

## Расчет и проектирование строительных конструкций

### КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА РАСЧЁТА ТОЧНОСТИ ШАРНИРНО-СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ

А.Б. БОНДАРЕВ, инженер по металлоконструкциям строительной дирекции  
АО «Рудник имени Матросова»  
685000, Магадан, ул. Пролетарская, д. 12  
E-mail: bondarev\_a\_b\_rus@mail.ru, BondarevAB@polyus.com

*В статье выполнен обзор и анализ ранее выполненных исследований, а также компьютерных программ для расчёта точности, в том числе для строительных металлоконструкций. Приведено описание и анализ функциональных возможностей нового Вычислительного Комплекса «Размерный Анализ Стержневых Конструкций» (ВК РАСК). Проведена верификация ВК РАСК, подтверждающая правильность и точность выполнения расчёта точности. Выполнено описание технологии работы пользователя с различными меню и в целом с ВК РАСК. Приведён пример расчёта точности на примере однопоясной шарнирно-стержневой металлической оболочки. Общая форма шарнирно-стержневых объектов из металлоконструкций для с помощью ВК РАСК может быть выполнен расчёт точности может быть разнообразна: цилиндрическая, сферическая, эллиптическая, тороидальная, коническая и другая.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** расчёт точности, компьютерная программа, большепролетные металлические пространственные покрытия, размерная цепь, сборочные отклонения

#### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время многие компьютерные программы позволяют выполнить комплексную расчётную оценку и определение напряжённо-деформированного состояния (НДС) пространственных стержневых металлоконструкций. Хотя не всегда используются величины отклонений, возникающие в конструкции при их сборке. Иногда для определения НДС конструкций с отклонениями используют метод Мора или метод статистических испытаний, стандартные методы теории размерных цепей. Такие подходы не отражают накопления отклонений при сборке конструкций.

Кроме того, величины отклонений конструкций могут быть получены путём расчёта точности. Решение задач расчёта точности актуально на раннем этапе конструирования изделия, когда технологические особенности подготовки производства конкретного изделия мало проработаны. Пригодится расчёт точности и на заключительном этапе процесса проектирования в качестве инструмента для заключительной поверки и в целях разработки оптимальной технологии производства.

В работах [4, 6] выполнено обоснование необходимости разработки компьютерной программы – Вычислительный Комплекс «Размерный Анализ Стержневых Конструкций» (ВК РАСК), т.к. в сравнении с другими известными способами и программами при помощи ВК РАСК возможен учёт отклонений длин стержней, формы отверстий и многосвязность (наличие нескольких замыкающих звеньев) стержневых систем. В основу алгоритма ВК РАСК заложены уравнения точности, а также известные в геометрии и геодезии уравнения [22, 23, 24]. В геодезии, например, такие процедуры используются в так называемом методе «круговых засечек», а также при выполнении многих других геодезических процедур.

В данной статье приведено описание и анализ функциональных возможностей ВК РАСК. Выполнена верификация ВК РАСК, подтверждающая правильность и точность выполнения расчёта точности. Выполнено описание технологии работы пользователя с различными меню и в целом с ВК РАСК.

#### **ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ**

Изготовление изделий высокого качества в сжатые сроки и оптимизация прибыли требуют точных и эффективных аналитических инструментальных средств, которые тесно интегрированы с САД системами твердотельного моделирования. Точность является важным показателем детали (узла, агрегата), определяющим её способность вы-

полнять свои рабочие функции. От точности зависят надёжность не только самой детали, но и экономичность, производительность, уровень вибраций и шума всей конструкции, что в совокупности характеризует качество продукции [28].

В настоящее время задачи проектирования деталей и узлов должны решаться на основе широкого применения вычислительной техники. Автоматизация проектирования и создание в САД программах специальных модулей для расчёта размерных цепей позволяет сократить сроки подготовки производства и выпуска новой продукции, а также уменьшить издержки, и повысить качество проектных работ [3].

В настоящее время существуют мощные САД пакеты машиностроительного направления. Они предлагают модули, позволяющие выполнить размерный анализ сборки узлов и агрегатов конструкций. Среди наиболее известных САД пакетов можно отметить Solid Works [2]; Autodesk Inventor; Pro/ENGINEER; CETOL 6 Sigma; SIGMUND Works; Kompas-3D. По факту в принципе все известные мощные САД-пакеты аналогичны друг другу. Принципиальных различий в них нет тем более в части модуля размерного анализа. Поэтому, рассмотрим функциональные возможности модулей размерного анализа на примере программы Solid Works.

Во всех программах твердотельного моделирования требуется создание 3D-модели, что позволяет по назначенным допускам определить размер замыкающего звена. В результате каждого исследования для замыкающего размера становятся известны: номинальное значение; минимальный и максимальный допуски (наихудший случай); минимальный и максимальный RSS-допуск; контрибуция – относительная степень участия элемента в размерной цепи и его влияние на замыкающее звено (в %). Размеры цепи и граничные условия по монтажу определяются между гранями и кромками САД-модели, что позволяет измерять зазор (натяг) между поверхностями по фактическому минимальному расстоянию [28].

Создание 3D-модели в программе очень трудоёмкий процесс, но даже не эта сложность, вернее одна из причин, которая заставила отказаться от применения программ твердотельного моделирования при выполнении расчёта точности шарнирностержневой системы, и к необходимости разработки ВК ПАК. Вторая причина – отсутствие возможности расчёта пространственной размерной цепи с несколькими замыкающими звеньями в существующих САД-пакетах. Фактически в модули размерного анализа САД-пакетов заложена методика расчёта пространственной размерной цепи по [7]. Третья причина – невозможность создавать сборку из дефектных стержней, т.е. с отклонениями длин элементов, не говоря уже как о форме отверстий, так и собственно формы стержней. При создании такой конструкции возникает программный конфликт, который не позволяет выполнить сборку дефектной системы.

Существует также значительное количество авторских программных реализаций доступных в сети INTERNET, которые позволяют выполнить размерный анализ стержневых и иных систем. Среди них можно отметить Otkloneniy Razmerov, Dimcalc, Con-7 и РЦ-1. Однако – программы позволяют выполнить расчёт только линейных размерных цепей и без учёта вероятностного распределения отклонений – согласно методик [7].

В работе А.В. Анкина и Д.Л. Кузьминского [3] отмечается, что на сегодняшний день ни одна программа не позволяет произвести расчет пространственной размерной цепи. В то же время без применения ЭВМ произвести такие расчёты становится затруднительным либо невозможным. Такой вывод делают авторы и других работ [1, 2, 8, 9]. Кроме того, А.В. Анкин совместно с Д.Л. Кузьминским для решения обозначенной проблемы разработали программный комплекс РПРЦ (расчёт пространственной размерной цепи). Данный комплекс построен по модульному принципу: модули позволяют охватить весь процесс проектирования и работы оборудования – от чертежа, расчета и моделирования проектируемого оборудования до контроля его выходных параметров в процессе производства. В модули программы РПРЦ включены такие общеизвестные пакеты прикладных программ как NASTRAN, MatLab, Solid Works. Однако со слов авторов программы она всё же направлена на решение вопроса собираемости узлов и агрегатов машиностроительной отрасли. Для расчёта точности многоэлементных систем их разработка не подходит [3].

Программа для расчёта линейной модели пространственной размерной цепи, предложенная С.В. Исаевым, Л.А. Кашубой [8] также не позволяет выполнить расчёта проч-

ности многоэлементной шарнирно-стержневой системы. В своей программе С.В. Исаев для расчёта цепи добавлял новую систему координат, а раз так, то результат расчёта – реальные координаты для узла не привязаны к проекту жёстко, и не учитывает много-связности шарнирно-стержневых систем. Следовательно, для расчёта точности много-элементных систем с одной системой координат программа С.В. Исаева не подходит.

Под руководством Е.В. Лебеда, в настоящее, проводятся исследования отклонений и начальных усилий, которые возникают в двухпоясных металлических куполах из-за погрешностей изготовления, и монтажа их конструкций [10 - 16].

В строительстве для выполнения измерений и их анализа используются геодезические приборы и инструменты. В настоящее время известно множество программных комплексов, осуществляющих обработку полевых измерений путём решения геодезических задач. Среди широкого спектра рассмотренных программ необходимо отметить наиболее известные: MicroSurvey® STAR\*NET [22], AutoCAD Civil 3D [30]. Менее известные – Objectland [24], Geozem [23], CREDO\_3DAT.

Все эти программы позволяют автоматически решать различные геодезические задачи: полярная засечка по измеренному углу; полярная засечка по дирекционному углу; линейная засечка и многие другие. Существенным недостатком таких программ является, то, что они требуют выполнения измерения геометрии реального объекта, т.е. уже возведённого. Расчёт точности с помощью программ, предназначенных для производства и обработки геодезических измерений невозможен.

На основе известных в геодезии геометрических процедур В.А. Савельев совместно с Е.В. Лебедем разработали методику определения геометрических отклонений пространственных металлических конструкций в вероятностной постановке как численной имитации на компьютере процесса его сборки и монтажа с использованием метода Монте-Карло, а также реализовали в разработанных Е.В. Лебедем программах GENES, SBORKA и MONTAG [17-20, 25-27]. Используемые в программах GENES, SBORKA и MONTAG процедуры геометрического расчёта широко известны в геодезии и реализованы, например, в таких программных комплексах как Micro Survey, Autodesk Civil 3D, GEOZEM, Objectland.

Впервые при определении отклонений геометрический подход разработан в геодезии при геодезических построениях – разбивке земельных участков. В ЦНИИПСК им. М.П. Мельникова В.А. Савельевым с Е.В. Лебедем использованы аналогичные процедуры. В.А. Савельев и Е.В. Лебедь использовали известные геометрические процедуры, реализованные в программе MONTAG при корректировке проекта главного корпуса ВНИЦ ВЭИ им. В.И. Ленина в Российской Федерации, Московская область, г. Истра по варианту «Цилиндр» [17].

Зарубежные исследователи предлагают создавать пространственные конструкции с возможностью управления их поведением как одним из способов борьбы с дефектами – работы Gaul L., Albrecht H., Grierson D.E. [33], Hasan R., Xu L., Wirnitzer J. [34] и другие. В результате анализа зарубежных источников следует обратить внимание, что в этих работах предлагается полуактивное (semi-active) управление поведением конструкций, в том числе, с отклонениями. Работы Charles R. Farrar [32], Kaouk, Zimmerman [35], Kohtaro Matsumoto, Sachiko Wakabayashi, Masahiro Noumi, Tetsuji Yoshida, Hiroshi Ueno, Yutaro Fukase [37], Kaveh A., Nouri M. [38], Ömer KELEŞOĞLU, Mehmet ÜLKER [41], Tokunbo Ogunfunmi [43], Tsou P., Shen M.-H. [44], Yue Yin Huang Xin, Han Qinghua, Bai Linjia [45] отражают вопросы вибродиагностики дефектов конструкций антенн, радиотелескопов и развёртываемых структур. Для надёжной и бесперебойной эксплуатации зарубежные исследователи предлагают устанавливать регуляторы формы для радиотелескопов, которые позволят управлять их формой при эксплуатации. Такие конструкции в зарубежной литературе ещё называются адаптивными (adaptive construction), т.е. приспособляющиеся под условия эксплуатации. Кроме тех исследователей, что указаны выше вопросами точности формы пространственных управляемых конструкций космических антенн, радиотелескопов и пространственных по-крытий занимаются Kartal M.E. [36], M. Ohsaki [39], Makowski Z.S. [40], Pearson J.E. [42].

Следовательно, на основании изложенного выше возникает необходимость совершенствования, а фактически создания новой компьютерной программы для расчёта точности пространственных шарнирно-стержневых систем, которая одновременно со

связностью системы и отклонениями длин стержней позволит учесть и форму отверстий при расчёте точности по методике [6, 31]. Поэтому разработана компьютерная программа ВК РАСК, предназначенная для расчёта точности стержневых конструкций с осеболтовыми и многоболтовыми соединениями, учитывающая отклонения длин стержней, форму отверстий и многосвязность – учёт наличия нескольких замыкающих звеньев в размерной цепи. ВК РАСК создан с помощью системы программирования Delphi 7 под управлением Windows.

Характерной особенностью ВК РАСК является то, что он позволяет определить размеры замыкающего звена цепи на основе статистического моделирования величин отклонений, как отдельных элементов – стержней, так и всего объекта расчёта (здания, сооружения) в соответствии с их технологической схемой возведения. В основу ВК РАСК заложен статистический метод расчёта точности – нахождение номинального значения и величины линейного допуска замыкающего звена размерной цепи при известных номинальных значениях и допусках составных звеньев. Также, возможно использование других методов и способов расчёта точности, т.к. они присутствуют в функционале ВК РАСК. Кроме того, у ВК РАСК существует режим «нет отклонений», «предельные погрешности», «заданные погрешности».

Предельные погрешности – анализ по методу максимум-минимум. Заданные погрешности – анализ погрешностей сборки на основе выполнения реальных замеров длин стержней, которые могут быть выполнены на заводе-изготовителе металлоконструкций. Результаты формирования действительной геометрии как пространственной размерной цепи с несколькими замыкающими звеньями могут быть использованы в решении задач анализа и синтеза размерной цепи. При построении расчётной схемы между элементами, участвующими в расчёте размерной цепи, автоматически назначаются необходимые геометрические процедуры, которые зависят от технологической взаимосвязи между элементами при определённой пользователем последовательности сборки системы в конструктивную форму.

Величины отклонений, полученные при помощи ВК РАСК могут быть использованы при определении сборочных (начальных, монтажных) усилий при определении НДС стержневых конструкций.

#### **СТРУКТУРА, ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ, ИМПОРТ ДАННЫХ ИЗ ВК РАСК В ДРУГИЕ СИСТЕМЫ**

Компьютерная программа ВК РАСК построена по модульному принципу. Модули позволяют охватить весь процесс проектирования и работы оборудования – от чертежа, расчёта и моделирования проектируемого сооружения, оборудования до контроля его выходных параметров в процессе производства. Расчёт точности в ВК РАСК состоит из следующих этапов:

- создание номинальной геометрической формы стержневой системы с использованием Autodesk AutoCAD;
- определение массивов координат узлов номинальной формы стержневой системы с использованием Autodesk Civil-3D либо Micro Survey, либо при помощи иного программного комплекса;
- задание массивов координат, полученных из Autodesk Civil-3D либо Micro Survey, либо из иного программного комплекса в ВК РАСК путём ручного ввода или импорта файла с координатами в формате \*.txt – рис. 1;
- задание массивов стержней в зависимости от технологической последовательности сборки (возведения) конструкций или сооружения в целом путём ручного ввода или импорта файла с координатами в формате \*.txt – рис. 1;
- назначение параметров расчёта для отдельных стержней либо конструкции в целом – рис. 1, 2;
- назначение составных и замыкающих стержней в системе, что зависит от технологической последовательности возведения здания, либо выполнение данной функции с помощью средств ВК РАСК автоматически «Найти порядок построения конструкции» – рис. 2;

В программе **ВК РАСК** предусмотрена возможность импорта файлов исходных данных, подготовленных в текстовом формате, что позволяет передать исходные данные на рисунке 1 исходных данных в виде, доступном для контроля. Файл исходных

данных в текстовом формате должен иметь расширение \*.txt и его можно создавать в текстовом редакторе или передавать из других программ, которые формируют исходные данные в виде текста, то есть с расширением \*.txt. В программе ВК PASC для выполнения статистического анализа погрешностей при сборке предусмотрено несколько возможных законов распределения: нормальный; равномерный; Симпсона и экспоненциальный. Последовательность задания данных в ВК PASC при продольной последовательности сборки дана на примере однопоясной шарнирно-стержневой системы – рис. 4.

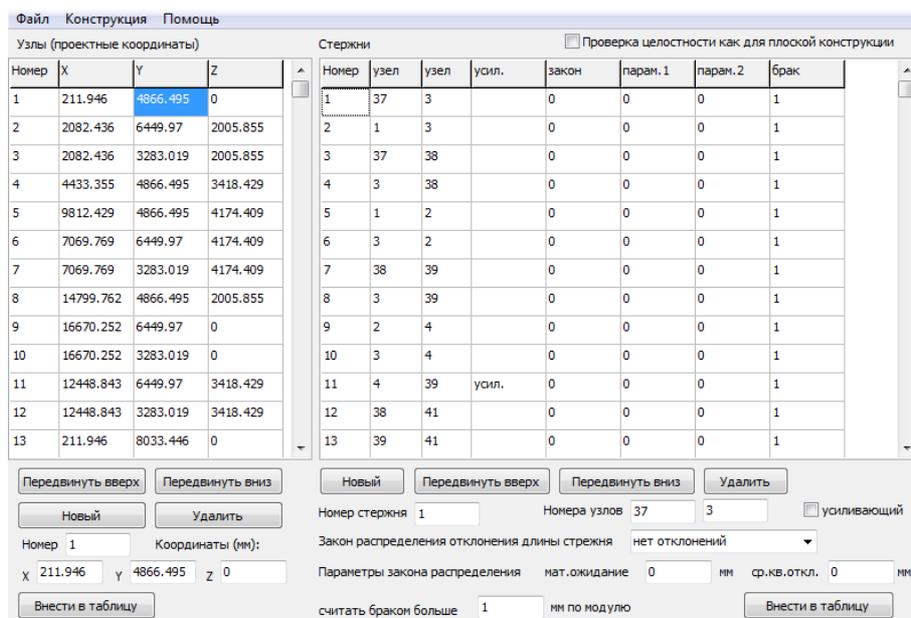


Рис. 1. Узлы (проектные координаты) и стержни, кнопки управления номерами стержней

Импорт данных как для узлов так и для стержней выполняется из раздела меню **Файл** операцией **Импорт узлов в формате YXZ** – импортирование координат узлов в формате YXZ и **Импорт стержней в формате N<sub>1</sub> N<sub>2</sub>** – импортирование обозначения стержней в формате N<sub>1</sub> N<sub>2</sub>. После активации нужных операций выполняется импорт, и импортруемая информация автоматически заполняет формы таблиц как на рис. 1.

В комплексе предусмотрен и обратный процесс – экспорт данных, т.е. преобразование из формата проекта в текстовое описание для программы **MS Excel**. Таким образом, в **MS Excel** выгружаются все результаты расчёта в виде текстового формата и могут быть использованы как для дополнительной обработки, так и для использования, например, в **BK SCAD** для определения НДС – усилий, напряжений, деформаций.

В окне функции **Закон распределения отклонения длины стержня** задаётся один из следующих ниже законов распределения отклонений:

**Нет отклонений** – функция, когда стержень изготовлен без отклонений;

**Нормальный** – функция, когда в стержне присутствуют отклонения, подчинённые нормальному (Гауссовскому) закону распределения;

**Равномерный** – когда в стержне присутствуют отклонения, подчинённые равномерному закону распределения;

**Симпсона** – функция, когда в стержне присутствуют отклонения, подчинённые закону распределения по треугольнику (распределение Симпсона);

**Экспоненциальный** – функция, когда в стержне присутствуют отклонения, подчинённые экспоненциальному закону распределения; **Предельные погрешности** – функция, когда в стержне присутствуют отклонения, полученные на основании контрольных замеров каждого стержня при приёмочном контроле, т.е. фактические отклонения изготовления.

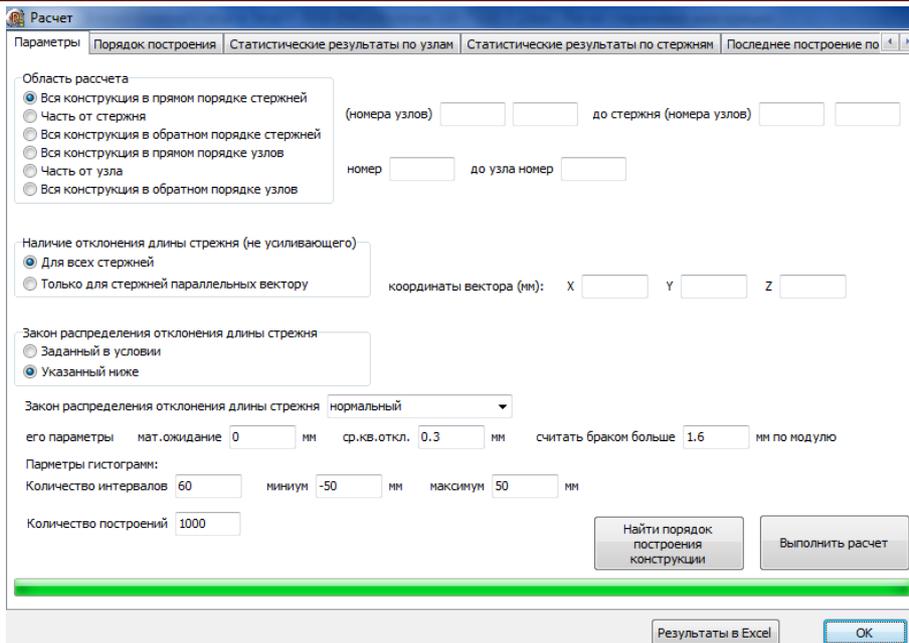


Рис. 2. Пункты Меню «Расчёт» и «Закон распределения отклонения длины стержня»

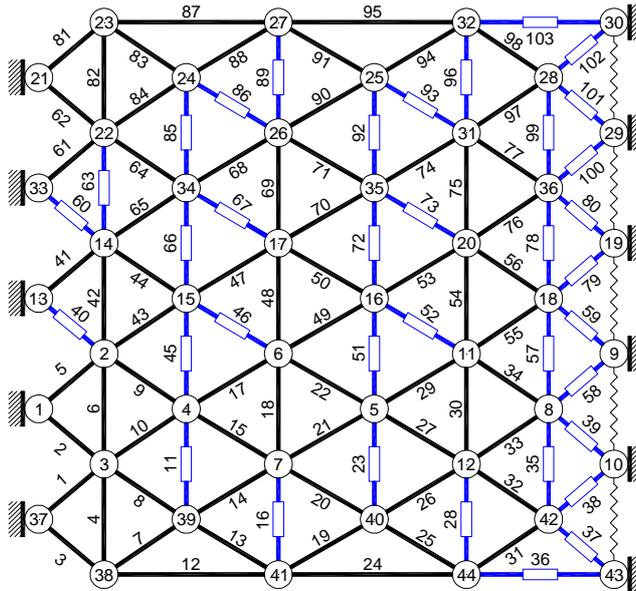


Рис. 3. Однопоясная шарнирно-стержневая оболочка при продольной сборке.

В окне функции **Параметры закона распределения** задаются параметры, характеризующие тот или иной закон распределения. Для каждого из законов эти параметры индивидуальны и могут быть заданы для каждого стержня индивидуально. Функция **Внести в таблицу** аналогична той, что показана на рис. 1 для узлов. В окне функции **Считать браком по модулю** задаётся величина предельного отклонения больше которого отклонение быть не может при любом законе распределения. **Проверка целостности данных** – пункт выпадающего меню **Конструкция**. Этот пункт является контрольной функцией, которая позволяет до выполнения расчётов выполнить проверку правильности ввода исходных данных на предыдущем этапе. **Порядок построения** – автоматическое определение процедур геометрического построения, исходя из строго заданного порядка соединения стержней в исходных данных. Данное меню дублирует функцию **Проверка целостности данных** основного меню и является одним из пунктов меню **Расчёт**.

### МЕНЮ ПАРАМЕТРЫ РАСЧЁТА.

Меню **Параметры расчёта** является одним из пунктов ниспадающего меню **Конструкция**, которое вызывается нажатием левой кнопки мыши по меню **Расчёт**.

Меню **Параметры** позволяет задать область расчёта и закон распределения отклонений для заданной области расчёта – всего сооружения или его отдельной части. Под меню **Областью расчёта** понимается сооружение или его часть, для которого выполняется определение погрешностей и их статистическая оценка. Другими словами, выполняется расчёт собираемости.

Меню **Область расчёта** включает следующие самостоятельные пункты:

**Вся конструкция в прямом порядке стержней** – расчёт собираемости всей конструкции в той последовательности стержней, которая задана в исходных данных;

**Часть от стержня** – расчёт собираемости части конструкции, начиная от любого заранее заданного номера стержня конструкции в той последовательности, которая задана в исходных данных;

**Вся конструкция в обратном порядке стержней** – расчёт собираемости всей конструкции в последовательности, противоположной той, что задана в исходных данных для стержней;

**Вся конструкция в прямом порядке узлов** – расчёт собираемости всей конструкции в той последовательности узлов, которая задана в исходных данных;

**Часть от узла** – расчёт собираемости части конструкции, начиная от любого заранее заданного узла стержня конструкции в той последовательности, которая задана в исходных данных;

**Вся конструкция в обратном порядке узлов** – расчёт собираемости всей конструкции в последовательности, противоположной той, что задана в исходных данных для узлов – рис. 2.

Следующий пункт меню **Параметры** – меню **Наличие отклонения длины стержня**, которое предназначено для одновременного задания отклонений:

- во всех стержнях конструкции;
- для стержней параллельных вектору.

Пункт меню **Закон распределения отклонения для длины стержня** в меню **Параметры** позволяет продублировать закон распределения отклонений, заданный в исходных данных с помощью пункта меню **Заданный в условии** или задать отличный от того, что был в исходных данных с помощью пункта меню **Указанный ниже**. Если используется пункт меню, **Заданный ниже**, то необходимо снова задать любой из законов распределения отклонений для рассматриваемой области конструкции в форму на рис. 2.

### МЕНЮ: НАЙТИ ПОРЯДОК ПОСТРОЕНИЯ

Пункт меню **Найти порядок построения** находится в меню **Расчёт** и предназначена для автоматического определения процедур геометрического расчёта формы сооружения или конструкции. Фрагмент меню **Порядок построения** показан на рис. 4. Также в меню **Порядок построения** есть несколько контрольных параметров, которые позволяют определить: недостроенные узлы; недостроенные стержни; стержни, помеченные программой как замыкающие – рис. 4.

После того, как программа автоматически определила порядок построения и все ошибки, если такие были вообще исправлены, можно перейти к пункту меню **Параметры** в меню **Расчёт** для задания параметров закона распределения в меню **Закон распределения отклонения длины стержня**, показанное на рис. 1. После задания закона распределения отклонений длины стержня и его параметров в меню **Закон распределения отклонения длины стержня** можно перейти к выполнению расчёта, что осуществляется нажатием кнопки **Выполнить расчёт**. После завершения расчёта все результаты расчётов можно экспортировать в программу **MS Excel** нажатием кнопки **результаты в Excel**, показанной на рис. 5. Пункт меню **Статистические результаты по узлам** и **Статистические результаты по стержням** находится на отдельных вкладках меню **Расчёт**. Для доступа к требуемому пункту меню требуется активизировать соответствующий пункт левой кнопкой мыши в меню **Расчёт**, используя кнопку , которую можно увидеть на рис. 3, 4.

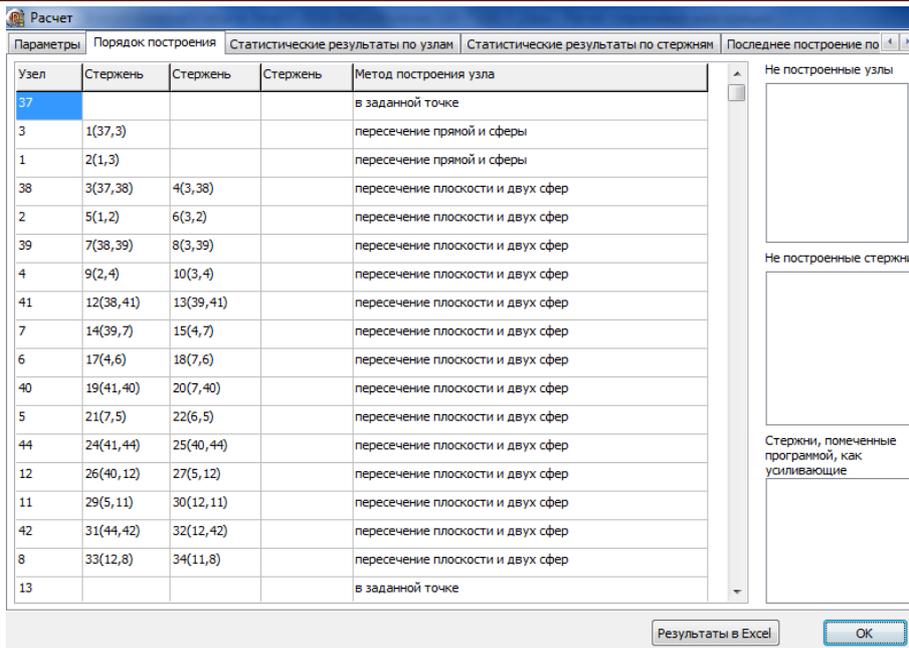


Рис. 4. Меню Порядок построения и контрольные параметры меню Порядок построения  
**МЕНЮ ПРОСМОТР И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТА**

Меню **Просмотр** и анализ результатов расчёта в ВК РАСК представлено четырьмя пунктами меню **Расчёт**: **Статистические результаты расчёта по узлам**; **Статистические результаты расчёта по стержням**; **Последнее построение по узлам**; **Последнее построение по стержням**.

Для активации указанных выше четырёх пунктов меню необходимо обратиться в меню **Расчёт** и нажатием левой кнопки мыши по кнопке перейти к одному из пунктов меню **Просмотра** и анализа результатов расчёта. Меню **Статистические результаты расчёта по узлам** – статистические результаты расчёта по узлам, полученные на основе многократных статистических испытаний конструкции. Форма, в которой представлены результаты расчёта – рис. 5.

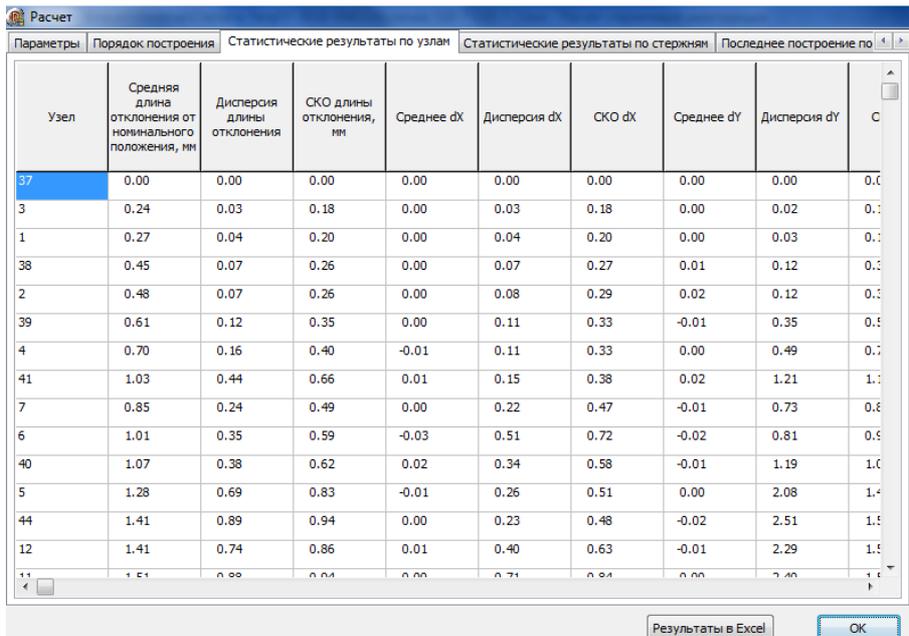


Рис. 5. Статистические результаты по узлам

В этом меню автоматически создаются ведомости статистических результатов отклонений по узлам. Числовые значения отклонений конкретного узла можно вывести в окне данных с помощью клавиш **Up** или **Down**. На экран выводятся отклонения текущего узла в виде рис. 6.

Стержень	Номинальная длина, мм	Среднее отклонение (погрешность изготовления), мм	Средняя фактическая длина, мм	Среднее вычисленное отклонение усилвающих стержней, мм	Дисперсия (одинакова для длины и отклонения)	СКО (одинаково для длины и отклонения)
9(2,4)	3166.95	0.00	3166.95		0.09	0.31
10(3,4)	3166.95	-0.01	3166.94		0.09	0.31
11(4,39)	3166.95		3166.97	0.01	0.86	0.93
12(38,41)	5438.39	0.01	5438.40		0.09	0.29
13(39,41)	3166.95	0.00	3166.95		0.09	0.30
14(39,7)	3166.95	0.01	3166.96		0.08	0.29
15(4,7)	3166.95	0.02	3166.97		0.08	0.29
16(7,41)	3166.95		3166.92	-0.03	1.44	1.20
17(4,6)	3166.95	-0.02	3166.93		0.09	0.29
18(7,6)	3166.95	-0.01	3166.94		0.09	0.30
19(41,40)	3166.95	0.00	3166.95		0.09	0.30
20(7,40)	3166.95	0.01	3166.96		0.08	0.29
21(7,5)	3166.95	0.00	3166.95		0.09	0.30
22(6,5)	3166.95	0.01	3166.96		0.09	0.30
23(40,5)	3166.95		3166.95	0.00	1.60	1.27

Рис. 6. Статистические результаты по стержням

Узел	Номинальные координаты	Фактические координаты	Длина отклонения от номинального положения, мм
1	( 211.95; 4866.49; 0.00)	( 212.31; 4866.19; 0.39)	0.61
2	( 2082.44; 6449.97; 2005.86)	( 2082.84; 6450.05; 2006.29)	0.60
3	( 2082.44; 3283.02; 2005.86)	( 2082.57; 3283.13; 2006.00)	0.22
4	( 4433.35; 4866.49; 3418.43)	( 4433.38; 4866.08; 3418.45)	0.42
5	( 9812.43; 4866.49; 4174.41)	( 9813.15; 4864.88; 4174.41)	1.77
6	( 7069.77; 6449.97; 4174.41)	( 7069.91; 6448.51; 4174.45)	1.47
7	( 7069.77; 3283.02; 4174.41)	( 7069.54; 3282.33; 4174.34)	0.73
8	( 14799.76; 4866.49; 2005.86)	( 14800.10; 4865.81; 2005.65)	0.79
9	( 16670.25; 6449.97; 0.00)	( 16670.25; 6450.14; 0.00)	0.17
10	( 16670.25; 3283.02; 0.00)	( 16670.25; 3283.51; 0.00)	0.49
11	( 12448.84; 6449.97; 3418.43)	( 12448.80; 6449.00; 3418.44)	0.97
12	( 12448.84; 3283.02; 3418.43)	( 12449.79; 3281.69; 3418.16)	1.66
13	( 211.95; 8033.45; 0.00)	( 211.95; 8033.45; 0.00)	0.00
14	( 2082.44; 9616.92; 2005.86)	( 2082.37; 9617.54; 2005.79)	0.63
15	( 4433.35; 8033.45; 3418.43)	( 4433.16; 8034.43; 3418.31)	1.01

Рис. 7. Последнее построение по узлам

Меню **Статистические результаты расчёта по стержням** – статистические результаты расчёта по стержням, полученные на основе многократных статистических испытаний конструкции. Форма, в которой представлены результаты расчёта – рис. 6. В этом меню автоматически создаются ведомости статистических результатов отклонений по стержням. Числовые значения отклонений конкретного стержня можно вывести в окне данных с помощью клавиш **Up** или **Down**. На экран выводятся отклонения текущего стержня в виде – как на рис. 6.

Меню **Последнее построение по узлам** – результаты расчёта по узлам, полученные на основе однократного построения конструкции. Форма, в которой представлены результаты расчёта – рис. 7.

Меню **Последнее построение по стержням** – результаты расчёта по стержням, полученные на основе однократного построения конструкции. Форма, в которой представлены результаты расчёта – рис. 8.

Стержень	Номинальная длина, мм	Отклонение (погрешность изготовления), мм	Фактическая длина, мм	Вычисленное отклонение усиливающих стержней, мм
39(8,10)	3166.95		3166.03	-0.92
40(13,2)	3166.95		3167.43	0.48
41(13,14)	3166.95	0.23	3167.18	
42(2,14)	3166.95	0.54	3167.49	
43(2,15)	3166.95	-0.24	3166.71	
44(14,15)	3166.95	-0.30	3166.65	
45(4,15)	3166.95		3168.35	1.40
46(15,6)	3166.95		3168.49	1.54
47(15,17)	3166.95	0.18	3167.14	
48(6,17)	3166.95	-0.07	3166.89	
49(6,16)	3166.95	-0.29	3166.66	
50(17,16)	3166.95	-0.23	3166.73	
51(5,16)	3166.95		3165.93	-1.02
52(16,11)	3166.95		3165.68	-1.27
53(16,20)	3166.95	0.03	3166.98	

Рис. 8. Последнее построение по стержням

В этом меню автоматически создаются ведомости отклонений по стержням, полученные в результате однократного возведения системы. Числовые значения отклонений конкретного стержня можно вывести в окне данных с помощью клавиш **Up** или **Down**. Анализ результатов расчёта может быть представлен гистограммами распределения отклонений узлов или стержней, которые можно просматривать на соответствующих вкладках программы в меню **Расчёт**.

Краткое описание и представление ещё двух пунктов меню просмотра и анализа результатов расчёта представлено ниже. В этом меню автоматически создаются ведомости отклонений по узлам, полученные в результате однократного возведения системы. Числовые значения отклонений конкретного узла можно вывести в окне данных с помощью клавиш **Up** или **Down**.

Меню **Гистограмма по узлам** – построение гистограммы распределения отклонений, на основе многократных статистических испытаний с возможностью экспорта рисунка в **MS Excel** или **MS Word** – рис. 9. Меню **Гистограмма по стержням** аналогично меню **Гистограмма по узлам** как по внешнему виду, так и по функциональным возможностям – рис. 10.

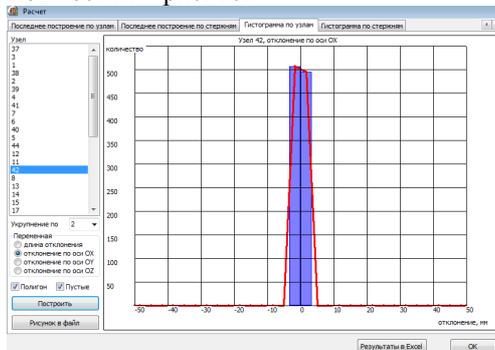


Рис. 9. Меню Гистограмма по узлам

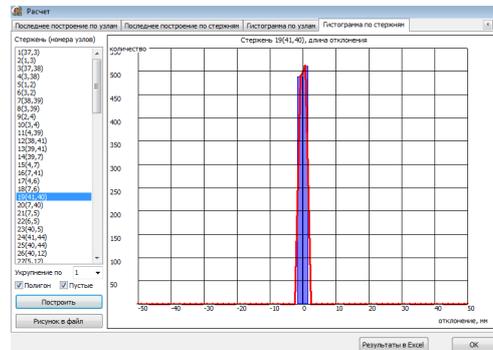


Рис. 10. Меню Гистограмма по стержням

**ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММЫ**

Ниже представлено два примера сопоставительных (контрольных) расчётов плоской размерной цепи, т.е. ячейки плоской шарнирно стержневой системы, показанной на рис. 11. Исследовалось влияние отклонений составляющих звеньев цепи (стержней фермы) на величину зазора в замыкающем звене цепи (стержней фермы).

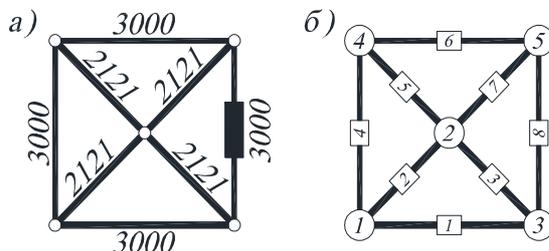


Рис. 11. Схема ячейки фермы: а – геометрическая; б – при расчёте точности

Для определения размера замыкающего звена в плоской шарнирно стержневой конструкции достаточно использовать процедуру пересечения двух окружностей. Поэтому в исследуемой системе были заданы отклонения составляющих звеньев, что представлено в столбце 3 таблицы 1. Затем система с учётом заданных отклонений составляющих звеньев была вычерчена с помощью программы **AutoCAD**. По результатам вычерчивания получено отклонение в замыкающем звене размерной цепи 7,72 мм – столбец 5 таблицы 1. Чтобы получить размер замыкающего звена – стержня 8, но с помощью **ВК РАСК** зададим в него аналогичные исходные данные.

Таблица 1. Исходные данные плоской размерной цепи

Номер стержня	Номинальная длина стержня, мм	Величина погрешности изготовления, мм	Фактическая длина, мм	Вычисление отклонений по длине (зазор)
1	2	3	4	5
1 (1-3)	3000	0	3000	0
2 (1-2)	2121	+2	2123	+2
3 (3-2)	2121	+3	2124	+3
4 (1-4)	3000	+3	3003	+3
5 (2-4)	2121	+2	2123	+2
6 (4-5)	3000	+2	3002	+2
7 (2-5)	2121	+2	2123	+2
8 (5-3)	3000	?	<b>3006</b>	<b>? (7,72 мм)</b>

Чтобы **ВК РАСК** определил размер замыкающего звена только при параметрах, которые заданы в исходных данных необходимо в окне функции **Закон распределения отклонения длины стержня**, задать только **Заданные отклонения**. Завершение задания величины отклонения в каждом стержне выполняется нажатием кнопки **Внести в таблицу** в окне основного меню. Более подробное описание используемых процедур и функций **ВК РАСК** описано выше. В результате расчёта **ВК РАСК** полученное отклонение составляет 7,72 мм, что полностью соответствует величине зазора, который определён путём вычерчивания в программе **AutoCAD**.

Аналогичный расчёт был произведён с помощью **MS Excel** и его результаты аналогичны тем, что получены в **ВК РАСК** и **AutoCAD**. Второй способ верификации выполним для того же объекта т.е. плоской размерной цепи, показанной на рис. 11.

Он заключается в том, что для заданного объекта необходимо в меню **Расчёт** задать в окне функции **Закон распределения отклонения длины стержня** только **Нет отклонений**. В этом случае величины всех погрешностей должны равняться нулю, а размеры фактических длин, показанных в столбце 4 таблицы 1, всех звеньев цепи должны равняться их номинальным величинам – столбец 2 таблицы 1. В результате сравнения решения такой верифицирующей задачи с помощью **ВК РАСК**, **AutoCAD** и **MS Excel** расхождений не было. Другими словами, зафиксировано 100 % совпадение между результатами, получаемыми с помощью программ **AutoCAD**, **MS Excel** и **ВК РАСК** – фактические и номинальные размеры стержня одинаковы.

**ПРИМЕР РАСЧЁТА ТОЧНОСТИ ШАРНИРНО-СТЕРЖНЕВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ**

**Объект исследования** – однополая металлическая оболочка покрытия цилиндрической формы дана на рисунке 13.

**Цель исследования** – расчёт точности шарнирно-стержневой однополой металлической оболочки.

Исследуемая однополая цилиндрическая металлическая оболочка радиусом  $R = 10$  м образована из последовательно соединённых в поперечном направлении  $N = 7$  монтажных элементов, угол раскрытия образующей  $\varphi = 110^\circ$ .

Рассмотрим расчёт точности на примере однополой шарнирно-стержневой оболочки, показанной на рис. 12.

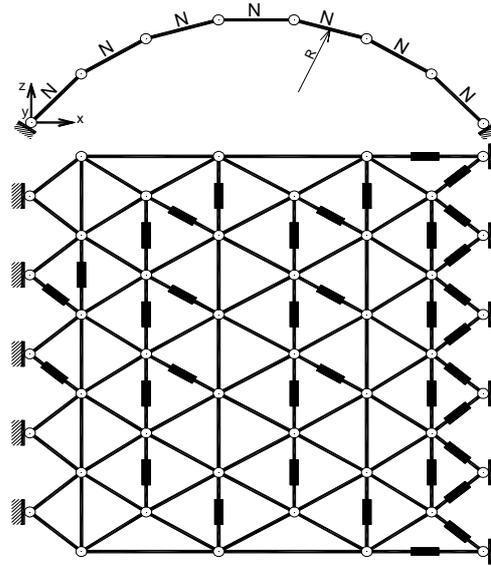


Рис. 12. Схема однополой шарнирно-стержневой оболочки

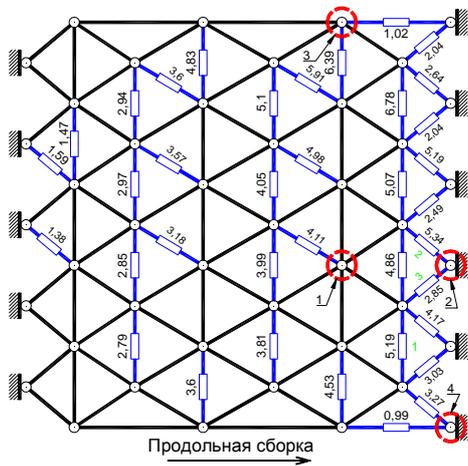


Рис. 13. Схема распределения отклонений однополой шарнирно-стержневой металлической оболочки при продольной сборке (случайные – однократное построение)

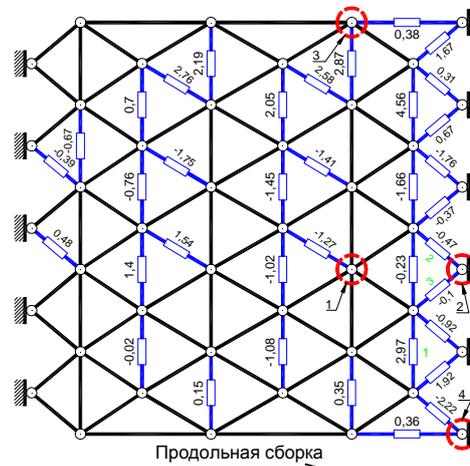


Рис. 14. Схема распределения отклонений однополой шарнирно-стержневой металлической оболочки при продольной сборке (предельные)

Расчёт точности выполнен на примере сборки однослойной цилиндрической оболочки радиусом 10 м со стрелой подъёма 10 м и углом раскрытия оболочки  $110^\circ$ . Рассматриваемая оболочка показана на рис. 13...14 с указанием замыкающих стержней при продольной сборке. Оболочка состоит из семи элементов в поперечном направлении. Обозначение оболочки 110-7, где 110 – угол раскрытия оболочки  $\varphi$ , а 7 – количество

элементов  $N$  в поперечном направлении до оси симметрии оболочки. Длина отдельного стержня оболочки составляет 3166 мм.

Сеть оболочки в плане образована равносторонними треугольниками, т.к. это один из часто используемых при проектировании вариантов формообразования несущих оболочек большепролётных покрытий. Сборка однослойной стержневой цилиндрической оболочки выполняется поэлементно в продольном направлении. На рис. 13, 14 представлены схемы распределения отклонений однопоясной шарнирно-стержневой металлической оболочки при продольной сборке – случайные (однократное построение) и предельные соответственно. В узлах 1...3 на рис. 13...14 зафиксированы максимальные отклонения относительно осей  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ . Следует заметить, что геометрическая форма стержневой оболочки определяется пространственным положением её узлов. Поэтому определение и оценка погрешностей оболочки вследствие неточностей отдельных элементов выполнена по пространственному отклонению для узлов и линейному для замыкающих стержней от номинальной поверхности.

**Замыкающие стержни** – стержни, вызывающие при сборке системы появление сборочных усилий. В дальнейшем результаты расчёта собираемости служат исходными данными для получения сборочных усилий в оболочке. Кроме того, они необходимы для определения параметров компенсаторов замыкающих стержней. Значения линейных отклонений замыкающих стержней, полученные из расчёта собираемости, являются дополнительной нагрузкой. Сеть оболочки образована в виде равносторонних треугольников из монтажных элементов длиной 3166 мм. Допускаемое отклонение продольных размеров элементов на монтаж равно  $\pm 5$  мм, и  $\pm 1,6$  мм – на изготовление элементов по первому классу точности. При продольной и поперечной сборке оболочки 110-7 образуется по 24 замыкающих стержня.

Результаты, полученные из расчёта точности при помощи **ВК РАСК**, могут быть использованы для определения НДС как вновь проектируемого здания или сооружения, так и эксплуатируемого.

## ВЫВОДЫ

На основании полученных результатов можно сделать такие выводы:

1. Обоснована необходимость разработки компьютерной программы для расчёта точности шарнирно-стержневых металлических конструкций с учётом длин стержней, формы отверстий и многосвязности на основе разработанной методики [6].
2. Разработан алгоритм, и программа расчёта точности шарнирно-стержневых большепролётных пространственных металлических покрытий, позволяющая учесть длины стержней, форму отверстий и многосвязность системы. ВК РАСК имеет преимущества по сравнению с другими известными способами и программами расчёта точности, т.к. позволяет учесть длины стержней, форму отверстий (эллиптичность) и многосвязность конструкций.
3. Изложены общие положения, принципы работы и структура, функциональные возможности компьютерной программы ВК РАСК, а также её верификация.
4. Приведён пример расчёта точности однопоясной шарнирно-стержневой оболочки покрытия. Полученные результаты расчёта точности могут быть использованы при определении монтажных – сборочных усилий, например, при помощи методик, изложенных в работах [1, 5, 21].

## Л и т е р а т у р а

1. *Абусамра Авад Юсиф, А.* Влияние начальных несовершенств конструкций двухпоясных сетчатых куполов на их несущую способность [Текст]: диссертация кандидата технических наук / Агтальман Абусамра Авад Юсиф. – Ростов-на-Дону. – 2006. – 148 с.
2. *Алямовский А.А.* Solid Works. Компьютерное моделирование в инженерной практике. [Текст] / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев – СПб.: БХВ-Петербург. – 2005. – 800 с.
3. *Анкин А.В.* Разработка программного обеспечения для расчета пространственной размерной цепи [Текст] / А.В. Анкин, Д.Л. Кузьминский // Известия МГТУ «МАМИ». Раздел 2. Технология машиностроения и материалы. – 2011. – Том. 12. – № 2. – С. 106-110.
4. *Бондарев А.Б.* Компьютерная программа «Вычислительный комплекс «Размерный анализ стержневых конструкций» («ВК РАСК») [Текст] / А.Б. Бондарев, А.М. Югов // Свидетельство про регистрацию авторских прав на компьютерную программу № 47952. – Государственная служба интеллектуальной собственности Украины. – 2013. – 2 с.

5. *Бондарев А.Б.* Методика определения монтажного напряжённо-деформированного состояния большепролётных шарнирно-стержневых металлических покрытий [Текст] / А.Б. Бондарев // Металлические конструкции. – 2016. – Том. 22. – №2. – С. 67-82.
6. *Бондарев А.Б.* Методика расчёта точности большепролётных шарнирно-стержневых металлических покрытий [Текст] / А.Б. Бондарев, А.М. Югов // Инженерно-строительный журнал. – 2016. – Том. 61. – №1. – С. 60-73.
7. *ГОСТ 21780-2006.* Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Расчет точности. [Текст] – Взамен ГОСТ 21780-76; введён 31-01-1984. – М.: Издательство стандартов. – 13 с.
8. *Исаев С.В.* Методика оценки линейной модели пространственной размерной цепи для обеспечения взаимозаменяемости объектов производства при сборке. [Текст]: диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук / Сергей Викторович Исаев. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2007. – 204 с.
9. *Кашуба Л.А.* Геометрия сборки недеформируемых деталей. // Системный анализ в науке и образовании: электронный научный журнал. Дубна. 2011. №4. [Электронный ресурс]. Системные требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://www.sanse.ru/archive/19>
10. *Лебедь Е.В.* Анализ искажений геометрической формы при сборке составных металлических конструкций [Текст] / Е.В. Лебедь, О.В. Шебалина // Промышленное строительство. – 1992. – № 5. – С. 23-24.
11. *Лебедь Е.В.* Анализ начальных усилий секториально-сетчатого купола при полносборной установке в сравнении со звездчатым куполом [Текст] / Е.В. Лебедь, В.А. Етеревский // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2012. – № 4. – С. 91-98.
12. *Лебедь Е.В.* Геометрический расчёт каркасов пространственных сооружений: Учебное пособие. – Саратов: СГТУ. – 2001. – 40 с.
13. *Лебедь Е.В.* Компьютерное моделирование точности возведения двухъярусных металлических куполов [Текст] / Е.В. Лебедь // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – №12. – С. 89-92.
14. *Лебедь Е.В.* Начальные усилия в стержнях односетчатого купола из-за несовершенства его формы при полносборной установке [Текст] / Е.В. Лебедь, В.А. Етеревский // Вестник МГСУ. – М.: МГСУ. – 2011. – Том. 2. – № 2. – С. 137-144.
15. *Лебедь Е.В.* Особенности численного моделирования монтажа каркаса односетчатого купола [Текст] / Е.В. Лебедь // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2003. – Выпуск 3(9). С. 81-86.
16. *Лебедь Е.В.* Оценка точности вычисления среднеквадратического отклонения случайной величины [Текст] / Е.В. Лебедь; ЦНИИПСК им. Н. П. Мельникова. – М., 1991. – 5 с. – Библиогр.: с. 5. – Деп. в ВИНТИ 23.12.91, № 437 – В91.
17. *Лебедь Е.В.* Прогнозирование погрешностей возведения большепролётных металлических куполов на основе геометрического моделирования их монтажа [Текст]: диссертация на соискание научной степени кандидат технических наук / Евгений Васильевич Лебедь. – М.: ЦНИИПСК им. Мельникова. – 1988. – 171 с.
18. *Лебедь Е.В.* Прогнозирование погрешностей возведения каркаса большепролётного 8-ярусного ребристого купола [Текст] / Е.В. Лебедь // Вестник ВолгГАСУ. Серия: Технические науки. – Волгоград: ВолгГАСУ. – 2003. – Выпуск 2-3(8). – С. 11-17.
19. *Лебедь Е.В.* Точность возведения стержневых пространственных металлических покрытий и её прогнозирование [Текст] / Е.В. Лебедь // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – РУДН. – 2013. – № 4. – С. 5-12.
20. *Лебедь Е.В.* Численное исследование погрешностей возведения большепролётных металлических куполов на ЭВМ // Совершенствование конструктивных решений и методов расчёта строительных конструкций: межвуз. науч. сб. / Саратовский гос. техн. ун-т (Саратов) ; отв. ред. К. Ф. Шагивалеев. Саратов: СГТУ. – 1999. – С. 45-52.
21. *Моисеев М.В.* Начальные усилия и собираемость стальных структурных конструкций при случайных отклонениях длин стержней [Текст]: диссертация на соискание научной степени кандидат технических наук / Михаил Викторович Моисеев. – Казань: КГАСА. – 2004. – 164 с.
22. Начало работы в MicroSurvey CAD 2010: руководство пользователя [Текст] / MicroSurvey Software Inc. – Westbank, BC: Standard и PLUS. – 2011. – 248 с.
23. Руководство и другие материалы по программе GEOZEM. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.geozem.com>.
24. Руководство пользователя Objectland в HTML-формате. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.objectland.ru/support/doc/usermanual](http://www.objectland.ru/support/doc/usermanual).
25. *Савельев В.А.* Теоретические основы проектирования металлических куполов [Текст]: автореферат диссертации доктора техн. наук / Виталий Алексеевич Савельев. – М.: 1995. – 40 с.
26. *Савельев В.А.* Численное моделирование действительной формы консольной составной конструкции. [Текст] / В.А. Савельев, Е.В. Лебедь; ЦНИИПСК им. Мельникова. – М. – 1988. – 24 с. – Деп. во ВНИИИС 09.07.87, № 8102.

27. Савельев В.А. Математическое моделирование монтажа пространственных конструкций [Текст] / В.А. Савельев, О.В. Шебалина // Промышленное строительство.–1991. – № 1. – С. 18-20.
28. Шаломеенко М.А. Размерный анализ в Solid Works. [Текст] / М.А. Шаломеенко // САПР и графика. Инструменты АРМ. – 2010. – № 10. – С. 40-42.
29. Югов А.М. Методика определения сборочных усилий в большепролетной пространственной стержневой системе [Текст] / А.М. Югов, А.Б. Бондарев // Металлические конструкции. – 2013. – Том 19. – № 3. – С. 137-142.
30. AutoCAD Civil 3D 2009. Руководство пользователя / Autodesk, Inc. – San Rafael, CA: Autodesk. – 2008. – 2452 с.
31. Bondarev A.B., Yugov A.M. The Method of Generating Large-Span Rod Systems with the Manufacturer Defect and Assembly Sequence. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 117. pp. 953-963.
32. Charles R. Farrar, Worden Keith, Todd D. Michael, Park Gyuhae, Nichols Jonathon, Adams E. Douglas, Bement T. Matthew, Farinholt Kevin Impacts of artificial intelligence and optimisation on design, construction and maintenance. Los Alamos, New Mexico: Los Alamos. National Laboratory. 2007. 143 p.
33. Gaul L., Albrecht H., Wirmitzer J. Semi-active friction damping of large space truss structures. *Shock and Vibration*. 2004. Vol. 11. pp. 173-186.
34. Hasan R., Xu L., Grierson D.E. Push-over analysis for performance-based seismic design. *Computers and Structures*. 2002. № 80. pp. 2483-2493.
35. Kaouk Zimmerman Structural damage assessment using a generalized minimum rank perturbation theory. *Proceedings of the 34th AIAA SDM Conference*. La Jolla. California. 1993. pp. 1529-1538.
36. Kartal M.E. Basaga H.B., Bayraktar A., Muvafik M. Effects of semi-rigid connection on structural responses. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2010. Vol. 10. pp. 22-35.
37. Kohtaro Matsumoto, Wakabayashi Sachiko, Noumi Masahiro, Yoshida Tetsuji, Ueno Hiroshi, Fukase Yutaro Space Truss Handling Experiment on ETS-VII. *Automation and Robotics in Construction XVI*. UC3M. 1999. pp. 225-230.
38. Kaveh A., Nouri M. Weighted graph products for configuration processing of planar and space structures. *International Journal of Space Structures* 2009. Vol. 24. № 1. pp.13-26.
39. Makoto Ohsaki Zhang Jingyao Stability conditions of press stressed pin-jointed structures. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2006. Vol. 41. pp. 1109-1117.
40. Makowski Z.S. Development of jointing systems for modular prefabricated steel space structures. *Proceedings of the international symposium*. Warsaw: Poland. 2002. pp. 17-41.
41. Ömer KELEŞOĞLU, Mehmet ÜLKER Fuzzy optimization of geometrical nonlinear space truss design. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* 2005. Vol. 80. № 5. pp. 321-329.
42. Pearson J.E., Hansen S. Experimental Studies of a Deformable-Mirror Adaptive Optical System. *Journal of Optical Society America*. 1977. № 67 pp. 360-369.
43. Tokunbo Ogunfunmi Adaptive Nonlinear System Identification. *The Volterra and Wiener Model Approaches*. USA: Springer Science+Business Media, LLC. 2007. 229 p.
44. Tsou P., Shen M.-H. Structural damage detection and identification using neural network. *Proceedings of the 34th. SDM Conference*. La Jolla, California. April. 1993. pp. 3551-3560.
45. Yue Yin Huang Xin, Han Qinghua, Bai Linjia Study on the accuracy of response spectrum method for long-span reticulated shells. *International Journal of Space Structures* 2009. Vol. 24. № 1. pp. 27-35.

#### References

1. Abusamra, Avad Yusif Attalman Influence of initial imperfections designs of two-mesh domes on their load-carrying capacity: the thesis submitted for the Scientific Degree on competition of Candidate of Engineering. Rostov-on-Don. 2006. 148 p.
2. Alyamovsky A. A., Sobachkin A. A., Odintsov E. V., Kharitonovich A. I., Ponomarev N. B. *Solid Works*. Computer modeling in engineering practice. SPb.: BHV-Petersburg. 2005. 800 p.
3. Ankin A. V., Kuzminskiy D. L. Software to calculate the spatial dimension chains. *Proceedings of the MSTU "MAMI". Section 2. Mechanical Engineering and Materials*. M.: MAMI, 2011. №2, Vol. 12. Pp. 106-110.
4. Certificate on registration of copyright in a computer program number 47952 Ukraine. Computer program «Computational Complex "Dimensional analysis of rod structures"» («CC DASC») / A. B. Bondarev, A. M. Yugov (Ukraine). No. 48382; declaration 20.12.2012; published 20.02.2013, Bul. No. 1. 2 p. (in Russian)
5. Bondarev Alexey. The Method of Determination of Mounting Stress-Strain State-Span Hinge-Rod Metal Coatings. *Metal Constructions*, 2016. Volume 22. Number 2. pp. 67-82.
6. Bondarev, A. B.; Yugov, A. M. The method of calculating the accuracy of large-span metal rod systems. *Magazine of Civil Engineering*, 2016. No. 1(61). pp. 60-73.
7. GOST 21780-2006. Russian State Standard 21780-2006. System for ensuring the accuracy of the geometric parameters in construction. Calculation accuracy. M.: Publishing standards. 13 p.

8. Isaev S. V. Methodology to evaluate the linear model of the spatial dimension chain to ensure interchangeability of production facilities for assembly. Ph.D. Dissertation Special: 05.11.15. Moscow, 2007. 204 p.
9. Kashuba L. A. Deformable geometry of the assembly parts. System analysis in science and education. Electronic scientific journal. Dubna. 2011. №4. [Electronic resource]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/19>
10. Lebed E.V., Shebalina O.V. Analysis of Distortions of the Geometric Shape in the Assembly of Composite Metal Structures. *Industrial Construction*. 1992. No. 5. pp. 23-24.
11. Lebed E. V.; Eterevsky V. A. Analysis of initial stresses in a sectorial lattice dome during installation as an assembled structure in comparison with a star lattice dome. *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Researches*, 2012, No. 4, pp. 91-98.
12. Lebed E.V. Geometric calculation of space structures frame. *Textbook*. Saratov: SSTU. 2001. 40 p.
13. Lebed E.V. Computer Modeling of the Accuracy of Erecting Two-Layer Metal Domes. *Industrial and Civil Engineering*. 2013. No. 12. pp. 89-92.
14. Lebed E.V. Eterevsky V.A. Initial stresses in the bars of a one-layer lattice dome due to the imperfections of its form during installation as an assembled structure. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2011. Vol. 2. No. 2. pp. 137-144.
15. Lebed E.V. Particularities of numerical simulation of carcassing of single-grid dome. In: *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture*. 2003. Issue 3(9). pp. 81-86.
16. Lebed E.V. Assessment of accuracy of calculation of root-mean-square deviation of chance variable. Moscow. 1991. 5 p.
17. Lebed E.V. Prediction errors in the construction of large-span metal dome based on geometric modeling of their installation: the thesis submitted for the Scientific Degree on competition of Candidate of Engineering. Moscow. 1988. 171 p.
18. Lebed E.V. Forecasting of errors of carcassing of large-span high-rise ribbed dome. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Technical science*, 2003, Issue 2-3(8), pp. 11-17.
19. Lebed E.V. Accuracy in construction of metal space framed roofs and its predicting. *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Researches*. 2013. No. 4. pp. 5-12.
20. Lebed E.V. Numerical investigation of imprecision of construction of long span steel domes in ECM. *Advanced of structural concepts and methods of analysis of engineering structures: inter-university scientific collection*. Edited by Shagivaleev K.F. Saratov: SSTU. 1999. pp. 45-52.
21. Moiceev M.V. Starting effort and collection of steel structural constructions in the process of accidental variation of grip length: the thesis submitted for the Scientific Degree on competition of Candidate of Engineering. Kazan, 2004. 164 p.
22. Getting Started in MicroSurvey CAD 2010. *User Guide*. MicroSurvey Software Inc. Westbank, BC: Standard and PLUS. - 2011. - 248 p.
23. Guide and other materials on the program GEOZEM. [Electronic resource]. URL: <http://www.geozem.com>.
24. User Manual Objectland в HTML. [Electronic resource]. URL: [www.objectland.ru/support/doc/usermanual](http://www.objectland.ru/support/doc/usermanual).
25. Savelyev V.A. Theoretical foundations of metal cupolas: Author's abstract the thesis submitted for the Scientific Degree on competition of Doctor of Engineering. Moscow. 1995. 40 p.
26. Savelev V.A., Lebed E.V. Numerical simulation of real form of overhanging composite construction. Moscow. 1988. 24 p.
27. Savelev V.A., Lebed E.V., Shebalina O.V. Mathematical Modeling of Spatial Structures Installation. *Industrial Construction*. 1991. No. 1. pp. 18-20.
28. Shalomeenko M. A. Dimensional Analysis in Solid Works. // CAD and graphics. Tools APM. 2010. № 10. pp. 40-42.
29. Yugov, Anatoliy; Bondarev, Alexey Assembly Efforts in Wide-Span Spatial Rod System Determining Technique. *Metal Constructions*. 2013. Volume 19. Number 3. pp. 137-142.
30. User Manual AutoCAD Civil 3D 2009. US: Autodesk. 2008. 2452 p.
31. Bondarev A.B., Yugov A.M. The Method of Generating Large-Span Rod Systems with the Manufacturer Defect and Assembly Sequence. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 117. pp. 953-963.
32. Charles R. Farrar, Worden Keith, Todd D. Michael, Park Gyuhae, Nichols Jonathon, Adams E. Douglas, Bement T. Matthew, Farinholt Kevin Impacts of artificial intelligence and optimization on design, construction and maintenance. Los Alamos, New Mexico: Los Alamos. National Laboratory. 2007. 143 p.
33. Gaul L., Albrecht H., Wirmitzer J. Semi-active friction damping of large space truss structures. *Shock and Vibration*. 2004. Vol. 11. pp. 173-186.
34. Hasan R., Xu L., Grierson D.E. Push-over analysis for performance-based seismic design. *Computers and Structures*. 2002. № 80. pp. 2483-2493.

35. *Kaouk Zimmerman* Structural damage assessment using a generalized minimum rank perturbation theory. *Proceedings of the 34th AIAA SDM Conference*. La Jolla, California. 1993. pp. 1529-1538.
36. *Kartal M.E., Basaga H.B., Bayraktar A., Muvafik M.* Effects of semi-rigid connection on structural responses. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2010. Vol. 10. pp. 22-35.
37. *Kohtaro Matsumoto, Wakabayashi Sachiko, Noumi Masahiro, Yoshida Tetsuji, Ueno Hiroshi, Fukase Yutaro* Space Truss Handling Experiment on ETS-VII. *Automation and Robotics in Construction XVI. UC3M*. 1999. pp. 225-230.
38. *Kaveh A., Nouri M.* Weighted graph products for configuration processing of planar and space structures. *International Journal of Space Structures*. 2009. Vol. 24. № 1. pp.13-26.
39. *Makoto Ohsaki Zhang Jingyao* Stability conditions of press stressed pin-jointed structures. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2006. Vol. 41. pp. 1109-1117.
40. *Makowski Z.S.* Development of jointing systems for modular prefabricated steel space structures. *Proceedings of the international symposium*. Warsaw: Poland. 2002. Pp. 17-41.
41. *Ömer KELEŞOĞLU, Mehmet ÜLKER* Fuzzy optimization of geometrical nonlinear space truss design. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*. 2005. Vol. 80. № 5. pp. 321-329.
42. *Pearson J.E., Hansen S.* Experimental Studies of a Deformable-Mirror Adaptive Optical System. *Journal of Optical Society America*. 1977. № 67 pp. 360-369.
43. *Tokunbo Ogunfunmi* Adaptive Nonlinear System Identification. The Volterra and Wiener Model Approaches. USA: Springer Science+Business Media, LLC. 2007. 229 p.
44. *Tsou P., Shen M.-H.* Structural damage detection and identification using neural network // *Proceedings of the 34th. SDM Conference*. La Jolla, California. April. 1993. pp. 3551-3560.
45. *Yue Yin Huang Xin, Han Qinghua, Bai Linjia* Study on the accuracy of response spectrum method for long span reticulated shells. *International Journal of Space Structures*. 2009. Vol. 24. № 1. pp. 27-35.

#### COMPUTER PROGRAM CALCULATION ACCURACY HINGE-BAR SYSTEMS

BONDAREV A.B.

*Joint Stock Company "Matrosov Mine" (JSC «RiM»), Russian Federation*

This article gives an overview and analysis of previous studies, as well as computer programs for calculation of accuracy, including construction steel. The description and analysis of the functionality of the new computer complex "Dimensional Analysis of beam structures" (VC RASK). Verification of EC RASK, confirming the correctness and accuracy of the calculation accuracy. Achieved description of the user experience technology with various menus and the whole VC RASK. An example of the calculation accuracy of the example odnopoyasnoy hinged-rod metal shell. The general form of hinged-rod with metal objects to using the VC RASK can be made exactly the calculation can be varied: a cylindrical, spherical, elliptical, toroidal, conical and other.

**Key words:** calculation accuracy, a computer program, large-span metal spatial coatings, dimensional chain, assembly deviation.

