УДК 624.014
Агафонкин В.С. – кандидат технических наук, доцент
E-mail: agafonkin@kgasu.ru
Моисеев М.В. – кандидат технических наук, старший преподаватель
E-mail: MMoi76@rambler.ru
Исаева Л.А. – кандидат технических наук, доцент
Дымолазов М.А. – старший преподаватель
Казанский государственный архитектурно-строительный университет

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОГО ПОКРЫТИЯ АКТОВОГО ЗАЛА УЧЕБНО-ЛАБОРАТОРНОГО КОРПУСА КГТУ ИМ. А.Н. ТУПОЛЕВА

АННОТАЦИЯ

Разработана новая структурная конструкция, выполненная из профилей, широко применяемых в строительстве, и имеющая возможность технологичного изготовления на заводах металлоконструкций. Выполнена оптимизация структурной конструкции. Определены вероятные значения начальных усилий, возникающих вследствие случайного отклонения отметок оголовков колонн. Назначены допускаемые отклонения элементов конструкции от номинальных значений, обеспечивающие полную собираемость конструкции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: структурные конструкции, оптимизация, начальные усилия, собираемость конструкций.

Agafonkin V.S. – candidate of technical sciences, associate professor
Moiseev M.V. – candidate of technical sciences, senior lecturer
Isaeva L.A. – candidate of technical sciences, associate professor
Dymolazov M.A. – senior lecturer
Kazan State University of Architecture and Engineering

DEVELOPMENT AND RESEARCH THE STRUCTURAL PLATE ABOVE ASSEMBLY HALL OF STUDY AND LABORATORY BLOK OF KSTU NAMED AFTER A.N. TUPOLEV

ABSTRACT

The new structural construction has been developed and made from widely used of profiles and has the possibility to produce on factories of steel construction. Optimization of structural construction has been done. It has been determined the probable value of the initial efforts that arising from the random deviation of the columns height level. The tolerances of structural elements from the nominal values to ensure full gathering structure have been assigned.

KEYWORDS: structural design, optimization, initial efforts, opportunity to build.

Структурные конструкции стали широко применяться в покрытиях различных по назначению зданий еще с 60-х годов XX столетия [1]. Архитектурная выразительность и гибкость применения для зданий различного назначения, возможность перекрывать большие пролеты, максимальная унификация узлов и стержневых элементов, пространственная работа и повышенная надежность от разрушений делают их привлекательными для использования и сегодня. Так, для покрытия актового зала учебно-лабораторного корпуса КГТУ им. А.Н. Туполева в г. Казани было принято решение использовать металлическую структурную конструкцию, которая являлась рациональной для данной формы в плане актового зала. Покрытие зала должно было иметь сложную конфигурацию в плане с пролетами по основным взаимно перпендикулярным направлениям 27 и 30 м, которая образовывалась наложением прямоугольника размером 21х18 м на квадрат 21,2х21,2 м, развернутый на 45^0 по отношению к прямоугольнику.

Целью данной работы являлась разработка металлоконструкций структурного покрытия, отвечающего в полной мере архитектурному замыслу, использующего наиболее технологичные конструкции узлов для условий изготовления на заводах металлоконструкций Республики Татарстан, обладающего оптимальным весом и имеющего высокий уровень собираемости.

В результате выбора конструктивного решения структурного покрытия были определены габаритные размеры покрытия и топология структуры. Структурную конструкцию предполагалось выполнить из наклонных перекрестных ферм двух направлений с квадратными поясными ячейками модулем 3х3 м.

Членение стержневой схемы структурного покрытия на монтажные элементы принято из плоских ферм в одном направлении и доборных стержней верхних и нижних поясов – в другом направлении. Плоские фермы выполнены из прокатных уголков – пояса из одиночных уголков, а стержни решетки из парных уголков, образующих тавровое сечение. Плоские фермы были разделены на монтажные элементы длиной до 13 м и устанавливаются в структурном покрытии под углом 45^0 к горизонтальной плоскости. Уголки поясов смежных ферм образуют при этом крестообразное сечение. В узлах структуры уголки поясов имеют продольные прорези, в которых устанавливаются горизонтальные фасонки. На фасонки установлены доборные стержни поясов в поперечном к фермам направлении (рис. 1). Доборные элементы поясов выполнены из гнутосварных квадратных коробчатых профилей. По укрупнительным стыкам монтажных элементов ферм устанавливаются доборные стержни раскосов, выполненные из парных уголков. Структурное покрытие устанавливается на стойки-надколонники, которые опираются на колонны актового зала.

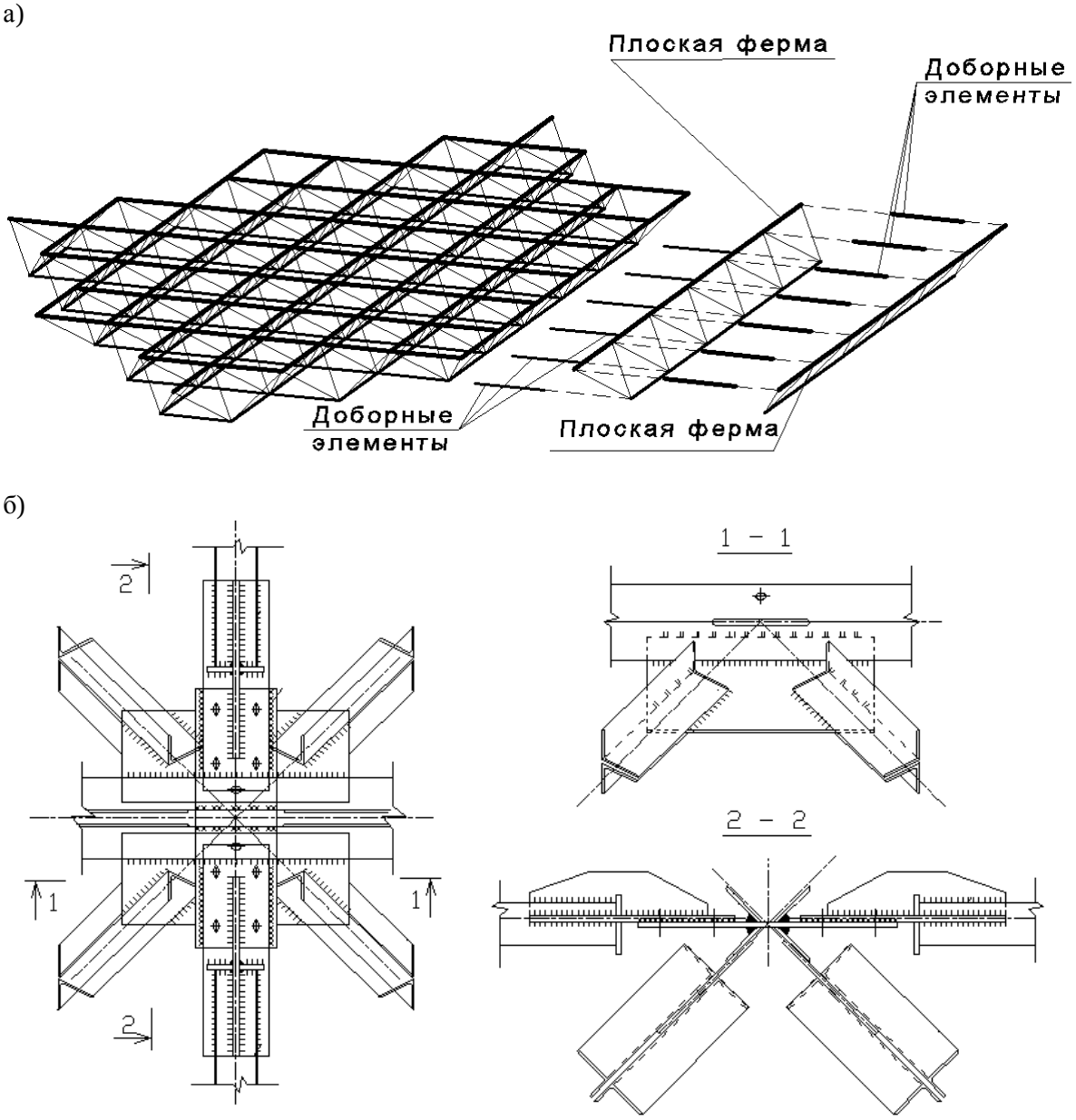

Рис. 1. Общий вид структурной конструкции (а) и типовой узел сопряжения стержней (б)

Первой задачей являлось определение оптимального распределения типов сечения стержней (жесткостей) по структурной конструкции.

Покрытие такого типа является многократно статически неопределимой конструкцией. Усилия в элементах таких конструкций в значительной степени зависят от жесткостей (сечений) этих элементов.

Для определения оптимального распределения жесткостей стержней структурного покрытия был разработан алгоритм такого расчета. Этот алгоритм был реализован в программе “OPT-STR1”.

Алгоритм оптимального назначения жесткостей основан на последовательном прочностном перерасчете конструкции. Выбор назначаемых типов сечений производится из заранее задаваемого перечня (списка) сечений. Таким образом, учитываются конструктивные ограничения, обусловленные применяемым сортаментом профилей. В качестве типов сечений могут быть применены любые профили с вычисленными геометрическими характеристиками: площадь поперечного сечения, минимальный радиус инерции сечения, также задана марка стали, по которой определяется расчетное сопротивление.

Начальное распределение жесткостей может приниматься любое. В расчете первоначально принимался единый тип сечения. В процессе оптимизационного расчета типы сечений элементов конструкции переназначались с учетом усилия в рассматриваемом стержне и несущей способности принимаемого типа сечения стержня. Изменение жесткостных характеристик элементов покрытия вызывает перераспределение и изменение напряженного состояния всей конструкции. Последовательное выполнение статического расчета и назначения типов сечения по стержням конструкции выполняется до тех пор, пока принятое распределение жесткостей не перестанет изменяться. Расчеты показали, что процесс сходится через 3-7 шагов.

В результате оптимизационного расчета были определены типы сечений для всех стержней структуры. При этом с использованием девяти типов сечения стержней вес конструкции снизился, по сравнению с однотипными стержнями в структуре, с 28 т до 12.95 т, что составляет 49,3 % экономии стали.

Далее распределение типов стержней по конструкции корректировалось с учетом типизации отправочных элементов ферм. В результате было принято распределение жесткостей с пятью типами сечения. По направлению расположения ферм все верхние пояса структурного покрытия выполняются из парных уголков 100х7 крестообразного сечения, а все нижние – из парных уголков 80х6. Доборные стержни верхнего и нижнего поясов в перпендикулярном к фермам направлении выполняются из 2-х типов коробчатых сечений гнутосварных труб 100х4 и 80х4. Все стержни решетки – парные уголки 2-х типов ⎦⎣ 80х6 и 50х5.

При этом с учетом типизации расход стали в структурном покрытии без учета дополнительных деталей на узлы составляет 16,28 т на все покрытие, или 33,5 кг/м^2. Снижение расхода стали в структуре с выполненной типизацией стержней, по сравнению с вариантом при однотипных стержнях, составляет 39,2 %.

Схема размещения типов сечений стержней структуры с оптимальным размещением жесткостей представлена на рис. 2.

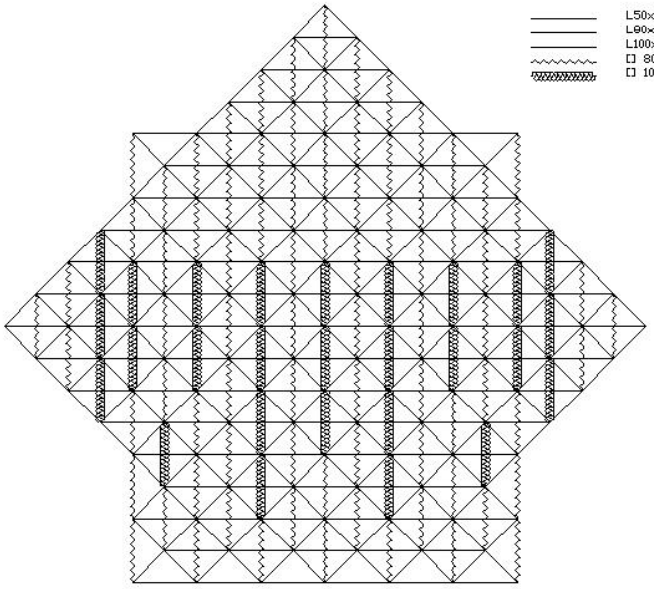

Рис. 2. Оптимальное размещение типов стержней по структурной конструкции с учетом типизации

Второй задачей являлось определение начальных усилий, вызванных случайным отклонением оголовков колонн от проектных значений, и учет их при назначении сечений стержней.

Структурная конструкция опирается на 16 колонн, расположенных по контуру. Смонтированные колонны могут иметь отклонения отметок оголовков от номинальных (проектных) величин. Значения допустимых отклонений регламентированы [2] и не должны превышать ± 5 мм.

Вследствие отклонений отметок оголовков колонн от номинальных значений в элементах структурной конструкции возникают дополнительные начальные усилия N_o [3]. Значение усилия N_o является вероятностной величиной, зависящей от случайного распределения вероятных значений отклонений отметок верха оголовков всех колонн. Поэтому была разработана методика нахождения вероятных значений начальных усилий в стержнях структурной конструкции от отклонений отметок верха оголовков колонн.

Изменение положения верха оголовка *j*-ой колонны на величину s_j будет вызывать в *i*-ом стержне усилие

$$N_{i,j} = \overline{N}_{i,j} s_j , \tag{1}$$

где $\overline{N}_{i,j}$ – единичное усилие, возникающее в *i*-ом стержне при отклонении отметки верха *j*-ой колонны на s_j=1.

Если s_j носит случайный характер, то и усилие $N_{i,j}$ – случайная величина. Используя теорему о произведении постоянной величины на случайную величину [4], можно определить среднеквадратичное отклонение значения усилия в *i*-ом стержне, вызванное вероятным отклонением отметки верха оголовка *j*-ой колонны

$$s\,(N_{i,j}) = \sqrt{\overline{N}_{i,j}^2 s^{\,2}(s_j)}\ . \tag{2}$$

Достаточно надежное значение случайной величины $N_{i,j}$ будет при стандарте t = 3, тогда получим

$$3s\,(N_{i,j}) = \sqrt{\overline{N}_{i,j}^2 (3s\,(s_j))^2}\ . \tag{3}$$

Случайная величина отклонения отметки верха оголовка колонны распределена по нормальному закону. Поэтому, принимая во внимание, что $3s\,(s_j) = d_j$, где d_j – допускаемое отклонение верха *j*-ой колонны, можно записать

$$3s\,(N_{i,j}) = \sqrt{\overline{N}_{i,j}^2 \cdot d_j^{\,2}}\ . \tag{4}$$

Вероятное значение N_o при отклонении отметок оголовков всех колонн определяем как сумму среднеквадратических отклонений усилий, вызываемых вероятным отклонением каждой колонны в отдельности

$$N_o = \sqrt{\sum\ \overline{N}_{i,j}^2 d_j^{\,2}}\ . \tag{5}$$

Значения $N_{i,j}$ определялись в результате статических расчетов. Отклонение отметки верха оголовка колонны моделировалось температурным воздействием. Значение изменения температуры при этом определялось по формуле:

$$\Delta t = \frac{d}{a\,\mathbf{l}_k}\ , \tag{6}$$

где α=0,12·10^{-4} ^{o}C^{-1} – коэффициент линейного расширения стали; $\mathbf{l}_к$ – высота колонны.

Результаты статического расчета обрабатывались средствами Microsoft Excel. В результате были получены вероятные значения начальных усилий во всех стержнях структурной конструкции, вызванные случайным отклонением отметок оголовков колонн. Данные начальные усилия составили до 12 % от расчетных усилий в нагруженных стержнях. Начальные усилия были учтены при оптимизационном расчете и назначении жесткостей стержней, как дополнительных усилий.

Третьей задачей являлось определение допускаемых отклонений при изготовлении и монтаже, обеспечивающих полную собираемость конструкции [5].

При сборке структурного покрытия плоские фермы последовательно устанавливаются в наклонное положение и соединяются доборными поясными элементами через фасонки из стального листа. Доборные стержни поясов собираются на болтах с последующей приваркой к фасонкам.

Фасонки проходят через прорези в поясных уголках плоских ферм, объединяя в узлы стержни структурной конструкции.

При изготовлении плоских ферм могут возникнуть следующие отклонения, влияющие на собираемость структурной конструкции:

- отклонения расстояния между центрами узлов ферм вдоль поясов *dr*;
- отклонения центра прорези в обушках поясных уголков от центра узла ферм *dc*;
- отклонение высоты фермы *dh*.

Эти отклонения являются случайными величинами.

Отклонения расстояния между центрами узлов ферм вдоль поясов *dr* и отклонения центра прорези в обушках поясных уголков от центра узла *dc* фермы будут влиять на возможность установки фасонки в прорезь. Сумма этих двух отклонений является вероятностной величиной и определяется по теореме о сложении двух независимых случайных величин.

$$dx = \sqrt{dr^2 + dc_x^2}\ . \qquad (7)$$

Компенсатором этих отклонений является зазор, равный разнице между длиной прорези и шириной фасонки *b*. При этом условие собираемости структурной конструкции в направлении *x* будет иметь вид

$$\pm \delta x \cdot \sqrt{n} \le b/2, \qquad (8)$$

где n – количество панелей пояса стыкуемой фермы.

Собираемость структуры в направлении *x* будет обеспечена при допускаемых отклонениях *dr*=3 мм и *dc*=2 мм.

Отклонение высоты плоской фермы *dh*, расположенной наклонно, можно разложить на две составляющие, ориентированные по основным осям расчетной схемы структурной конструкции

$$dh_y = dh\ cos a$$
$$dh_z = dh\ sin a, \qquad (9)$$

где *a* – острый угол между плоскостями раскосов и поясов структуры.

Компенсатором отклонений dh_z является зазор, вызванный разницей между шириной прорези a_n и толщиной фасонки $t_ф$. При 100 % собираемости допустимое значение отклонения dh_z , которое полностью компенсируется, будет равно

$$dh_z = \pm 2(a_n - t_ф), \qquad (10)$$

что составляет ± 4 мм для принятых размеров прорези и толщины фасонки.

При учете вероятности отклонения высоты соседних ферм допустимое значение dh_z можно увеличить по формуле (11) до ± 6,8 мм

$$dh_z = \pm(2(a_n - t_ф) + \sqrt{2(a_n - t_ф)^2}\ . \qquad (11)$$

Смещение пояса фермы на величину dh_y может происходить как к центру узла структуры, так и от него. Смещение к центру узла ограничено расстоянием до пояса соседней фермы y_1. Смещение от центра узла структуры ограничено расстоянием от края фасонки доборных элементов до наклонной плоскости уголка пояса y_2. При угле $a=45^0$ $d\ h_y = d\ h_z$..

При изготовлении доборных элементов могут возникнуть отклонения между группами отверстий, расположенных по концам элементов dl_n, и отклонения между центрами отверстий в врезных листах $dl_{nф}$. При изготовлении фасонок могут также возникнуть отклонения между центрами отверстий $dl_ф$. Эти отклонения будут влиять на собираемость конструкции в направлении *y*. При этом условие собираемости структурной конструкции в направлении *y* записывается в виде

$$y_1 \le \pm\sqrt{\delta h_y^2 + \delta l_n^2 + \delta l_{nф}^2 + \delta l_ф^2} \le y_2\ . \qquad (12)$$

Собираемость структуры в направлении *y* будет обеспечена при следующих допускаемых отклонениях dl_n=2 мм, $dl_{nф}$=1 мм, $dl_ф$=1 мм.

По результатам проведенных исследований была выполнена проектная рабочая документация на изготовление структурной конструкции. В настоящее время данная конструкция изготовлена и установлена в проектное положение (рис. 3, 4).

Рис. 3. Общий вид смонтированной структурной конструкции

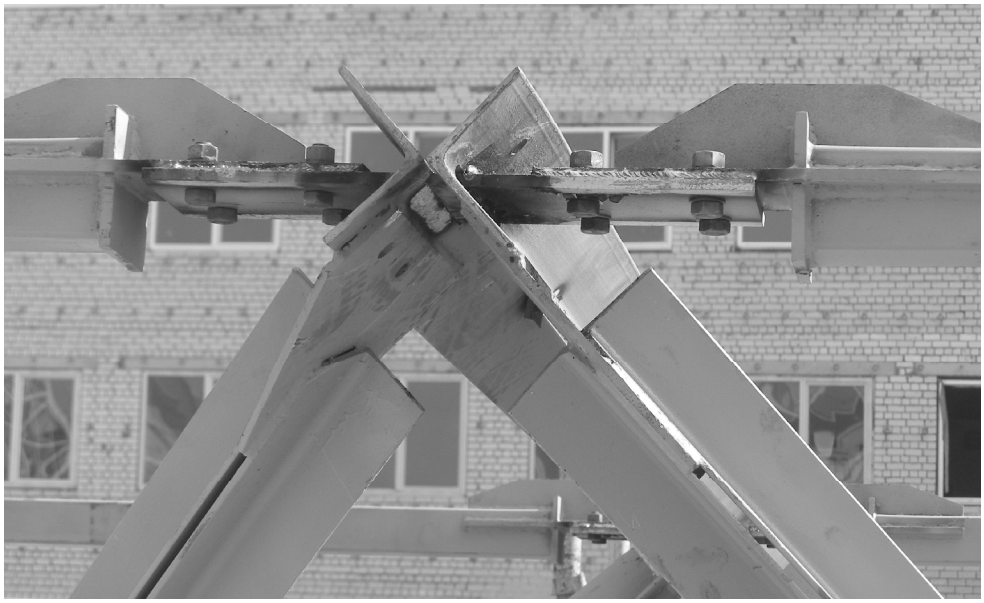

Рис. 4. Узел структурной конструкции

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Песчанский П.С., Пугачевская Л.М. Металлические решетчатые пространственные конструкции за рубежом. Зарубежный опыт проектирования. – М.: ЦНИИС Госстроя СССР, 1974. – 76 с.
2. СНИП 3.03.01-87 Несущие и ограждающие конструкции. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 192 с.
3. Моисеев М.В., Агафонкин В.С., Ефимов О.И. Расчет структурных конструкций с отклонениями длин стержней // Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте: Материалы международной научно-технической конференции 23-26 сентября 2002 г. – Самара, 2002. – С. 32-33.
4. Гмурман Г.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие для вузов. – 6-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 1997. – 479 с.: ил.
5. ГОСТ 21780-83 Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Расчет точности. – М.: Изд-во стандартов,1985. – 13 с.