1992 года [13]. Этим решением предусмотрено холодное редуцирование трубчатой корпусной детали по ее концам, а затем -электровысадка концов корпуса в кольцевые пазы малогабаритных переходных наконечников. Это решение и оборудование для его реализации, подробно описанное на сайте [15; р8], не получило широкого применения, в первую очередь, из-за сложности оборудования для горячей высадки. Это решение имеет и другие недостатки, например, невозможность затяжки стыка большим моментом.

Главная технологическая ошибка, состояла в том, что для нагрева корпусной детали перед её горячей высадкой был выбран активный электронагрев вместо индукционного. Это потребовало тщательной формовки и зачистки контактных поверхностей корпусной детали и создания для этой цели ещё одной специальной установки.

Другая ошибка состояла в том, что не были установлены приоритеты в проведении работ. На заводе «Экспостроймаш», где я одновременно работал над технологией штамповки трубчатой корпусной детали и штамповки переходного наконечника. Поскольку эта деталь имеет второстепенное значение, можно было для начала ограничиться и токарным её вариантом.

В настоящее время на российском рынке появилось финское ОМД оборудование, позволяющее по-новому подойти к решению бесстыкового корпуса. Это восьмикулачковые гидравлические радиально обжимные прессы „FINN-POWER“. Например, пресс P32 ценою около \$30 тыс. способен выполнить около 500 обжимов в час при диаметре трубы до 87 мм. Пресс FP120 несколько дороже, но он способен выполнить в час до 3000 таких обжимов. С помощью подобного пресса трубчатая корпусная заготовка обжимается по концам настолько, что вставленная в трубу анкерная гайка не может быть из нее извлечена. Силу выдергивания анкерной гайки **2** в нужной мере увеличивает подкрепление обжатого участка трубы бандажным кольцом **3** (2.3).

Как показали проведенные мною эксперименты, подобное сопряжение переходного наконечника, т.е. анкерной гайки с корпусной деталью **1** может иметь прочность, близкую к прочности трубы корпусной детали. Так, в опытных образцах разрушение трубы происходило вдали от зоны её контакта с анкерной гайкой, там, где деформации обжима не превышали $2 \div 3\%$. Это объясняется значительным упрочнением металла в процессе глубокой холодной деформации. Проведено также испытание этой конструкции корпуса циклической нагрузкой в диапазоне от 0.2 до 0.7 от разрушающей нагрузки. После 1000 циклов никаких изменений в поведении образцов не, найдено. Их статическая прочность осталась на уровне образцов, не подвергнутых циклическому нагружению. Данное техническое решение стержня приведено в описании изобретения к заявке, принятой патентным ведомством Германии с регистрационным номером Aktenzeichen 10 2012 024 199.2.

Таким образом, выполненные разработки и испытания технических решений «рядового» стержня с бесстыковым корпусом можно считать положительными, но пока в этом направлении не получены результаты, которые позволили бы рекомендовать их к массовому производству в РФ. На сегодня,

наиболее перспективно сочетание технологических процессов редуцирования корпусной детали в конической матрице с последующим обжимом бандажных колец в прессах «FINN-POWER».

2.3.4 Унификация посадочного диаметра переходных наконечников основана на возможности редуцировать трубчатый корпус по концам перед приваркой к нему наконечников. Смысл такой обработки состоит в том, что позволяет унифицировать посадочный диаметр наконечников при свободном варьировании исходного диаметра D трубы в заданном диапазоне. При этом можно иметь не более трех комплектов матриц для редуцирования корпусной детали с обеих сторон и наконечники двух- трех диаметров (например, 40, 60 и 80 мм), производимых «на склад». При редуцировании корпусной детали по концам и использовании сварки трением можно получить вполне равнопрочное соединение наконечников с корпусной деталью (2.4).

2.3.5 Сварка трением была принята в качестве основного средства соединения переходных наконечников с корпусной деталью в конце 80-х на московском заводе «Экспостроймаш». Этот способ сварки был уже в то время достаточно хорошо разработана челябинским ООО «КТИАМ», которое до сих пор производит и поставляет необходимое для сварки оборудование.

Принцип сварки трением состоит в том, что, например, корпусная деталь закреплена, а наконечник быстро вращают, прижимая к торцу корпусной детали. Трение между торцами деталей быстро их разогревает до высокой температуры, после чего вращение наконечника прекращают и подают его вдоль оси вращения в сторону корпусной детали. В этот момент и происходит сварка деталей с вытеснением из шва между ними грата - материала, содержащего всевозможные загрязнения. После этого грат автоматически удаляется с помощью специального устройства. При сварке трубы с массивной деталью, как в нашем случае, условия нагрева трением наиболее благоприятны и при этом он происходит одновременно по всему сечению трубы. Поэтому сварка трением дает швы очень высокого качества при высокой производительности. Кроме того, плавно регулируя величину подачи наконечника, можно добиться высокой точности изготовления стержня по длине.

Уже в наше время Ростовская Строительная Компания Югэнергоспецстрой, учитывая достоинства сварки трением, намерена внедрить ее в массовое производство стержней структурных каркасов. В этом деле мы рассчитываем на сотрудничество со стороны ООО «КТИАМ» [41].

2.3.6 Физический контроль сварного шва остается необходимым при любом способе сварки и в этом направлении необходимы дополнительные исследования. Наиболее экономичным по цене является метод акустической эмиссии, который к тому же хорошо сочетается с испытаниями стержневых элементов растягивающей нагрузкой. Такие испытания стержней издавна проводили на московском заводе «Экспостроймаш», но без использования методов неразрушающего контроля их надежность вызывала сомнения. Используя параллельно метод акустической эмиссии можно резко поднять надежность силовых испытаний, но для этого необходимы дополнительные исследования. Так, в частности, необходимо подтвердить в конкретных условиях силовых испытаний эффективность повторных нагружений стержня, поскольку его однократное нагружение, обычно, не позволяет однозначно интерпретировать возникающие шумы.

В том случае, если испытательная установка, вариант которой изображен на рис. 2.13, будет построена, такие исследования можно провести на натуральных образцах силами ЮФУ, т.к. в этом университете имеются специалисты по акустической эмиссии. В предложенном варианте важно конструктивное решение упругой опоры для испытываемого образца. Упругие опоры особенно необходимы, для испытаний образцов большой массы, которая может достигать нескольких десятков и даже сотен кг. Загрузку таких образцов в установку можно облегчить устройством специальных транспортных путей, по которым они могут катиться, но для соединения со сменными муфтами установки требуются их небольшие перемещения для достижения соосности с муфтами. Этого можно добиться без больших усилий со стороны оператора при выполнении опор стержня - образца податливыми по вертикали и горизонтали. Кроме того, упругие опоры должны быть просты в изготовлении и переналадке и быть легко сменяемыми. Решения упругих опор, приведенные на рис. 2.13 отвечают не всем этим требованиям и разработка таких упругих опор является актуальной задачей по совершенствованию испытательной установки.

2.3.7 *Затраты на испытания стержней* могут быть значительно сокращены, если испытаниям подвергать не все растянутые «рядовые» стержни, но только их небольшую часть и маркировать испытанные стержни, например, литерой «э». Стержневые элементы с такой литерой должны быть внесены в таблицы **Тур_i** с несущей способностью на растяжение $+N^*$, полученной без умножения на 0.85. По оценкам, лишь 10±15% «рядовых» стержней нагружены так, что требуют испытаний.

В идеальном варианте конструктивное решение для «рядового» типового стержня не должно требовать дополнительных затрат на подтверждение прочности для каждого изделия. В этом отношении наиболее перспективно развитие бесстыковых решений, но экономически с ними могут соперничать и методы, основанные на сварке трением.

На рис. [2.5](#) приведены варианты соединения переходных наконечников с корпусной деталью для типового «рядового» стержня. Слева приведен стык, выполненный обычной дуговой сваркой. Справа такой же стык, выполненный сваркой трением с унификацией посадочного диаметра переходного наконечника. В действительности, разумеется, стержневой элемент имеет по концам одинаковые сопряжения переходных наконечников с корпусной деталью.

2.3.8 К решению *Задачи 2.3* для «сжатого» типового стержня.

Конструкция и технология выполнения «сжатого» стержня меньше влияет на надёжность и экономичность всей структуры, чем конструкция «рядовых» стержней. Они могут варьироваться в зависимости от диаметра **D** стержня и наличия у производителя того или иного оборудования. Так, например, при диаметре не более 130 мм соединение корпусной детали с наконечниками целесообразно выполнять сваркой трением, поскольку производимое «КТИАМ» оборудование позволяет сваривать трубы диаметром до 130 мм [\[41\]](#). Разумеется, «КТИАМ» может по спецзаказу изготовить установку, способную сваривать трубы и большего диаметра, но ее цена будет намного выше и может оказаться недоступной для малого предприятия. В этом случае трубы большого диаметра можно сваривать с наконечниками дуговой сваркой.

Решение типового «сжатого» стержня, приведенное на рис. [2.7](#) целом является повторением решения «КТ-I» или «КТ-II» с небольшими изменениями, которые связаны, в основном, с использованием патента РФ №185390 [\[32\]](#).

Унификация посадочного диаметра переходных наконечников при этом так же эффективна, как и для «рядовых» стержней, т.к. обе эти разновидности типовых стержней имеют трубчатые корпусные детали.

2.3.9 К решению *Задачи 2.3* для «растянутого» типового стержня.

В стержне «КТ-III» с наконечник, как таковой отсутствует. Соединительные механизмы здесь непосредственно связаны с корпусной деталью кругового профиля по ее внутренней резьбе. Этим обусловлены существенные недостатки стержней «КТ-III» [\[27\]](#):

- для обработки внутренней резьбы по концам корпусной детали необходимы крупногабаритные станки, которые не могут быть заменены современными ОЦ;
- отверстия под внутреннюю резьбу существенно уменьшают площадь поперечного сечения по концам к корпусной детали, что снижает эффективность использования ее материала.

Наиболее прост и доступен для малого российского предприятия переходной наконечник и его соединение с корпусной деталью по патенту на полезную модель «Стержневой элемент сборного каркаса» [\[13\]](#). В этом решении переходной наконечник в виде стакана надет на конец корпусной детали круглого профиля и соединен с нею угловыми сварными швами, уложенными в продольные пазы наконечника (2.8). Достоинство такого соединения состоит в том, что длина сварных швов конструктивно неограниченна.

В покрытии трибун стадиона в Пятигорске мною апробирован несколько более сложный сварной вариант соединения наконечника с трубчатой корпусной деталью, позволяющий получить дуговой сваркой равнопрочное соединение, не требующее физического контроля (1.6 - узел «А») [\[15\]](#); раздел 13]. В отдельных подобных случаях можно рекомендовать стыковку наконечника с корпусной деталью по данной конструктивной схеме. Если же поставить своей целью, свести испытания «растянутых»

типовых стержней и соответствующие производственные расходы к минимуму, то наилучший результат достигается при бесстыковом корпусе, изображённом на [рис.2.3](#).

Соединительные механизмы обеспечивают процесс сборки стыков каркаса, включающий следующие этапы:

- 1) свинчивание стержневых и узловых элементов каркаса между собой;
- 2) контроль правильности сборки и устранение возможных ошибок путем замены элементов;
- 3) предварительная затяжка стыков, выполняемая с целью устранения зазоров в стыках;
- 4) окончательная затяжка с использованием динамометрических ключей, выполняемая с целью достижения в стыках проектных натягов.

Все известные «КК» системы оснащены соединительными механизмами, обязательно включающими резьбовую крепежную деталь, например, болт или шпильку. Хотя в остальном их конструкции различны, это положение остается неизменным.

Необходимо отметить, что на рисунках данного подраздела соединения переходных наконечников с корпусной деталью изображены в сочетании с конкретным соединительным механизмом, рекомендуемым для данной разновидности типовых стержней. Такое совмещение позволяет уменьшить общее количество рисунков в данной книге.

2.4 К решению некоторых задач, для соединительных механизмов, отвечающих поставленным требованиям, перечисленным ниже.

1. **Особые** требования к механизмам соединения крепежной детали при свинчивании элементов каркаса, например, путем её выдвижения в начале свинчивания деталей структуры. Обеспечивать автоматическое наживление крепежа. Так, например, в системе «КТ» [27] используется два вида устройств, выталкивающих крепежную деталь при сборке каркаса. В одном случае это резьбовое устройство, в другом - цилиндрическая пружина.

2. Быть конструктивно и технологически независимым и от стержня и от коннектора. В принципе, соединительный механизм может быть связан при изготовлении со стержневым элементом («MERO», «Кисловодск», «МАРХИ» и т.п.) или с коннектором («Брест» [48]), но он может также поставляться на стройплощадку, как самостоятельное изделие. Такой особенностью обладает, например, соединительный механизм в немецкой системе «ZÜBLIN» [27] и японской «NS» [2]. Следуя этому требованию, можно организовать производство корпусов для наиболее массовых «рядовых» стержневых элементов каркаса «на склад». Соединительные механизмы к ним могут быть подобраны по несущей способности и по размерам в процессе комплектации каркаса на заводе или его сборки на стройплощадке. При этом производство наиболее ответственных деталей, например, высокопрочного крепежа может быть передано специализированному предприятию.

3. Придавать стыку максимально возможную изгибную жесткость ρ (технически и экономически оправданную), в т.ч., путём затяжки стыков большим контролируемым моментом. Это требование, вытекает из моих исследований работы сжатого стержня в структурном каркасе [15; p13]. Одновременно усиление затяжки может быть использовано для повышения вибростойкости конструкции каркаса. Так, например, в системе «КТ» соединительный механизм допускает предварительную затяжку стыков любым заданным моментом именно для повышения их вибростойкости [27]. Для увеличения в таком стыке изгибной жесткости ρ необходимо только подобрать максимально жесткие на изгиб все детали для соединительного механизма.

4. Допускать механизацию свинчивания элементов каркаса, т.к. этим путем можно сильно уменьшить трудоемкость сборки стыков. Отсутствие решений и даже предложений на эту тему говорит о том, как сложна эта проблема. Её решение, несомненно, лежит в области изобретательства. В качестве прототипа принята германская система «ZÜBLIN» [55; 56; 27], отличительные признаки которой в основном послужили базой для формирования требований к разрабатываемому соединительному механизму.

Задача 2.4 состоит в разработке соединительных механизмов для каждой разновидности типовых стержней (п. 2.1.2), отвечающих **общим** (п. 2.1.3) и **особым** (п. 2.4.2) требованиям.

2.4.3 К решению *Задачи 2.4* для «рядовых» стержней.

Система пространственных каркасов «ZÜBLIN» представляет собой реализацию изобретения Армина Милаеуса (**Armin Mylaeus**) по патенту «Строительный комплект для изготовления трехмерных каркасов» [55; 56; 27]. По этому патенту, трёхмерные каркасы имеют в своём составе соединительные механизмы, включающие крепёжные детали в виде шпилек с резьбой различного шага по концам. Посередине шпильки имеют, например, шестигранный приводной пояс, сопрягаемый с внутренней шестигранной поверхностью приводной муфты. Таким образом, каждый стержневой элемент имеет по два независимых соединительных механизма по его концам, как и в других известных «КК» системах, например, в «MERO».

Соединительный механизм в известных структурных системах имеет следующие недостатки.

1. Устройство шестигранного пояска посередине крепёжных шпилек не соответствует *общему* требованию экономичности соединительных механизмов (п. 2.1.3). Такой поясок проще всего выполнить при изготовлении шпилек из шестигранника, но это связано с дополнительной обработкой и потерей материала в отходы. Кроме того шестигранник дороже круга. В итоге, более экономичным оказывается, например, решение по патенту №185390 RU [32].
2. В системе «MERO» и производных от неё отечественных системах «МАРХИ» и «Кисловодск» шпилька заметно выступает из приводной муфты вначале свинчивания стержневого элемента с узловым элементом, что затрудняет сборку каркаса при необходимости вставить стержень между двумя закреплёнными коннекторами. В системе «ZÜBLIN» этот недостаток выражен значительно меньше, чем в системе «MERO».
3. В системе «ZÜBLIN» глубина ввинчивания шпильки в коннектор сильно зависит от витка резьбы, с которого началось это ввинчивание и может колебаться в пределах нескольких миллиметров, что недопустимо при ограниченной глубине ввинчивания шпильки в коннектор.
4. При сборке каркасов неприменим известный механизированный инструмент, что не соответствует требованию «4» в п. 2.4.2.

По-видимому, указанные недостатки и заставили фирму «ZÜBLIN» около 2000 года отказаться от производства и рекламы в интернете собственной системы пространственных каркасов в целом.

2.4.4 На рис. 2.5 показан, по моему мнению, более удачный пример конструкции соединительных механизмов для типовых «рядовых» стержней, отвечающий всем поставленным требованиям.

2.4.5 Здесь к корпусной детали прикреплены по концам переходные наконечники **2** и **3** с осевыми резьбовыми отверстиями, имеющими левую и правую внутренние резьбы.

Крепёжные шпильки **5** и **6** различны: одна из них (**5**) имеет левую и правую резьбу по концам, а другая (**6**) имеет правую резьбу по обоим концам. Посередине между резьбами обе шпильки имеют штампованные шпоночные выступы **7** и **7***, которые сопряжены с внутренними продольными пазами **10** и **10*** муфт по Патенту [32]. Движение приводных муфт **9** относительно шпилек **5** и **6** ограничено выступами **11**, отштампованными на торцах муфт **9** и **9***, которые контактируют с переходными наконечниками корпуса **2** и **3**.

Приводные муфты **9** и **9*** в обоих механизмах стержневого элемента одинаковы. Каждая из них имеет два участка наружной поверхности. Один из них - цилиндрический предусматривает использование механизированной сборки, другой участок - шестигранный дает возможность использовать при ручной сборке рожковый ключ. Вообще-то муфты с такой поверхностью уже существуют в испанских системах «LANIK-SEO», но там они не используются для механизированной сборки каркаса [43].

Следуя выводу «Б» в п. 1.8.9, «рядовые» стержневые элементы могут быть состыкованы с коннекторами через сферические шайбы **12** и **12***, сохраняющие радиальную подвижность при сборке стыка, т. к. они надеты на шпильки **5** и **6** через втулки **13** и **13***, например, из губчатой резины или пластика.

Предложенная конструкция соединительных механизмов хорошо сочетается с конструкцией самого стержня, которая, независимо от особенностей её выполнения, т. к. включает два осевых резьбовых отверстия по концам. Технологически это удобно, когда, вращая корпус стержня в одном направлении, можно одновременно нарезать в этих отверстиях правую и левую резьбы.

При этом переходные наконечники **2** и **3** выполнены по-разному. Наконечник **2** на левом конце стержня имеет, например, по контуру радиальные отверстия **3** под серповидный ключ, а на другом конце (справа) наконечник выполнен из шестигранника под рожковый ключ. Разумеется, в действительности, переходные наконечники для каждого стержневого элемента и их прикрепление к корпусной детали **1** выполняются одинаково, в т.ч. из единой с нею заготовки.

2.4.6 Во время транспортировки стержня от завода к месту монтажа обе крепёжных детали **5** и **6** должны быть ввинчены в переходные наконечники **2** и **3** до упора отштампованных выступов **11** и **11*** в шпоночные выступы **7** и **7***. При этом резьба крепёжных деталей защищена от повреждений, т. к. находится внутри муфт **9** и **9***.

Возможны различные варианты свинчивания стыков такого стержня с коннекторами **16** и **16***, которые закреплены, но их стыки с другими примыкающими к ним стержнями не ещё не затянуты окончательно (п. 2.3.1). Сборочные операции могут быть выполнены, к примеру, в следующей последовательности:

- на узловом элементе **16*** закрепляют шайбу **12*** и кольцо **13*** например, с помощью пробки **18**;
- вывинчивают крепёжную деталь **5** из корпуса стержня с помощью углового механизированного инструмента, углублений на её торце, контролируя длину l (2.7);
- подносят конец шпильки **5** вплотную к крепёжному отверстию узлового элемента **16**, сохраняя положение стержневого элемента в пространстве, близкое к проектному;
- сопрягают механизированный инструмент с цилиндрической частью поверхности муфты **9** и включают его на 2 - 3 сек.;
- выставляют муфту **9*** соосно шайбе **12***, сопрягают механизированный инструмент с цилиндрической частью поверхности муфты **9*** и включают его на 2 - 3 сек.

Все варианты свинчивания стыков каркаса основаны на использовании допусков на изготовление резьбовых его крепёжных соединений, которые позволяют свинчивать стыки при небольшом нарушении соосности внутренних и наружных крепёжных резьб. Это несколько сужает область их применения. В частности, при свинчивании этих резьб с гарантированным зазором Н6/г6, сборка стержневых элементов длиной около 1500 мм в осях, становится затруднительной.

2.4.7 Предварительную и окончательную затяжку стыков можно выполнить в следующей последовательности:

- вращая корпус серповидным ключом, закрывают зазор в стыке с коннектором **16***;
- вращая муфту **9** рожковым ключом, закрывают зазоры в стыке стержня с коннектором **16**;
- вращая корпус двумя серповидными динамометрическими ключами и, удерживая от вращения муфту **9**, одновременно сообщают обоим стыкам стержня с коннекторами **16** и **16*** проектный натяг.

Процесс удержания от вращения муфты **9** можно исключить, если на её торец, обращённый к корпусу стержня, нанести антифрикционное покрытие. Это позволит одновременно снизить и момент окончательной затяжки стыков стержня с коннекторами **16** и **16***.

Важнейшие отличия этого решения, от ранее известных, состоят в следующем:

во-первых, по концам стержня расположены соединительные механизмы, которые значительно отличаются друг от друга;

во-вторых, при свинчивании стержневых элементов с узловыми элементами возможно применение механизированного инструмента.

Новизна этих признаков использована в заявке на изобретение, поданной в Патентное ведомство Германии (Die Anmeldung hat das Aktenzeichen 20 2020 005 356). По этой заявке уже получено положительное решение в виде патента на полезную модель.

Рассмотрение заявки в Германском патентном ведомстве продолжается, т.к. она подана с возможностью выдачи патента на изобретение, а этот вопрос требует для своего решения гораздо больше времени. Обычно это на это требуется около года.

2.4.8 К решению *Задачи 2.4* для типовых «сжатых» стержней.

Для свинчивания типовых «сжатых» стержней с коннекторами **16** рекомендуется конструкция соединительного механизма, изображённая на [рис. 2.7](#). Поскольку при сжатии резко снижается опасность хрупкого разрушения швов, снижается эффективность применения бесшовного корпуса. С другой стороны, способу свинчивания и затяжки стыков путем вращения корпуса стержня здесь мешает большая масса стержня.

Таким образом, здесь наиболее уместен механизм соединения КТ-II, приведенный на [рис. 2.7](#) и несколько скорректированный в соответствии с патентом [32]. Правда, это решение не удовлетворяет *особому* требованию 2) в п. 2.4.2, но это касается сравнительно небольшого количества стержней (до 20%), изготовленных для определённого объекта. Как правило, в этих стержнях не требуется оперативная замена деталей соединительных механизмов.

2.4.8 К решению *Задачи 2.4* для типовых «растянутых» стержней.

Для стыковки типовых «растянутых» стержней круглого сечения с коннекторами конструкцию соединительного механизма можно выполнить так же просто и эффективно, как и для «рядовых» стержней. Наиболее интересен вариант, изображённый на [рис. 2.8](#) и, в принципе, не отличающийся от соединительных механизмов для «рядовых» стержней ([2.5](#)). Технология его сборки также не отличается от изложенной в п. 2.3.2.

Особо выделю вариант, изображённый на [рис. 2.9](#), когда два или несколько «растянутых» стержней расположены соосно в уровне, например, нижней поясной решетки и к каждому коннектору примыкает два таких стержня. В этом случае соединительный механизм представляет собой резьбовую шпильку, имеющую по концам резьбы одного или различного диаметра и шага.

Сборка стыков с помощью таких шпилек выполняется следующим образом:

- коннектор **16** устанавливают вплотную к ранее установленному стержню **2**;
- шпильку пропускают сквозь коннектор и ввинчивают в наконечник ранее установленного стержня с помощью, например, шпильковерта;
- на свободный конец шпильки навинчивают очередной стержень, вращая его корпус с помощью того же инструмента, который используют при сборке «рядовых» стержней;
- для предварительной затяжки стыков по поз. 3) в п. 2.4.1 используют серповидные ключи;
- для окончательной затяжки стыков по поз. 4) в п. 2.4.1 используют серповидные ключи, снабжённые динамометрическими вставками.

2.4.9 При сборке каркаса, включающего шаровые коннекторы типа «ZÜBLIN» возникает вопрос о временной фиксации шайб **12*** в положении, обозначенном, например, на [рис. 2.5](#). Фиксация шайб **12*** может быть осуществлена многими способами, каждый из которых требует экспериментальной проверки. Наиболее просты способы намагничивания шайбы **12*** или её установки на поверхность коннектора с помощью консистентной смазки, но при этом возможно попадание в контактную зону различных загрязнений. Более сложно, но, возможно, эффективнее подобрать материал и конфигурацию пробки **18**, которая при ввинчивании шпильки **6** в отверстие коннектора **16*** частично или полностью будет продавлено в это отверстие.

2.5 Ручной инструмент для механизированной сборки-разборки каркасов.

2.5.1 В Германское патентное ведомство подана заявка на полезную модель (изобретение), которая зарегистрирована под № **20 2023 000 520**. Правда, положительное решение по этой заявке пока не получено, но в Германском патентном ведомстве рассмотрения срок рассмотрения подобных заявок достаточно велик.

1. Предлагаемое изобретение относится к области монтажа и демонтажа каркасов, составленных из строжневых элементов и шаровидных соединителей (коннекторов). При монтаже таких каркасов возникает необходимость вкручивать конец строжневого элемента, несущего резьбу, в резьбовое

отверстие шаровидного соединительного элемента. При этом для работы доступна только боковая поверхность стержневого элемента.

2. В различных вариантах стержневых элементов на них могут быть выполнены либо отверстия для работы серповидным ключом, либо шестигранники для работы рожковым ключом и в том и в другом случае это долгий и трудоёмкий процесс.

На производстве пытаются механизировать эти операции за счёт использования трещотки, на выходном валу которой устанавливают рабочий ролик, предназначенный для взаимодействия с боковой цилиндрической поверхностью закручиваемого или выкручиваемого стержневого элемента.

3. Такая усовершенствованная трещотка позволяет гораздо быстрее производить монтаж и демонтаж каркасов, но имеет существенные недостатки. В ней сила прижима рабочего ролика к цилиндрической поверхности стержневого элемента регулируется вручную. Это приводит к большим боковым усилиям, направленным перпендикулярно оси стержневого элемента, что мешает работе.

5. Я для предлагаю усовершенствования и для ручного инструмента: ввести пластину параллельно плоскости рабочего ролика, а, на этой пластине установить опорный ролик, ось которого параллельна выходному валу трещотки. В этом случае усилие, передаваемое рабочим роликом стержневому элементу в направлении, перпендикулярном оси стержневого элемента, будет компенсироваться опорным роликом.

В этих пяти пунктах содержится, в основном, содержание изобретения, которое которое более подробно изложено в описании изобретения за № 20 2023 000 520.

РАЗДЕЛ III

Конструкция, технология изготовления нетиповых элементов каркаса

3.1 Общие положения

Нетиповые элементы входят в типовые и нетиповые каркасы «КК», которые уже сейчас очень разнообразны по компоновке и конструкции и это разнообразие довольно быстро увеличивается. В данном разделе рассмотрены лишь некоторые нетиповые элементы, подобные разработанным мною для каркасов покрытия из РАЗДЕЛА I:

- 1) опорные узлы;
- 2) «изгибаемые» стержни верхней стержневой решётки в беспрогонных каркасах;
- 3) элементы подкрепления структурного каркаса затяжками и шпренгелями.

Эти элементы должны отвечать **общим** требованиям **функциональности и экономичности**, а также требованиям национальных нормативных документов. При этом должны быть учтены ранее уже принятые конструктивно-технологические требования и использованы отвечающие им решения для типовых и нетиповых элементов каркаса. В каждом конкретном случае использования ранее рекомендованных технических решений необходимо провести расчеты на прочность наиболее ответственных деталей, например, методом конечного элемента. Нетиповые элементы могут отличаться. Поэтому они рассмотрены в этом разделе особо.

3.2 Опорные узлы и опорные узловые элементы.

3.2.1 **Задача 3.1** состоит в разработке конструктивных решений и технологии изготовления опорных элементов каркаса, удовлетворяющих всем требованиям, перечисленным в п. 2.1.3.

Опорный узел включает типовой коннектор и, следовательно, зависит от его конструкции. Принятый в качестве типового коннектор «ZÜBLIN», оказывает на конструкцию и технологию выполнения опорного узла положительное влияние. Его сферическая наружная поверхность соответствует сферической контактной поверхности опорных коннекторов, которые использованы в проектах покрытий ([1.6](#) и [1.7](#)), но в этих случаях потребовалась дополнительная обработка заготовок.

Более подробного рассмотрения здесь заслуживает вопрос об использовании болта **5** для восприятия отсоса в такой, например, ситуации, которая обрисована в п. 1.3.4. Оценка усилия отсоса, которое этот болт воспринимает в покрытии магазина, дала значение около 7 Тс, т.е. меньшее, чем несущая способность болта М18 на растяжение независимо класса прочности выше 4.6 (по ГОСТ 1759.4 - 87). Если же ориентироваться на высокопрочный крепеж класса 10.9, то болт или шпилька М16 имеет минимальную прочность 16.6 тс и может быть использована как крепеж, воспринимающий отсос, практически, во всех случаях, упомянутых в РАЗДЕЛЕ I.

Исходя из этого и с учетом опыта разработки каркасов покрытия в подразделах **1.3 - 1.7**, на [рис. 3.1](#) предложен вариант опорного узла, где в качестве коннектора использован типовой узловой элемент типа «ZÜBLIN», а отсос воспринимает болт **5** (М16). В этом решении сферическая поверхность коннектора **1** опирается на коническую поверхность ложа **2**, которое диаметром несколько меньше коннектора **1** и может быть обработано на любом токарном станке. Ложе **2** приварено к опорной плите **3**, которая имеет отверстия **4** под монтажные болты. Кроме того между ложем **2** и опорной плитой сварены фасонки **6**, подкрепляющие опорный контур ложа **2** и опорную плиту **3**. Болт **5** при навинчивании на него гайки **7** опирается своей сферической головкой на коническую поверхность ложа **2**, сохраняя возможность свободно поворачиваться вокруг центра сферической головки. Повороту болта вокруг его оси препятствует надрез в его головке и штифт **8**, пронизывающий корпус ложа **2** и головку болта **5**. Выпадение штифта из отверстия ложа **2** препятствуют фасонки **6**, приваренные в соответствующих плоскостях. Гайка **7** опирается на сферическую поверхность коннектора **1** через шайбы, плоскую **9** и сферическую **10**.

3.2.2 Решение, приведенное в предыдущем пункте недостаточно универсально. Его применимость ограничена, прежде всего, углом наклона коннектора **1** к горизонту, который не должен превышать

5°. Этот угол приблизительно соответствует углу наклона жестких кровель (10%), но даже среди объектов, упомянутых в РАЗДЕЛЕ I имеются такие, где этот параметр значительно превышен. Например, угол уклона покрытия над дельфинарием в Сочи равен 7°.

Когда угол наклона коннектора в опорном узле не превышает 30°, решение, изображённое на рис. 3.2 может быть использовано, но с некоторыми дополнительными усложнениями. В этом случае опорные столики на колоннах можно выполнить с нулевым уклоном, а уклон коннектора около 30° создать введением между опорным коннектором и столиком клиновой детали 11. Угол наклона опорного коннектора здесь также ограничен, т. к. угол, который на рис. 3.2 равен 11° и не должен быть меньше нуля.

3.3 Стержневые «изгибаемые» элементы и их стыки с коннекторами.

3.3.1 Нетиповые «изгибаемые» стержневые элементы блока обычно проектируют так, что они воспринимают в беспрогонном каркасе вертикальные нагрузки от вышележащей кровли, а также растягивающие или небольшие сжимающие усилия. Корпусная деталь такого элемента может быть выполнена из сплошного или составного профиля развитого по вертикали.

«Изгибаемые» стержни из стандартного сплошного профиля использованы в проекте опытного блока 24 x 12 м, испытанного в Кисловодске в 1987г (1.1). Здесь прогоны из гнутого швеллера соединены непосредственно с узловыми элементами и одновременно выполняют функции стержней верхней решетки структуры, направленных поперек ската. Это решение при всей своей простоте имеет существенные недостатки. Во-первых, высота каркаса покрытия несколько завышена и, соответственно, завышен отапливаемый объем здания. Во-вторых, кровельный настил, например, профнастил сильно удалён от центра узлов, верхней поясной решетки, что мешает возможному его включению в работу структуры. С учетом этих замечаний данное решение было рекомендовано к массовому применению.

В патенте В. К. Файбишенко предложено выполнять «изгибаемые» стержни из двутаврового профиля, но сам он этим приемом уменьшить количество элементов структуры нигде не пользуется. По крайней мере, об этом нигде не говорит в своих текстах [9]. Я напротив, считаю этот прием уменьшения количества элементов достаточно универсальным эффективным. Он, например, применен в проекте «Миллион мелочей» в г. Москва (1.5) и во многих других моих проектах [15]. Соединение переходного наконечника с двутавровой корпусной деталью в обоих этих случаях выполнено сварным с прорезкой в стенке двутавра у его торцов окон, но эти решения совершенно различны по конструкции соединительного механизма. В решении В. К. Файбишенко крепежный болт соединительного механизма пронизывает планку, играющую роль переходного наконечника. В остальном оно повторяет решение «MERO» с поправками из системы «МАРХИ» [50]. Соответственно, здесь повторяются недостатки «MERO», включая невозможность смены крепежных деталей и механизации сборочных операций.

Вообще-то, удивительно что это решение удалось защитить патентом (№2577339), т. к. перед тем это решение применялось в типовом решении «Кисловодск».

В моём решении (1.5) «изгибаемый» стержень снабжен переходными деталями в виде наконечников, которые соединены с корпусной деталью коротышами 5 из квадратного профиля. Одним концом они приварены к переходному наконечнику 4, другим - к полкам двутавра 6. В этом решении соединительный механизм включает шпильку со сплошной правой резьбой и специальную гайку, которая имеет торец с шестигранным углублением под прутковый ключ. Из рисунков видно, что «изгибаемый» стержень в каркасе покрытия магазина в Бибирево более трудоемок в изготовлении, но надежнее при растяжении, чем по патенту В. К. Файбишенко. Кроме того, моё решение отвечает всем требованиям к соединительному у механизму, изложенным в п. 2.3.2.

В частности, механизированная сборка стыка, изображенного на рис.1.5 (вид по «2 - 2»), с помощью углового механизированного инструмента, включает следующие операции:

- шпильку 2 пропускают сквозь наконечник 4 и ввинчивают в коннектор 1 с помощью углового механизированного инструмента;
- гайку 3 вводят в полость наконечника 4 и наживляют её резьбу с резьбой шпильки 2;
- гайку 3 свинчивают со шпилькой 2 с помощью механизированного углового инструмента;
- гайку 3 затягивают с помощью пруткового ключа с динамометрической вставкой.

3.3.2 Для стыковки «изгибаемых» элементов с коннекторами применяют различные конструкции соединительного механизма в зависимости от значения воспринимаемого им продольного усилия. Так, описанный выше «изгибаемый» элемент рассчитан на восприятие продольных усилий до +30 Тс, но в том же каркасе имеются двутавровые «изгибаемые» элементы с усилиями не более +2 Тс. Конструкция сопряжения такого элемента с коннектором изображена на рис. 1.5 (вид по «1 - 1»).

Выполняется такое сопряжение в следующей последовательности:

- в крепежные отверстия коннекторов ввинчивают до отказа шпильки из хорошо свариваемого материала повышенной прочности, например, 09Г2С;
- коннекторы соединяют скобой, задающей проектное расстояние между их осями;
- «изгибаемые» элементы с вырезами, выполненными заранее по его концам, одновременно с обоих концов устанавливают на шпильки и приваривают их к шпилькам монтажной сваркой.

Такая конструкция и технология, примененные на данном объекте, не рекомендуются к массовому применению, т.к. требуют для своей реализации монтажной сварки, что нежелательно.

3.3.3 В приведенных примерах не использованы эффективные тонкостенные профили, которые нашли широкое применение в авиационной промышленности. Оборудование и технология для их производства хорошо изучены и реализованы в таких организациях, как ОАО «Ульяновский НИАТ», ООО «Спецтехнология» и НПО «ИДМ» (г. Ульяновск [44]). Среди производимых здесь профилей наиболее интересны Z и Σ - образные, но оборудование для их изготовления слишком дорого для небольшого предприятия. Простейшее решение этой проблемы состоит в том, чтобы заказать опытную партию профилей на предприятии, где такое оборудование имеется, но тогда встанет вопрос о цене такого профиля и, следовательно, о целесообразности его применения.

В настоящее время цена эффективных тонкостенных профилей составляет около 75000 рублей за тонну, что более, чем в 1.5 раза больше цены гнутых швеллеров по ГОСТ 8278-83. Такое соотношение цен явно не способствует пока поискам в данном направлении.

3.3.4 «Изгибаемые» элементы составного профиля широко применялись мною в беспрогонных структурных каркасах. Впервые они использованы в виде «изгибаемых» элементов, сваренных из двух или трёх уголков в покрытии склада в городе Видное (1.3 - по «В - В»). Затем, подобные решения были приняты в покрытии склада в Новочеркасске, а также в покрытии ТРЦ «Горизонт» в Ростове-на-Дону (1.3; 1.7; 1.8). *Цена «изгибаемого» стержня с таким профилем и его вес ниже цены элемента из двутавра, что несколько компенсируется его повышенной трудоемкостью.*

Особенность конструкции покрытия ТРЦ состоит в том, что здесь в верхнем ярусе структурного каркаса применены коннекторы, изготовленные из хорошо свариваемой, но достаточно прочной стали 09Г2С (1.8; узел «А»). К коннекторам на заводе приварены уголковые коротыши 6 с отверстиями, используемые для стыковки «изгибаемого» стержня с коннектором. При расчетном продольном усилии до ±2 Тс соединение «изгибаемого» элемента с коннекторами при сборке каркаса выполняется без использования специального соединительного механизма. После того, как «изгибаемый» элемент установлен в проектное положение, его соединяют по концам с уголковыми коротышами болтами М16 с последующей обваркой стыков монтажной сваркой.

Когда усилие растяжения в стержне составляет около 10 тонн, его профиль состоит из трубы и двух уголков, а труба снабжена по концам соединительными механизмами системы «Кисловодск». Такой «изгибаемый» стержень вначале стыкуют с коннекторами с помощью встроенных в него соединительных механизмов «Кисловодск», а затем скрепляют с ними болтами и монтажными сварными швами (1.8; узел «А»; по «1 - 1»).

3.3.5 Эти примеры приведены для того, чтобы показать, как разнообразны могут быть возможные конструктивные решения «изгибаемых» стержней и технологии их стыковки с коннекторами. По-видимому, в настоящее время наилучшими показателями обладают «изгибаемые» стержни составного сечения. Кроме того они имеют ряд существенных преимуществ, среди которых наиболее важны свобода выбора состава профиля, а также формирования конструкции стыков с коннекторами. Однако в

перспективе со снижением цен на тонкостенные Z и Σ именно эти профили могут оказаться наиболее экономичными для выполнения «изгибаемых» элементов.

3.3.6 Предложение Неласова В. С. и Файбишенко В. К. о применении системы развернутой на 45° неоспорно. По крайней мере мои попытки выяснить, каковы могут быть источники получаемого при этом выигрыша не принесли ожидаемого результата. Возможно, я при этом не знал какого-то элемента системы, который и определял её эффективность в данном случае, т.е. признака, по которому можно было бы отличить данное решение от существующих решений [58].

3.4 Конструкция и технологии выполнения шпренгелей и затяжек

3.4.1 В данном подразделе рассмотрены нетиповые элементы затяжек и шпренгелей, а также их узловые сопряжения между собой и с коннекторами структурной конструкции. Исходным материалом для этого послужили мои разработки, изложенные в подразделах 1.1 - 1.8. Подкрепление блока на рис.1.1 выполнено по схеме шпренгеля. Проект усиления каркаса покрытия ТРЦ в Ростове на Дону включает в качестве подкрепляющих элементов ряд затяжек (1.10).

Тему настоящего подраздела невозможно полностью раскрыть на основе объектов из первого раздела книги. Поэтому возникла необходимость привлечь к этой работе проекты, выполненные в последнее время, но ещё не реализованы. В частности, использован проект каркаса покрытия манежа для г. Ростова - на - Дону, расчет которого выполнен во второй половине 2019 года [73].

3.4.2 Элементы затяжки из гнутого швеллера 120 x 60 x 5 мм применены в блоке покрытия 24 x 12 м, описанного в п.1.1. Такой выбор был определен, в основном, тем, что в этом блоке уже были применены швеллеры такого же сечения в качестве прогонов. Этот аргумент важен для типовой конструкции, в качестве которой и разрабатывался блок 24 x 12, но вообще-то его нельзя отнести к существенным. Более важными представляются другие требования из п. 2.1.3, например, простота и экономичность самой затяжки и её стыков с коннекторами. Следуя этому требованию необходимо, прежде всего, выбрать профиль проката для затяжки, цена которого была бы минимальной при конструктивной его вариативности и доступности. Наиболее приемлемым по этим показателям оказывается прокатный уголок. Довольно близка к нему по цене полоса из стали 09Г2С, но она уступает уголку по своим конструктивным возможностям.

Рис. 3.3 и рис. 3.4 представляют примеры решения узлов «В» и «Г» шпренгельной схемы, подкрепляющей блок по п. 1.1. В узле «В» роль соединительного механизма играет резьбовая шпилька 2 с двумя гайками. На рис. 3.3 изображен стык. элемента затяжки с типовым коннектором типа «ZÜBLIN». Здесь шпилька 2 пронизывает типовой коннектор 1 и полосовые наконечники 3 элемента затяжки «а» из двух неравнополочных уголков 4, соединенных накладками 5.

На рис. 3.4 показан узел соединения двух элементов затяжки «а» и «б», а также шпренгельной стойки «в». Здесь шпильки 2 ввинчены в массивный цилиндр 6 сквозь наконечники 3 элементов затяжки «а» и «б». Стойка «в» в узле «Г» соединена с цилиндром 6 шпилькой 7, которая одним концом ввинчена в него. Другой конец шпильки, на который навинчены гайки 8, вставлен в переходный наконечник 9 стойки «в», что позволяет с помощью гаек 8 регулировать усилие в затяжке.

В прежнем решении, уже использованном в блоке покрытия 24 x 12 x 300, предусмотрена фрезеровка швеллера 12 x 60 x 5 мм по концам элементов затяжки длиной около 6 м (1.1). Это требует значительных свободных производственных площадей и соответствующего оборудования, что не всегда доступно малому предприятию. Решения, приведенные на рис. 3.3 и рис. 3.4 имеет не только технологические и экономические преимущества, но и более универсально, т.к. не связывает так жестко размеры профиля затяжки с размерами коннектора.

3.4.3 Элементы затяжки кругового профиля использованы в проекте усиления каркаса покрытия внутреннего двора ТРЦ в Ростове-на-Дону. Покрытие возведено в 2003-4 г. по моему проекту из несколько изменённых элементов системы «Кисловодск», изготовленных ЗАО КЗМК (подраздел 1.8).

Особенность этого покрытия состоит в том, что оно выполнено искривленным по цилиндрической поверхности с радиусом по верхнему поясу структуры 174 м (1.8). Такая кривизна покрытия достигнута

тем, что в плоскости искривления стержни нижней поясной решетки имеют стандартную длину в осях 3000 мм, а в верхней поясной решетке – 3037 мм. При этом в стыках стержневых элементов с узловыми, выполненными без учета искривления каркаса, возникли бы угловые погрешности 0.5° и линейные погрешности около 1 мм. Обе эти погрешности скомпенсированы следующими изменениями в конструкции стержней и их соединительных механизмов:

- контактная поверхность головки болта выполнена сферической, а сопрягаемая с нею торцевая поверхность переходного наконечника, выполнена конической;
- контакт сферического торца приводной муфты с граненым коннектором «Кисловодск» также осуществлен через сферическую шайбу (1.6 - узел «А»).

Элементы затяжек кругового профиля можно соединять с узловыми элементами структурного каркаса и между собой с помощью тех же стаканов и муфт, как и типовых «растянутых» элементов (2.7 и 2.8), однако, возможны и другие решения.

3.4.4 На рис. 3.6 приведен вариант проекта усиления каркаса покрытия ТРЦ в Ростове-на-Дону.

Усиление каркаса покрытия запроектировано в виде трёх затяжек между вершинами опорных капителей по осям 3, 5, 7, (1.10). Особенность данного варианта состоит в том, что он включает опорный коннектор, наклонённый к горизонту под углом около четырёх градусов. Такой угол наклона позволяет применить решение опорного узла, изображённое на рис. 3.1 включающее опорный коннектор типа «ZÜBLIN». Здесь нетиповой опорный коннектор типа „ZÜBLIN“ состыкован с элементом затяжки «а» через хомут, который включает:

- переднюю траверсу 3 с усиливающим её диском 4, имеющим осевое резьбовое отверстие М36;
- две высокопрочные шпильки 5 из стали 40Х с резьбами М16 по концам;
- заднюю траверсу из бруска 6 сечением 50 x 50 с круглой вставкой 7, контактирующей с коннектором по своей конической поверхности.

Хомут подвешен к опорному коннектору через грибки 8 с отверстиями в шляпках, через которые пропущены шпильки 5.

Сборку хомута и стыка элемента «а» с коннектором выполняют в следующей последовательности:

- в опорный коннектор вставляют грибки 8;
- шпильки 5 ввинчивают в траверсу 6, и пропускают сквозь отверстия в шляпках грибков 8;
- траверсу 3 надевают на шпильки 5 и слегка навинчивают на них гайки 10;
- устанавливают на место отрезок трубы 9 и до упора подтягивают гайки 10;
- элемент «а» ввинчивают в переднюю траверсу по резьбе М36.

3.4.5 На рис. 3.7 изображен арочный блок покрытия манежа размером в плане 53 x 12 м с применением следующих условных обозначений:

- сплошные утолщенные линии – жесткие на изгиб элементы каркаса;
- пунктирные утолщенные линии - элементы затяжки из гибких стержней;
- пунктирные тонкие линии – гибкие подвески из прутка.

Пять таких блоков в каркасе покрытия, расположены с интервалом 4 м и соединены между собой прогонами или «изгибаемыми» элементами каркаса. Каждый блок снабжён двумя затяжками длиной 45.72 м, которые содержат по восемь элементов (4 элемента «а» и 4 элемента «б»). Узлы стыковки элементов затяжек «а» и «б» соединены с арочным каркасом структурного блока жесткими стойками «в» и гибкими подвесками. Посередине каждого блока состыкованы 4 элемента затяжки «б», которые соединены со структурным каркасом жёстким элементом «в» гибкими подвесками.

Собираемость такого блока можно обеспечить, если при изготовлении элементов затяжки использовать несимметричный допуск на их длину $11.43 + \Delta$, где $+\Delta$ - положительный допуск, оптимальное значение которого зависит от допусков на длину типовых элементов структурного каркаса. Слабина затяжки, определяемая Δ , может быть устранена с помощью гаек 11. Более того, гайки 11 позволяют получить

заданное предварительное напряжение затяжки. Конструкция затяжек и их работа имеют следующие особенности (3.5).

Во-первых, каждый элемент затяжки включает четыре ветви круглого сечения и две переходные детали **6** из прочной хорошо свариваемой полосы, например, из стали 25Г2С, которые приварены по концам ветвей. В каждом элементе затяжки его ветви соединены между собой планками **7** на сварке с шагом около 3 м. Элементы затяжки объединены попарно шпильками **8** (3.5 - по «В - В»).

Во-вторых, для стыковки элементов затяжки используют высокопрочные шпильки из стали 40Х.

В частности, для стыковки затяжки с типовым коннектором типа «ZÜBLIN» рекомендую шпильку **2**, выполненную из калиброванной стали 40Х не менее Ф27. В предлагаемом решении этого стыка коннектор требует небольшой доработки, которая заключается в проточке двух цилиндрических участков **5**. В узлах стыковки элементов «а» и «б» применимы шпильки меньшего диаметра от М16 до М22. Это относится и к центральному узлу затяжки, где стыкуются четыре элемента «б».

В-третьих, в трёх средних стыках затяжки, где соединяются элементы «б», основную нагрузку воспринимают шайбы **14** с буртами, которые передают её на цилиндрические стенки канавок, проточенных в полосовых переходных деталях затяжек. Аналогична передача усилия от затяжки к коннектору на его цилиндрические выступы **5**, хотя здесь значительная часть усилия затяжки передаётся на поверхность шпильки **2**. Углубления в переходных деталях **6** могут быть выполнены без чрезмерных затрат с только на современных обрабатывающих центрах и это следует учитывать при использовании предложенного решения.

В-четвертых, надежная передача значительных усилий на узкие поверхности буртов обеспечена благодаря применению прижимных шайб **4** и **14** с кольцевыми буртами по контуру. Большое предварительное натяжение шпилек, которое поддерживается упругостью высокопрочных шайб **4** и **14** усиливает это эффект.

3.4.6 После того, как структурный каркас арочного блока покрытия собран, его стыки с затяжками по рис. 3.5 выполняют в следующей последовательности:

- 1) шпильку **2** вставляют в отверстия коннектора;
- 2) переходные детали **6** надевают на выступы **5**;
- 3) переходные детали **6** фиксируют гайками **3** через шайбы **4** так, чтобы со стороны элемента «г» оставался участок резьбы достаточный для его присоединения к данному узлу;
- 4) переходной наконечник элемента «г» навинчивают на конец шпильки **2** до упора в гайку **3**;
- 5) элементы «а» и «б» располагают относительно блока в положении близком к проектному;
- 6) разводя элементы «а» и «б», вводят между ними шпильки **8** и фиксируют их гайками **8***;
- 7) на шпильку **9** навинчивают гайки **11** и ввинчивают её в цилиндрическую распорку **10**, элемент «в» подвешивают к арочной структуре;
- 8) бортовые шайбы **12** устанавливают в проектное положение по скользящей посадке, шпильку **9** вставляют в осевое отверстие наконечника элемента «в»;
- 9) распорку **10** вставляют между шайбами **12** ;
- 10) устанавливают в проектное положение шпильку **13**;
- 11) на концы шпильки **13** надевают шайбы **12***, упругие шайбы **14** и навинчивают гайки **15**.

Все перечисленные операции повторяют справа и слева от плоскости симметрии блока. Посередине каждой затяжки, где стыкуются четыре одинаковых элемента «б», выполняют операции 7) ÷ 10). После выполнения указанных сборочных операций производят регулировку предварительного натяжения затяжек блока с помощью гаек **11**, проверяют с помощью нивелира взаимное расположение затяжек и поддерживающих их элементов, производят окончательную затяжку всех шпилек **2**, **13** и т.д.

Вариант элемента затяжки из четырех стержней круглого профиля не единственный и, возможно, не самый экономичный. В нижней части рис. 3.5 приведен другой вариант сечения «В – В», который включает четыре уголкового профиля. В этом варианте возможно увеличение шага соединительных

планок 7 до 4-х или даже 6 м, сборка затяжки упрощена. Существенный недостаток этого решения состоит в сложности контроля и восстановления антикоррозийного покрытия затяжки.

РАЗДЕЛ IV Расчет структурных «КК» - каркасов и элементы их оптимизации

Разработанная нами расчетная программа вначале не отличалась новизной, но нашла широкое применение в расчетах типовых структурных покрытий «Кисловодск» для зданий комплектной поставки, которые разрабатывал в то время институт ЦНИИПроектлегконструкция (ЦНИИЛМК). В частности, в первой версии программы от 73-го года были использованы варианты составления и решения системы канонических уравнений из книги [6]. В дальнейшем наши усилия были направлены, прежде всего, на борьбу с ограниченными возможностями вычислительной техники. Кроме того, много внимания было уделено рациональному формированию исходных данных для расчета с учетом особенностей структурных каркасов и их оптимизации в процессе расчета.

4.1 Постановка задачи по разработке программы N_2015

Современный комплекс требований к программе N_2015 был сформирован около 2015 года и несколько расширен в течение 2017 – 19 годов до своего теперешнего состояния. Важно, что процессы расчета и оптимизации каркаса были признаны различными, хотя они взаимозависимы.

Во-первых, при достаточной производительности и соответствии требованиям СП 16.13330.2011 специализированная программа должна обеспечивать:

- 1) автоматическое построение регулярной геометрической 3D схемы (чертежа) структурного блока покрытия в среде Автокад;
- 2) учет типа стыка **Тип-і** или заданного уровня изгибного взаимодействия элементов каркаса, который определяется, в т.ч. моментом затяжки стыков;
- 3) введение в каждом узле блока опорных связей и нагрузок по трем координатам **X, Y, Z**;
- 4) автоматическое вычисление усилий **N** и автоматический подбор сечений **A** для каждого стержня расчетной модели из заданного **A-перечня**, выбранного из принятой таблицы **Тип-і**;
- 5) автоматический вывод результатов расчета модели блока на его чертеж;
- 6) автоматическое построение и вывод на печать спецификации элементов блока в каждом варианте расчетной модели, содержащей показатели ее металлоемкости и трудоемкости.

Во-вторых, программа должна обеспечивать возможность корректировки расчетной модели блока путем:

- 7) удаления «лишних» связей (стержней) из регулярной геометрической схемы или введения в расчетную модель дополнительных стержней и узлов, усиливающих регулярную структурную несущую конструкцию;
- 8) поворота геометрической схемы блока или какой-либо его части относительно оси, задаваемой на плане покрытия, с последующим восстановлением нарушенных связей (стержней) между узлами неподвижной и наклоняемой части блока;
- 9) изменения (увеличения) модуля **l**, равного шагу узлов (в осях) в поясных сетках структуры;
- 10) изменения высоты **h** структуры.

В-третьих, программа должна обеспечивать определение несущей способности сжатого стержня структуры с учетом рекомендации, изложенной в п.10.2.6 СП 16.13330.2011, путем:

- 11) уточненного значения несущей способности сжатых стержней с учетом их взаимодействия с сопряженными элементами каркаса и вывод на экран результатов этих расчетов в виде таблицы «**μ**» и промежуточных результатов;
- 12) использования уточненного значения несущей способности сжатых стержней из таблицы «**μ**» для корректировки сечений, найденных из автоматического расчета каркаса;
- 13) использования уточненного значения несущей способности сжатых стержней из таблицы «**μ**» для формирования исходных таблиц **Тип-і** и **A-перечень**.

В-четвертых, программа должна обеспечивать вывод на печать документов, необходимых для формирования проектной документации в цветном и черно-белом исполнении, в том числе:

- 14) результатов расчета, полученных по п. 3) для каждой из решеток структуры (верхней - **В**, раскосной - **Р**, нижней - **Н**) и для блока в целом (**Всё**);
- 15) результатов вычисления перемещений по **X, Y, Z** всех узлов блока;
- 16) таблицы значений нагрузок, прилагаемых к узлам блока по **X, Y, Z** по п. 2), а также таблицу типоразмеров стержней, использованных в данном блоке **A-перечень**.

4.2 Процесс расчета структурного блока по программе N_2015.

Данный подраздел содержит изложение и обсуждение тех, функциональных особенностей программы N_2015, которые позволяют реализовать вышеперечисленные требования.

Кнопка «N», расположенная в левом верхнем углу монитора в строке инструментов Автокад выводит на экран монитора список панелей управления в строке Панель: «Исходные», «...».

Из этой строки может быть выбрана любая из панелей в том виде, как они представлены ниже по стрелкам:



4.2.1 Нажатием клавиши **Параметры** на панели «Исходные», получаем список основных параметров, характеризующих каркас и материал, из которого он выполнен. Исходные параметры приняты для N_2015 по умолчанию согласно СП 16.13330.2011 [42].

4.2.2 Параметры, принятые по умолчанию, могут быть оперативно изменены.

После нажатия на панели «Исходные» клавиши **Геометрич. схема** на мониторе появляется окно, в котором предлагается выбор очертания ячейки поясной сетки структуры: квадрат или равносторонний треугольник. Когда этот выбор сделан, в том же окне назначают параметры решеток блока:

- для прямоугольного - n_x, n_y, l, h ;
- для треугольного - n, l, h .

Здесь:

n_x, n_y - количество модулей l вдоль осей X и Y;

l - сторона ячейки в квадратной или треугольной поясной решетке структуры (модуль);

n - количество модулей l на сторону треугольного блока;

h - высота структуры (расстояние между верхней и нижней поясной решеткой в осях).

Нажав в том же окне клавишу **Начертить заново**, получаем 3D чертеж блока в Автокаде, где сечения всех стержней имеют некоторое «нулевое» значение $A = A_0$.

4.2.2 Каждая таблица **Тип-і**, составленная в Excel, соответствует одному конкретному сочетанию заданных параметров структуры:

- типу стыков стержневых и узловых элементов (параметры ρ, Δ);
- длина поясов в осях, несильно отличается от базовых значений ($l = 3000$ или $l = 4000$ мм);

- заданному расстоянию между поясными сетками, т.е. высоте структуры h в осях.

В такую таблицу включены расчетные значения площади кольцевого и круглого поперечного сечения A , а также несущей способности стержня при растяжении $+N^*$ и сжатии $-N^*$ при заданных значениях наружного диаметра D и толщины стенки s . При этом значения $-N^*$ приведены для поясов и для раскосов в отдельности, т.к. длина раскоса и его несущая способность зависит от заданного h .

Таблица **Тур_i** может содержать также экспериментально полученные значения (с литерой «э») несущей способности растянутых стержней, полученные на испытательной установке (2.10).

Кроме того, в таблице **Тур_i** для каждого типоразмера стержня задана масса погонного метра кольцевого профиля $D \times s$ и параметры i - стыка стержня с коннектором:

M - наружный диаметр крепежной резьбы (из рабочего чертежа стержневого элемента).

ρ - изгибная жесткость стыка, приведенная к центру узла. Установка для экспериментального определения ρ и методика её использования подробно описаны на моём сайте [15; p13].

Δ - масса переходных деталей, крепежных и вспомогательных деталей.

Методика определения Δ состоит в следующем. Взвесив стержень любого типоразмера, находим:

$$\Delta = G - g \times l \text{ [Кг]},$$

здесь: G -масса стержня [Кг];

g - масса погонного метра профиля [Кг/м];

l -длина стержня в осях [м].

Объем каждой таблицы **Тур_i** неограничен и постоянно увеличивается при использовании ее в расчете. Для каждого конкретного блока необходимо после выбора конкретного номера i , выбрать из соответствующей таблицы **Тур_i** ряд сечений $D \times s$ и D , которые могут быть использованы в данном не, т.е. блоке. построить таблицу **А-перечень**. Её размер более 20-ти строк.

4.2.3 Процедура введения опорных связей и нагрузок подробно описана в [51; пп. 6.1, 6.2] и выполняется с панели «**Модель**» после нажатия клавиши **Опоры** или **Нагрузка**. На чертеже блока опорные связи обозначаются трехзначным шифром, расположенным левее и ниже самого узла, в котором первая, вторая, и третья цифра означают наличие опор по осям X , Y , Z , причем наличие опоры обозначено единицей, а ее отсутствие - нулем.

Кроме того опорные связи могут иметь определенную длину сечение, имитирующие жесткость элемента каркаса здания, связанного с блоком в данном узле, например, колонны. В этом случае их изображают на чертеже блока через клавишу **Дополн. элементы** на панели «**Модель**» и через клавишу **А-присвоить** на панели «**Коррекция**» присваивают им требуемые сечения A .

Нагрузки также обозначают трехзначным шифром, расположенным выше и правее узла. В этом шифре первая цифра соответствует номеру строки таблицы **Значения нагрузок**, в которой дано значение нагрузки данного узла по оси X . Вторая и третья цифры в шифре соответствуют номерам строк, в которых расположены значения нагрузок данного узла по осям Y и Z .

4.2.4 Расчет блока запускается нажатием клавиши **Расчет** на панели «**Модель**» и начинается с ввода в память машины всех исходных данных. Затем выполняется, собственно, расчет, который включает формирование и решение системы канонических уравнений метода «перемещений» при заданных значениях продольной погонной жесткости EA/l каждого из стержней блока. Поскольку площади сечений заранее неизвестны, их подбор выполняется в три итерации, из которых первая итерация выполняется при «нулевом» значении A_0 , присвоенном всем стержням. В результате подбор сечений производится автоматический из принятого **А-перечня** путем сравнения значений расчетных усилий в каждом стержне с его несущей способностью после выполнения каждой итерации. На каждой последующей итерации расчет производится при значениях, полученных в предыдущей. Казалось бы, точность подбора сечений можно поднять увеличением количества итераций, но было показано прямым экспериментом, что подбор сечений в три итерации, как правило, оптимален.

4.2.5 Результаты расчета блока выводятся автоматически на его чертеж после паузы, задаваемой клавишей **>>3сек** и нажатия клавиши **A+N** на панели «**Модель**». Номер подобранного сечения **A** согласно **A**-перечню изображается вблизи середины стержня; расчетное значение усилия **N** - более мелким кеглем вслед за номером. Эти значения изображаются в том же цвете, что сам стержень, к которому они относятся, но в другом слое Автокада.

4.2.6 После нажатия на клавишу **Спецификация** на панели «**Модель**» выводится для просмотра и печати спецификация элементов блока. Общее количество элементов характеризует трудоемкость блока, а суммарная их масса характеризует его металлоемкость. Текст спецификации сначала появляется на панели отложенных задач в «ворде». Чтобы его увидеть, следует кликнуть «вордовскую» иконку. Перед запоминанием спецификации следует откорректировать её название, указав в нем все необходимые данные о блоке, к которому относится спецификация.

4.2.7 Удаление любого стержневого элемента из чертежа блока, построенного в Автокад, можно выполнить в пределах обычного автокадовского инструментария. Оптимизация геометрической схемы блока по металлоемкости и трудоемкости путем ее разрежения подробно описана в подразделе **4.4**, но могут быть поставлены и иные цели. Так, например, в бесконсольном блоке, который имеет вертикальные опоры по углам (по оси **Z**), обычно, бывают перегружены пояса в приконтурных зонах при недогрузке поясов удаленных от контура. В таком случае выравнивание усилий в поясах может быть достигнуто путем удаления нескольких раскосов в приконтурных зонах без нарушения геометрической неизменяемости блока. При этом, зачастую, возникает неустойчивость процесса выравнивания усилий, которая устраняется фиксацией сечений, т.е. нажатием клавиши **A-фиксировать** на панели «**Коррекция**».

4.2.8 Необходимость в дополнительных элементах возникает, обычно, при усилении регулярной структурной решетки затяжкой или шпренгелем, а также при бесконсольном опирании блоков на колонны. Техника введения дополнительных элементов достаточно подробно описана в [51]. Здесь только отмечу, что дополнительные стержни при их введении имеют «нулевое» сечение. Сечения их подбираются автоматически в результате расчета (п. 4.2.4) или заранее присваиваются вручную через клавишу **A-присвоить**.

Автоматический подбор сечений **A** в три итерации не всегда дает верный и, тем более, оптимальный результат. Для устранения опасных ошибок в программе N_2015 перегруженные стержни выделяются красным цветом на чертеже блока с результатами расчета, которые вызывает клавиша **A+N** на панели «**Модель**». В больших блоках (более 1000 стержней) дополнительный контроль и коррекция сечений перегруженных стержней осуществляется с помощью файла **Red**, который формируется в результате расчета блока и сохраняется в каталоге вместе с другими файлами по данному блоку.

Корректировку результатов расчета можно начать с присвоения перегруженным «красным» стержням с помощью клавиши **A-присвоить** на панели «**Коррекция**» площадей сечения **A**, которые превышают автоматически найденные. Именно для этого **A-перечень** должен быть составлен с некоторым запасом по несущей способности стержней. Если такого запаса нет, то приходится, иногда, корректировать ранее принятый **A-перечень** или даже таблицу **Тип_i**. Правда, здесь все зависит от степени перегрузки стержней. Если перегрузка невелика, то может быть использована та же клавиша **A-присвоить** для присвоения больших сечений стержням, которые расположены и работают параллельно перегруженным. В общем, ком **A-присвоить** используется довольно широко и разнообразно в процессе расчета и оптимизации структурных блоков. В частности, при нажатии клавиши **A-присвоить** растянутых на панели «**Коррекция**», на чертеже блока сиреневым цветом отмечаются те стержни, в которых завышено сечение, подобранное автоматически.

Предлагается его возможное изменение, которое можно подтвердить через клавишу **A-присвоить** или не подтверждать. После корректировки сечений растянутых стержней можно устранить сиреневый цвет с чертежа клавишей **Все в цвете** на панели «**Документы**».

4.2.9 Уклон всему блоку или какой-то его части **придается**, в различных целях, в частности, для:

- организации стока воды с кровли;
- усиления блока элементами типа затяжек и шпренгелей;
- решения архитектурно - художественных задач.

Независимо от цели, поворот блока или его части, осуществляется с помощью клавиши **Уклон** на панели «**Модель**» в той последовательности, которая подробно описана в [51; п.6.4].

4.2.10 Вопрос об изменении высоты каркаса покрытия h возникает, обычно, при необходимости:

- оптимизировать каркас по металлоемкости;
- уменьшить прогибы покрытия;
- уменьшить отапливаемый объем здания;
- унифицировать длины стержней в пределах блока или конструктивного комплекса.

Этот процесс начинается с того, что блок или его часть, где необходимо изменить высоту h , приводится в горизонтальное положение путем устранения уклонов, ранее полученных по [51; п.6.4]. Затем, необходимо нажать клавишу **Геометр. схема** на панели «**Исходные**». В результате на экране снова появляется окно назначения параметров, в котором необходимо вписать новое значение высоты h , а затем нажать клавишу **изменение высоты h** . При этом нижняя поясная решетка блока занимает новое положение, соответствующее измененной высоте. Автоматически включается функция **Стык**, устраняющая разрывы, возникающие при перемещении нижней поясной решетки блока, и через короткое время на экране появляется текст: высота изменена.

4.2.11 Нажатие клавиши **μ** на панели «**Коррекция**» запускает работу подпрограммы «**μ**», сопряженной с подпрограммой «**К**», Результаты их совместной работы выдаются в виде таблицы «**μ**», которая имеет содержание по столбцам:

- 1- 3 - порядковый номер стержня и номера узлов, которые он соединяет;
- 4 - параметры сечения стержня $D \times s$ или D ;
- 5, 7 - значения коэффициентов защемления по концам стержня 1 и 2;
- 6, 8 - отношения $n = K_{max} / K_{min}$ по концам стержня 1 и 2;
- 9 - угол δ между одноименными связями по концам стержня 1 и 2;
- 10 - значение коэффициента расчетной длины μ ;
- 11 - значение N^* несущей способности стержня при сжатии [Тс];
- 12 - коэффициент использования несущей способности N/N^* .

4.2.12 Для корректировки сечений сжатых стержней, найденных автоматически, используется клавиша **А -сжатых** на панели «**Коррекция**». После нажатия клавиш **μ** и **А-сжатых** вычисленные значения усилий в сжатых стержнях сравниваются со значениями несущей способности из таблицы «**μ**» и в случае неверного подбора сечения окрашиваются сиреневым. Эта окраска может быть снята клавишей **Всё в цвете** на панели «**Документы**».

Значения несущей способности стержней при сжатии могут быть приняты в таблицах **Тур_i** в соответствии с уже существующими или специально построенными таблицами «**μ**».

4.2.13 Вывод на печать документов по результатам расчета в цветном и черно/белом виде достаточно подробно описан в [51; п.8].

4.2.14 Нажатием клавиши **Перемещения** на панели «**Документы**» выводят на экран для просмотра и печати значения перемещений всех узлов блока. Значения перемещений узлов каркаса вынесены на его план («слой» Nummer), где они расположены следующим образом:

- номер узла расположен ниже и левее его;
- перемещение по оси X - правее и ниже узла;
- перемещение по оси Y - левее и выше узла;
- перемещение по оси Z - правее и выше узла.

4.2.16 В очередной редакции программы N 2015 конца 2018 года предусмотрен вывод на печать таблиц исходных данных клавишей **Таблицы исходных**:

- **А-перечень** - перечень типоразмеров стержней типа «i», которые использованы в данном структурном блоке;
- таблица значений нагрузок, в узлах блока вдоль осей X, Y, Z по п.3) в подразделе 4.1.

4.3 Работа сжатого стержня в структурном каркасе «КК»

Важнейшим этапом в развитии методов расчета пространственных трубчатых каркасов стало уточнение расчета сжатого стержня на устойчивость. Основные результаты здесь были получены до 2010-го года, когда основным нормативным документом в РФ был СП 53-102-2004. Они изложены в статье [25]. В дальнейшем материалы по этой теме регулярно публиковались на моем сайте [15; p13] и до сих пор они актуальны, т.к. методика проверки устойчивости сжатого стержня по нормам РФ пока не изменилась.

Согласно СП 16.13330.2011, по-прежнему, несущая способность сжатого стержня сильно зависит от коэффициента его расчетной длины μ . В свою очередь, μ зависит коэффициентов защемления концов стержня, которые определяются жесткостью сопряженных с ними элементов каркаса и жесткостью их стыков с узловыми элементами ρ .

В статье ставятся и решаются две основные задачи [25].

Задача 4.1 - вычислить коэффициенты защемления концов для сжатых стержней.

При попытке решить эту задачу стало ясно, что в структурном каркасе «КК» сжатый стержень имеет по концам (1 и 2) пространственные схемы защемления. Эти схемы характеризуются своими главными значениями $K_{1\max}$, $K_{2\max}$ и $k_{1\min}$, $k_{2\min}$, лежащими в двух взаимонормальных плоскостях, проходящих через ось стержня. На концах стержня (1 и 2) могут быть также вычислены значения:

$$n_1 = K_{1\max} / k_{1\min} \quad \text{и} \quad n_2 = K_{2\max} / k_{2\min}.$$

Главные значения K , в общем случае, направлены по концам стержня по-разному, т.е. плоскости, в которых лежат, например, $K_{1\max}$ и $K_{2\max}$, расположены под углом δ , чем и обусловлена неплоская форма продольного изгиба стержня. При $\delta = 0$ или при $n = 1$ на одном из концов (1, 2) стержня продольный изгиб стержня будет плоским.

Уже после опубликования статьи [25], были выведены формулы для коэффициентов K с учетом жесткости ρ сопряжения стержневых элементов с узловыми элементами, приведенной к центру узла. Эти формулы приведены на сайте [15; p.13]. Там же дана методика экспериментального определения жесткости ρ , приведенной к центру узла. Значения ρ , полученные таким путем для некоторых типоразмеров стержней отечественных «КК» систем «МАрхИ» или «Кисловодск», приведены в таблице Тип_1 и составляют от 6000 до 12000. В других таких таблицах (Тип_0, Тип_7) приведены значения $\rho = 10$, т.е. на 3-4 порядка меньше реальных значений ρ . Это означает, что изгибные взаимодействия по концам сжатого стержня в данном случае, практически, не учитываются, а конечное их значение введено для того, чтобы в применяемых формулах исключить деление $\rho = 0$.

Задача 4.2 - вычислить критическую силу сжатого стержня при заданных коэффициентах защемления по его концам, определенных по п. 4.1.1.

В статье [25] эта задача поставлена и решена в следующем виде:

- построена модель центрально сжатого упругого прямолинейного стержня кольцевого (или иного опоры центрально-симметричного) сечения, который имеет на каждом конце шарнирную сферическую, а также две плоскостные взаимонормальные упругие эквивалентные связи, каждая из которых препятствует повороту торца стержня в своей плоскости;

- заданы значения жесткостных характеристик связей и угла, определяющего разницу их расположения по концам: $(k, n)_1, (k, n)_2, \delta$, где: k – минимальные главные значения жёсткости защемления стержня по его концам 1 и 2; n – отношение главных значений жёсткости K/k по концам стержня 1 и 2;
- определить значение критического сжимающего усилия $N_{кр}$, выраженное через безразмерный коэффициент нагрузки $\nu = \pi (N / N_э)^{0.5} = (N / EI)^{0.5}$.

Значение $\nu_{кр}$ отыскивается, как корень уравнения устойчивости стержня

$$\Delta(\nu) = 0,$$

где $\Delta(\nu)$ - матрица коэффициентов канонической системы уравнений, зависящих от ν , а также от заданных значений $(k, n)_1; (k, n)_2; \delta$.

Соответствующее значение $\mu = \pi / \nu_{кр}$.

В момент написания статьи [25] был неясен физический смысл параметра μ в случае неплоского продольного изгиба сжатого стержня. Благодаря аналитическому решению *Задачи 4.2*, полученному В.А. Еремеевым, профессором мехмата ЮФУ, стало ясно, что μ имеет в данном случае тот же смысл, что и при плоском продольном изгибе. Отличие состоит в том, что, рассматривая форму продольного изгиба в различных проекциях, мы видим смещение точек перегиба вдоль оси стержня при неизменном расстоянии между ними, соответствующем расчетной длине стержня [15; p.13].

4.4 Приёмы оптимизации структурных каркасов в ходе их расчета по программе N_2015.

4.4.1 Задача оптимизации структурных покрытий не может быть поставлена в строго математическом смысле даже для одного конкретного объекта. Поэтому в дальнейшем будем понимать под оптимизацией поиск в рамках ограничений, заданных в ТЗ, а также связанных с возможностями производственной базы.

Положим, что в ТЗ на проектирование установлены габаритная схема, нагрузки на покрытие, а также другие ограничения различного рода:

- эксплуатационные ограничения, связанные с назначением объекта;
- ограничения, связанные с возможностями производственной базы;
- структура имеет постоянную высоту h ;
- ячейки поясных сеток квадратные или равносторонние треугольные со стороной l ;
- длина стержней $l < 5$ м, когда сборка каркаса возможна без подъемных механизмов;
- обеспечиваются все нормативные требования СП 16.13330.2011;
- стержни имеют, преимущественно, трубчатое (кольцевое) или круглое сечение;
- другие ограничения, связанные с особенностями каркаса и строительной площадки.

Существуют также возможности увеличения модуля l структуры, что даёт уменьшение количества всех её элементов обратно пропорционально l^2 . Это означает, что параллельно с экономической оптимизацией h , необходимо оптимизировать и l по критерию общего количества элементов в конструкции.

4.4.2 Процесс оптимизации структурного каркаса покрытия начинается с его разбиения на монтажные блоки, исходя из условия, что каждый такой блок в отдельности должен быть собран на «земле» и поднят в проектное положение. При регулярной прямоугольной сетке колонн разрезка покрытия на блоки с зазорами между ними шириной близкой к l даёт наилучшее решение, причем возможны два основных варианта блоков: консольные и бесконсольные. Консольные блоки предпочтительны при прямоугольной сетке колонн, когда пролет значительно больше шага колонн. Если же сетка колонн имеет ячейки квадратные или близкие к квадрату, более экономичны бесконсольные блоки, каждый из которых перекрывает одну ячейку плана. Правда, в этом случае всегда приходится выбирать между нарушением регулярности сетки колонн и нарушением регулярности решеток самого блока. Оба эти

варианта не вызывают больших проблем при изготовлении элементов структурного каркаса на современном оборудовании.

Кроме вопросов, связанных с технологией изготовления элементов, при разрезке каркаса на блоки должны быть рассмотрены и вопросы их подъема на проектную отметку в условиях конкретной строительной площадки. При этом, приведенные выше рекомендации могут быть значительно откорректированы. Соединение блоков после их подъема допустимо, но нежелательно и требует особого обоснования в каждом отдельном случае, так как связано с дорогими и опасными монтажными работами на высоте.

Дальнейшая оптимизация каркаса покрытия выполняется в пределах каждого блока в отдельности с учетом их реального взаимодействия. Могу рекомендовать использование нескольких приемов такой оптимизации, которые могут применяться совместно или независимо друг от друга.

В конце 2018 года я случайно обнаружил новое неожиданное и полезное свойство программы N_2015. Оказывается, она позволяет одновременно считать несколько независимых блоков каркаса, изображенных на одном чертеже. Этим определяется возможность расчета и оптимизации всех блоков, входящих в покрытие без учета и с учетом их взаимодействия через общие опорные узлы.

4.4.3 Удаление «лишних» связей. Известно, что структурные каркасы в высокой степени статически неопределимы, т.е. имеют большое число «лишних» связей, которые не необходимы для обеспечения геометрической неизменяемости системы. Принято считать [54], что наличие «лишних» связей создает высокую безопасность структур, но это положительное их влияние в большой степени нейтрализуется повышенными требованиями к точности изготовления стержней. Допуски на их длину составляют в японских системах «NS» и «КТ» около 0.5 мм, что требует в наших условиях дополнительных затрат. Удаление «лишних» связей - самый простой и универсальный прием оптимизации структурных каркасов. Он позволяет снизить их металлоемкость и, в особенности, трудоемкость, которая зависит не только от количества элементов, но и от требуемой точности их изготовления. Здесь необходимо учесть, что удаление «лишних» связей уменьшает напряжения, связанные с ошибками изготовления стержней по длине и, следовательно, позволяет увеличить эти допуски. Специально проведенное исследование на эту тему показало [64], что для наших условий можно рекомендовать изготовление стержней по длине по 1-му классу точности, чему соответствует поле допуска на длину 1.6 мм (при длине от 2500 до 4000) [70].

Прогонны в прогонных системах можно рассматривать, как лишние связи и их желательно удалить, как таковые. Поэтому почти все каркасы покрытия, рассмотренные в РАЗДЕЛЕ I, запроектированы, как беспрогонные.

4.4.4 Прием выравнивания усилий в стержнях по какому-либо сечению блока используется, обычно, при оптимизации бесконсольных блоков, каждый из которых перекрывает одну ячейку прямоугольной сетки колонн. В таких блоках в сечениях посередине пролета или шага в верхней и нижней поясной сетке, как правило, усилия распределены весьма неравномерно. В приконтурной зоне они велики и резко снижаются к центру блока. Такое распределение усилий нежелательно, т.к. расширяет список используемых марок **А-перечень** и номенклатуру **М** крепежных изделий. Этих неблагоприятных последствий удастся избежать, удаляя в приконтурных зонах раскосы и наблюдая, как это сказывается на распределении усилий в контролируемом сечении. Этот прием может быть использован и в других ситуациях, причем можно удалять не только раскосы, но также и пояса.

4.4.5 Изменение высоты каркаса h . Высота h каркаса влияет на многие его характеристики. В начале моих занятий этой тематикой я попытался оптимизировать отношение высоты структуры к пролету блока (h/L) по его металлоемкости, и оказалось, что оптимальное отношение $h/L= 1/6 - 1/7$. Правда, этот минимум очень нечетко выражен. В пределах изменени $h/L= 1/10 - 1/12$ металлоемкость увеличивается всего на 10 - 12%. Это очень важно, т.к. избавляет нас от необходимости менять высоту h и позволяет отнести ее значение к ограничениям, которые заказчик должен указать в ТЗ, исходя из других требований, например, из минимизации расходов на отопление. Независимо от цели, для изменения высоты h необходимо проделать операции по [51; п. 6.4].

4.4.6 Придание уклона блоку покрытия или его части. В период освоения структурных конструкций в СССР они проектировались только плоскими и горизонтальными под мягкую малоуклонную (1.5 - 3%) кровлю. Так, по-видимому, возник термин «структурная плита». Уже в середине 80-х годов в ЦНИИПроектлегконструкции (ЦНИИЛМК) была поставлена задача по разработке структурного покрытия под жесткую кровлю (профнастил или сэндвичпанели) с уклоном 1/10. Одновременно возникла задача о придании уклона структурному блоку или его части. Тогда же обе задачи были решены. Это позволило предложить новый вариант структурного блока покрытия, перекрывающего 24x12 м при пролёте здания 24 м и шаге колонн 6 м (подраздел 1.1). В этом решении блок покрытия подкреплен двумя затяжками из гнутого швеллера, а его прогоны из того же швеллера 120x60x5 мм включены в работу структурного каркаса, т.к. одновременно выполняют функции стержней верхней поясной решетки структуры, лежащих поперёк ската.

Уже в проекте, упомянутом в предыдущем подпункте, использовано подкрепление структуры шпренгелем. В дальнейшем это решение было развито, что привело к разработке большепролетных арок, подкрепленных затяжками и шпренгелями. Техничко-экономические показатели таких арок, приведены, например, в [15; p.8].

4.4.7 Применение типов стыка стержня с коннектором, имеющих повышенную жесткость ρ и затяжка стыков каркаса. Опыт использования программы N_2015 показывает, что параметр ρ стыка стержня с коннектором очень сильно влияет на тот экономический эффект, который можно получить от учёта изгибного взаимодействия сжатого стержня с другими элементами каркаса. Однако, высокое и устойчивое значение ρ можно получить только путем затяжки стыков достаточно высоким моментом, который не может быть развит при затяжке стыков системы «MERO-KK» и подобных ей отечественных. Прием, успешно использованный в японской системе «КТ» [15; p.8], касается формирования исходных данных таблиц для расчета Тип j, А -перечень и потому он здесь упоминается, но, по существу, обсуждается в РАЗДЕЛАХ II и III.

4.4.8 Включение в работу каркаса покрытия сопряженных с ним частей здания. Этот универсальный прием можно считать не только желательным, но и обязательным при выполнении расчета структурных конструкций.

Часто перемещения в опорных узлах вдоль трёх осей X , Y , Z в расчете не учитывают. Это можно объяснить тем, что в типовых блоках покрытия эти перемещения невелики и в каркасе покрытия вызывают незначительные усилия. В частности, при опирании квадратного типового блока [12] на четыре колонны, заземлённые в фундаментах, перемещения оголовков колонн по осям X и Y составляет около 3 мм, чему соответствует диагональная нагрузка около 0.2 [Тс]. Однако, в других ситуациях, в особенности при подкреплении колонн крестовыми связями, перемещения колонн и соответствующие нагрузки могут быть очень значительными. В таких случаях учет горизонтальной жёсткости каждой колонны на уровне её оголовка становится обязательной. Её определяют и вводят в чертёж блока в следующей последовательности: к опорному узлу колонны на уровне центра его узлового элемента прикладывают единичные нагрузки ρ вдоль осей X и Y , отбросив связанные с ним элементы каркаса покрытия.

В прогонном решении покрытия на узлы верхней поясной решётки кровельный настил опирается через прогоны. Различные варианты включения прогонов в работу каркаса покрытия (беспрогонные каркасы) довольно подробно рассмотрены в РАЗДЕЛЕ I. Хотя задача о включении в работу каркаса покрытия профнастила пока не решена, но ясно, что для этого профнастил должен быть максимально приближен к оси профнастила стержней верхнего яруса структуры, что достигается в беспрогонных каркасах.

Отсюда следует, что решение этой задачи лежит, в основном, в конструктивно-технологической области, но уже сейчас мы можем оценить тот технико-экономический эффект, который может дать включение профнастила в работу структурного каркаса. Для этого необходимо провести натурные испытания любого беспрогонного каркаса покрытия, отвечающего вышеприведенным требованиям по расположению и креплению профнастила. Может быть использовано одно из беспрогонных решений покрытия, приведенных в РАЗДЕЛЕ I. Расчёт этого каркаса следует выполнить без учёта включения в эксперименты профнастила. Можно найти, каков рациональный процент использования жёсткости профнастила в работе каркаса и со 100% его включением, сравнивая результаты этих расчётов с результатами экспериментов.

По предварительным оценкам экономический эффект от включения профнастила в работу структурного каркаса покрытия «КК» может составить порядка 5-7%.

Около 1980 года, во время сейсмических испытаний, я, между прочим, оказался свидетелем такого случая: под расчётной нагрузкой один из болтов в угловой зоне разрушился, но покрытие из профлиста структуры осталось не разрушенным. При ближайшем рассмотрении оказалось, что в этом месте работает профнастил, который получил при этом соответствующие деформации. Конструкция профнастила не была рассчитана на такие усилия и соответствовала вышеупомянутым ограничениям, но сам факт включения настила в работу структурного каркаса был налицо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ниже перечислены наиболее существенные результаты моих разработок (из представленных в книге), а также указаны направления их дальнейшего развития.

1. Подтверждена возможность получения практически равнопрочной корпусной детали для стержня, выполненной из единой трубчатой заготовки вместе с переходными наконечниками, подобно стержням «ZÜBLIN» ([фото 2.1](#)). Здесь экономический эффект ожидается в области производственных затрат на испытания изделий неразрушающими физическими методами. К таким методам относится, например, метод акустической эмиссии, который мне кажется наиболее перспективным, особенно, при повторном нагружении образца.

Разработка системы производственных испытаний требует специальных знаний и опыта. Постановку и решение задач, связанных с разработкой испытательного устройства, а также с методикой испытаний необходимо начать с консультаций, например, с фирмой НПФ «АВЭЖ».

г. Екатеринбург, ул. Первомайская, 109, оф. 300 8 (343) 217-63-84 avek@avek.ru Москва (499) 346-03-88 / Тюмень (3452) 56-76-52 / Челябинск (351) 202-01-48 / Уфа (347) 224-26-52 / Пермь (342) 253-69-75 / Нижний Новгород (831) 429-13-72.

2. Разработан новый метод расчёта несущей способности сжатого стержня в структурном каркасе по неплоской форме потери его устойчивости, что рекомендовано в п.10.2.6 СП 16.13330.2011. Оценка экономического эффекта от такого уточнения расчёта как-то выполнена в п. 1.8.10 книги, но этого явно недостаточно. Весьма желательно показать и проанализировать экономический эффект, который может быть получен благодаря новой методике определения несущей способности сжатого стержня в новом строительстве.

Для этого необходимы объекты, для которых хорошо известны показатели трудоёмкости и металлоёмкости, полученные по традиционной методике. К таким объектам относятся, в первую очередь, типовые структурные покрытия, запроектированные, например, ЦНИИЛМК [12]. Задача состоит в том, чтобы определить металлоёмкость любого каркаса по предлагаемой методике, уточнённой для сжатых стержней и сравнить её с приведенной в [12].

3. Предложен соединительный механизм для «рядовых», т.е. самых массовых типовых стержней. Основное его достоинство перед известными механизмами состоит в возможности применить механизированную сборку каркаса, но эта задача решена пока только в принципе, на уровне изобретения (п. 2.4.6).

Для полного решения этой задачи механизированной сборки каркасов «КК» необходима детальная разработка специнструмента и его экспериментальное апробирование на строительной площадке. Необходимо также решить вопрос о величине гарантированного зазора между внутренними и наружными резьбами в стыке каркаса, т.к. именно он лежит в основе любых вариантов сборки этих стыков.

Эти работы желательно выполнить с помощью и при участии специализированных организаций, такой, как фирма «REMS», известная в РФ [8 \(495\) 788-77-01](tel:84957887701) rinstrument2018@mail.ru. По вопросу зазора в резьбе лучше обратиться в [АО «НИИИИзмерений в машиностроении», \(495\) 602 46 00](http://АО«НИИИИзмеренийвмашиностроении») info@micron.ru

ИСТОЧНИКИ:

1. Klaus Knebel, Michael Wahl, Martin Maloblocki. Книга «Raumfachwerke für große Spannweiten». MERO-TSK International GmbH & Co.KG, Würzburg, 2008.
https://www.mero-schmidlin.com/images/Bausysteme/publikationen/Raumfachwerke_fuer_grosse_Spannweiten.pdf
2. Материалы 4-ой и 5-ой конференции в Суррее.
<https://books.google.de/books?id=K2jiHNnCvcYC&pg=PA1417&dq=space+truss+ns+japan&hl=de&sa=X&ei=S20kT-DVJJCc-aeiKzXCA#v=onepage&q=space%20truss%20ns%20japan&f=true>
https://books.google.de/books?id=2mu5TN1Kvv8C&pg=PA63&hl=ru&source=gbs_selected_pages&cad=2#v=onepage&q&f=false
3. Старос и Берг. Начало «УЗЛА» <https://zelenograd-news.ru/news/science/23643>
4. Шокин А. И. <https://www.itweek.ru/themes/detail.php?ID=69223>
<https://biography.wikireading.ru/25731> <https://biography.wikireading.ru/25735>
5. Гохарь-Хармандарян И. Г. Автономно-модульный принцип проектирования предприятий. Архитектура СССР, 1971, j\2 11.
6. Трофимов В. И., Бегун Г. Б. Книга «Структурные конструкции».
<https://www.twirpx.com/file/1411908/>
7. Файбишенко В. К. Диссертация на тему: «Исследование перекрестно-ребристых систем квадратных в плане при различных вариантах *опирания*».
8. Постановление ЦК КПСС и СМ СССР от 29 мая 1972 г. № 381 «Об организации производства и комплектной поставке легких металлических конструкций».
9. Файбишенко В. К. Книга «Металлические конструкции».
http://books.totalarch.com/metal_constructions_faibishenko_1984
10. Система «КТ». Перевод из книг Space Structures 4. <http://fen-net.de/valeria.sokolova/> - пункт 17
11. Технические условия ТУ 5285-001-47543297-09 МарХИ
http://www.sistemas-marhi.ru/download_files/technical_specifications/TU5285_001_47543297_09.pdf
12. Каталог ЦНИИЛМК от 1989 года
13. Патент Усанов А. Н., Пушкин Б. А. 1992 <https://findpatent.ru/patent/200/2004732.html>
14. Эдуардо Торроха IASS. Международная ассоциация пространственных конструкций.
https://iass--structures-org.translate.goog/History?x_tr_sl=en&x_tr_tl=ru&x_tr_hl=ru&x_tr_pto=ajax,sc
15. Пушкин Б. А. Сайт. «Технологичные стальные каркасы...».
<http://www.fen-net.de/valeria.sokolova/>
16. Минмонтажспецстрой СССР / ЦНИИЛМК/ Научно-технический отчет по теме: исследование несущей способности сжатых стержней... Заказ-наряд / №0008/ Раздел II: «Разработка и натурные испытания экспериментального блока покрытия разм. 24x12 м для производственных зданий из элементов «Кисловодск». Москва 1988.

17. Пушкин Б. А., Усанов А. Н. Авторское №1604953 по двускатному покрытию.
<http://www.findpatent.ru/patent/160/1604953.html>
18. АООТ «Экспостроймаш» / Опытная база «ГИАП» пристройка к корпусу №453
Конструкции каркаса /653. 05.07.95К-КМД / 180x21 м / Альбом 5 / Москва 1996.
19. Проект магазина в Бибирево <http://www.fen-net.de/valeria.sokolova/bibirevo.htm>
20. Информация об урагане 20 июня 1998 года.
<https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1658726>
<https://moya-moskva.livejournal.com/2844682.html>
21. ТЗ от «Кавказкурортпроекта»
22. ТЗ Промстройниипроекта от 28.07.03 и от 06.04.04.
23. Инклинометр Nivel-210. http://gfk-leica.ru/katalog/datchiki/leica_nivel_210/
24. Пушкин Б. А., к.т.н. «Стержневые несущие конструкции из унифицированных элементов: перспективы развития». Бюллетень строительной техники №10, 1998г
<http://www.fen-net.de/valeria.sokolova/bct3.htm>
25. Пушкин Б. А., к.т.н. «К расчету сжатого стержня пространственной фермы по СП 53-102- 2004». Строительная механика и расчет сооружений №1, 2010 г.
<http://www.fen-net.de/valeria.sokolova/Zaschemlenie/Sterj.pdf>
26. Формообразование гнутых профилей: теория и практика. (2011 г.).
Сборник научных трудов. <https://www.twirpx.com/file/1261854/>
27. Файбишенко В. К. «Архитектоника инженера Шухова» доклад на конференции.
<https://www.youtube.com/watch?v=k1ozMh753mc>
28. Научный центр электроники в Зеленограде.
[https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B0%D1%83%D1%87%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%86%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%80_\(%D0%9D%D0%9F%D0%9E\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B0%D1%83%D1%87%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%86%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%80_(%D0%9D%D0%9F%D0%9E))
29. Филимонов В. И., Мищенко О. В. Книга «ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ»
<http://venec.ulstu.ru/lib/disk/2013/Filimonov.pdf>
30. ГОСТ 8278-83. «Швеллеры гнутые равнополочные». В компании "ЛенСпецСталь" швеллеры
ГОСТ 8278-83 более 50 000 р/т. <https://files.stroyinf.ru/Data/298/29840.pdf>
31. ГОСТ Р 58384-2019 Профили стальные гнутые из холоднокатаной стали
<https://files.stroyinf.ru/Data/708/70861.pdf>
32. Патент на полезную модель № 185390 «Стержневой элемент сборного каркаса»
https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&rn=8166&DocNumber=185390&TypeFile=html
33. Пушкин Б. А. Автореферат кандидатской диссертации по строительству на тему: «Статический расчет плоских структурных перекрытий массового строительства». Специальность (строит. механика) ВАК СССР 05.22. Новочеркасск, 1973 г.
34. Артес А.Э., Третьюхин В.В. «Проблема совершенствования производства мелющих шаров. Качество и инновации» журн. «КОМПЕТЕНОСТЬ» 2014 год № 3 Стр. 50-53.
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwigyaXl-NbzAhWNjKOKHVdEAosQFnoECBIAQ&url=https%3A%2F%2Frucont.ru%2Ffile.ashx%3Fguid%3D1b975c76-771e-42bd-86fc-87955ecf2cfb&usg=AOvVaw3jSUUugd_wIXamRHCBljX
<https://e.lanbook.com/journal/issue/293171>

35. ВСН 356 – 86. Рис. 12. https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/217445/
36. Жидкая штамповка <http://energolit.com/>
37. QForm 7. <https://www.youtube.com/watch?v=h45bllz-CzE>
38. QForm3D Forging Simulation. <https://www.youtube.com/watch?v=1Jg-YycdzJE>
39. Редукторы. <https://redservis.ru/>
40. «Промэлектроникасервис» в городе Ростов-на-Дону. <https://2gis.ru/rostov/firm/70000001006465737>
41. «КТИАМ». <https://glavportal.com/materials/ktiam-unikalnye-stanki-i-tehnologii>
42. СП 16.13330.2011. Актуализированная редакция СНиП П-23-81* Металлические констр. https://www.profnastil.com/upload/uf/674/stalnye_konstrukzivy.pdf
43. John Chilton. Книга «SPACE GRID STRUCTURES», 2000 год. Architectural Press. https://books.google.nl/books?id=1wu-RsRajtoC&hl=nl&source=gbs_book_other_versions
44. Ульяновский Государственный Технический Университет. Формообразование гнутых профилей: теория и практика. Ульяновск, 2011 г. Сборник научных трудов. <https://www.twirpx.com/file/1261854/>
45. IASS Working group. Spatial space structures. <https://iass-structures.org/>
46. Пушкин Б.А., Долуханян Г.А. Полезная модель №158157 «Станочное приспособление...». https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
47. Капорович В. Г. «Обкатка в производстве металлоизделий», 1973. https://rusneb.ru/catalog/002072_000044_ARONB-RU_%D0%90%D1%80%D1%85%D0%B0%D0%BD%D0%B3%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F+%D0%9E%D0%9D%D0%91_DOLIB_-820284/
48. Коннектор системы «Брест». <https://www.bstu.by/nauka/razrabotki/stroitelstvo>
49. Регистрация заявки на полезную модель в Германии. *Aktenzeichen 10 2012 024 199.2.*
50. Файбищенко. В. К. Патент № [2577339](https://www.freepatent.ru/patents/2577339) (RU) <https://www.freepatent.ru/patents/2577339>
51. Программа N_2015 «Расчет и оптимизация трубчатых структурных каркасов». Инструкция пользователя. Часть 1. <http://www.fen-net.de/valeria.sokolova/> пункт 17
52. Программа N_2015 «Расчет и оптимизация трубчатых структурных каркасов». Инструкция пользователя. Часть 2. <http://www.fen-net.de/valeria.sokolova/> пункт 17
53. Регистрация заявки на полезную модель в Германии *Aktenzeichen 20 2020 005 356.*
54. ЦНИИСК ГОССТРОЯ СССР «Рекомендации по проектированию структурных конструкций». Москва 1984 г <http://www.gostrf.com/normadata/1/4293792/4293792341.pdf>
55. Патент **Armin Mylaeus (Армин Милей)** «Строительный комплект для изготовления трёхмерных каркасов». <https://patentimages.storage.googleapis.com/44/8d/c3/2db2ad20fa5aef/US3995962.pdf>
56. «ZÜBLIN-raumfachwerk» <http://www.fen-net.de/valeria.sokolova/pics/Zueblin-0002.jpg>

57. «Выбор и способы изготовления заготовок для деталей машиностроения». Казань, 1915.
https://kpfu.ru/portal/docs/F646083646/Vybor.sposobov.izgotovleniya.zagotovok.dlya.detal_ei_mashinostroeniya.pdf
58. Неласов В. С., Файбишенко В. К., «Основные направления развития системы МАРХИ». Материалы всероссийской научно-практической конференции «45 лет отрасли легких металлоконструкций: от модуля Кисловодск до модуля Пятигорск». Апрель 2017 года.
https://www.ncfu.ru/export/uploads/Dokumenty-Nauka/materialy-konferencii-45-let-otrasli-legkih-metallokonstrukcij-ot-modulya-kislovodsk-do-modulya-pyatigorsk_3-5.04.2017.pdf
59. Ведяков И. И., Одесский П. Д. «Современные трубы для легких конструкций». Материалы Всероссийской научно-практической конференции «45 лет отрасли легких металлоконструкций: от модуля Кисловодск до модуля Пятигорск». Апрель 2017 года.
https://www.ncfu.ru/export/uploads/Dokumenty-Nauka/materialy-konferencii-45-let-otrasli-legkih-metallokonstrukcij-ot-modulya-kislovodsk-do-modulya-pyatigorsk_3-5.04.2017.pdf
60. ЛСТК - 8 800 333-18-58, звонок бесплатный email: office@fsm24.ru
<https://lstkclub.ru/ograzhdayuschie-konstruktsii-zdaniy-proektirovani/>
61. «Проектирование зданий холодильников». Методическое пособие, (стр.30).
https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp25_2018.pdf
62. «Холодильники» СП 109.13330.2012 - актуализированная редакция СНиП 2.11.02-87
<https://docs.cntd.ru/document/1200092603>
63. Казанский Государственный Архитектурно-строительный Университет. Кузнецов И. Л., Дымолазов М. А., Гимранов Л. Р. «Легкие металлические конструкции». Примеры расчета. Учебно-методическое пособие. Казань, 2018.
<https://www.kgasu.ru/upload/iblock/962/UMP-po-LMK.pdf>
64. Моисеев М. В. Автореферат кандидатской диссертации по строительству на тему: Специальность ВАК РФ 05.23.01, Казань, 2004. <https://www.dissercat.com/content/nachalnye-usiliya-i-sobiraemost-stalnykh-strukturnykh-konstruktsii-pri-sluchainykh-otkloneni>
65. Артёмов А.А. Автореферат кандидатской диссертации по строительству на тему: «Устойчивость стержневых элементов, работающих в составе решетчатых конструкций». Специальность ВАК РФ 05.23.01, Москва, 2004. <https://tekhnosfera.com/ustoychivost-sterzhnevyyh-elementov-rabotayuschih-v-sostave-reshchatykh-konstruktsiy>
66. Матвеев А. В. Автореферат кандидатской диссертации по строительству на тему: «Пространственно-стержневые конструкции покрытий с поясами составного профиля из швеллера и уголка». Специальность ВАК РФ 05.23.01 Томск, 2004 год. <http://www.dslib.net/stroj-konstrukcii/prostranstvenno-sterzhnevye-konstrukcii-pokrytij-s-pojasami-sostavnogo-profilja-iz.html>
67. Зверев В. В. Автореферат докторской диссертации по строительству на тему: «Эффективные строительные металлоконструкции на основе объемно-формованного тонколистового проката: исследование, проектирование, изготовление», Воронеж, 2000.
<https://www.dissercat.com/content/effektivnye-stroitelnye-metallokonstruktsii-na-osnove-obemno-formovannogo-tonkolistovogo-pro>
68. Галишникова В. В. Автореферат докторской диссертации по строительству на тему: «Обобщенная геометрическая нелинейная теория и методы численного анализа деформирования и устойчивости пространственных стержневых систем». Специальность ВАК РФ 05.23.17, Москва, 2014 год.
<https://-analiz-deformirovaniya-i-ustoychivosti-tekhnosfera.com/obobschennaya-geometricheski-nelineynaya-teoriya-i-chislennyy-prostranstvennyh-ste>

69. Туснина О. А. Автореферат кандидатской диссертации по строительству, на тему: «Несущая способность тонкостенных холодногнутых прогонов покрытия с учетом влияния жесткости соединения с сэндвич-панелями». Москва, год 2015 специальность ВАК РФ 05.23.01.
<https://tekhnosfera.com/nesuschaya-sposobnost-tonkostennyh-holodnognutyh-progonov-pokrytiya-s-uchetom-vliyaniya-zhestkosti-soedineniya-s-sendvich>
70. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 58942—2020. Технологические допуски.
<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293719/4293719758.pdf>
71. ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований» Основные положения и требования. М., Стандартинформ...,2014г.
<https://docs.cntd.ru/document/1200115736>
72. СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции». Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87. Дата введения 2014-07-01.
<https://docs.cntd.ru/document/1200097510>
73. Проект каркаса покрытия манежа Ростове - на – Дону
<http://www.fen-net.de/valeria.sokolova/> пункт 17
74. «Fifty Years of Progress for Shell and Spatial Structures». Книга под редакцией Ихсан Мунган и John F. Abel
<https://iass-structures.org/bookshop/>
75. Трофимов В. И. , Каминский А. М. Книга «Лёгкие металлические конструкции зданий и сооружений». 2002 год.
<https://elima.ru/books/?id=617>

Не все источники снабжены интернет-ссылками. Если Вас интересуют дополнительные материалы, в том числе из интернета, Вы можете обратиться к автору этой книги по телефону или скайпу, указанному в <http://www.fen-net.de/valeria.sokolova/> под рубрикой «каналы связи».