

УДК 624.014

## ОБ ОПТИМАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ СТАЛЬНОЙ БАШНИ

С.А. Ращепкина, Т.О. Котельникова, С.В. Ращепкин

Выполнен анализ конструктивных решений стальных башен и сравнительный расчет в программном комплексе. Показано влияние типа профилей на несущую способность башни и выбрано наиболее оптимальное конструктивное решение. Полученные результаты рекомендуются к применению при проектировании стальных башен для дымовых труб на объектах энергетики.

*Ключевые слова:* башня; металл; конструкции; расчет; анализ; эпюры.

---

## БОЛОТ МУНАРАСЫНЫН ОПТИМАЛДУУ ДОЛБООРУН ТҮЗҮҮ ЖӨНҮНДӨ

С.А. Ращепкина, Т.О. Котельникова, С.В. Ращепкин

Бул макала болот мунараларынын конструктивдүү чечимдери талдоого алынды жана программалык комплексте салыштырма эсептөө жүргүзүлгөн. Мунаралардын жүк көтөрүү жөндөмдүүлүгүнө профилдердин тиби да таасирин тийгизе тургандыгы көрсөтүлдү жана бир кыйла оптималдуу конструктивдүү чечим кабыл алынды. Алынган натыйжаларды энергетика объектилеринде морлор үчүн болот мунаралардын долбоорун түзүүдө пайдалануу сунушталат.

*Түйүндүү сөздөр:* мунара; металл; конструкциялар; эсептөө; талдоо; эпюр.

---

## ABOUT THE OPTIMAL DESIGN OF A STEEL TOWER

S.A. Rashchepkina, T.O. Kotelnikova, S.V. Rashchepkin

The analysis of structural solutions of steel towers and a comparative calculation in the software package was performed. The influence of the profile type on the bearing capacity of the tower is shown and the most optimal design solution is chosen. The results obtained are recommended for use in the design of steel towers for chimneys at energy facilities.

*Keywords:* tower; metal; structures; calculation; analysis; diagrams.

**Конструктивные типы башен промышленных объектов.** При проектировании стальных башен для поддержания вытяжных дымовых труб, предназначенных для удаления вредных веществ, негорючих газов, форму несущей решетчатой башни и ее размеры надо находить с учетом ряда параметров, оказывающих влияние на работу башни. Это необходимо для обеспечения не только ее несущей способности и экономии материала, но и технологичности изготовления, условий высоко-котехнологичного монтажа, удобного размещения башни на генеральном плане и удобства ее эксплуатации и проведения ремонтных работ.

Стальную решетчатую башню обычно проектируют с тремя, четырьмя гранями и более. Газо-

отводящий ствол возвышается над башней в пределах 2–2,5 диаметра газоотводящей трубы. При этом накладываются ограничения на разницу отметки ствола и башни, которая должна быть не более 10 метров. По высоте стальной башни необходимо проектировать диафрагмы, к которым крепятся газоотводящие стволы и площадки. Различают следующие варианты опирания газоотводящих труб:

- на железобетонный фундамент;
- на дополнительную опору, расположенную под стволами;
- на нижнюю диафрагму стальной башни.

Проведён обзор по литературным источникам и выявлены характерные типы конструктивных решений башен (рисунок 1) [1–6].

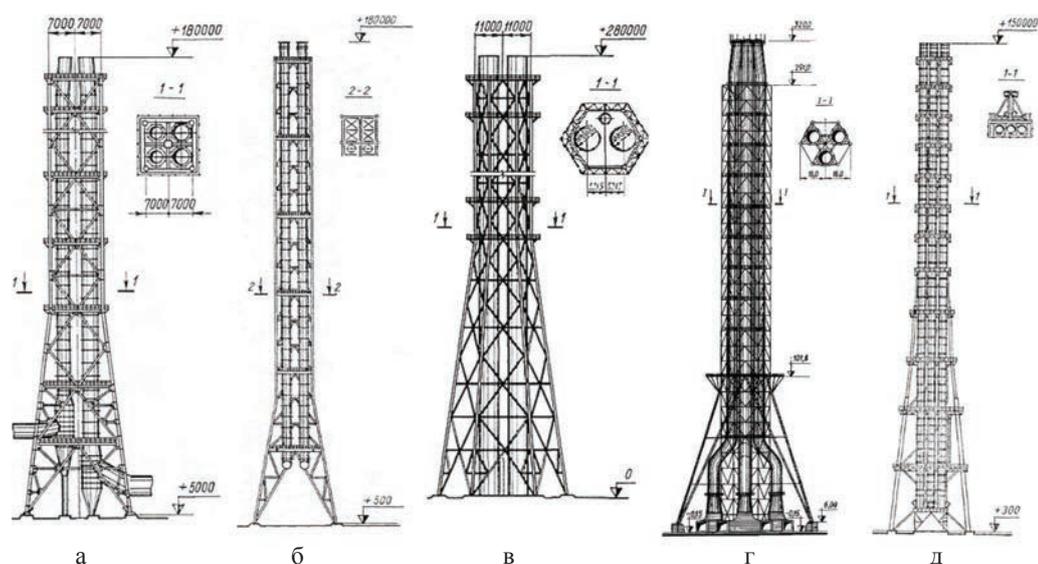


Рисунок 1 – Типы башен: а – четырехгранная с вспомогательными конструкциями для несущего каркаса; б – четырехгранная с одностипными элементами; в – шестигранная с переломом граней по высоте; г – шестигранная свободностоящая с одностипными элементами; д – четырехгранная с укрупнёнными панелями

Рассматривая конструктивные формы вытяжных башен, можно остановиться на одном из решений – вытяжной башне высотой 180 м. Эта башня предназначена для тепловой электростанции, которая обслуживает лесопромышленный комплекс в г. Сыктывкар (рисунок 1, а). Многоствольная вытяжная башня представляет собой сооружение, где хорошо сочетаются основные и вспомогательные конструкции всего каркаса пространственного каркаса высотного строения. Строение имеет четыре грани, две из которых представляют плоские фермы, две другие – диафрагмы соединяющие фермы, а также оно имеет четыре стальные трубы диаметром 4–5 м, по которым отводятся в атмосферу газообразные вещества (вредные выбросы) и рассеиваются в пространстве.

Схема строения имеет следующие особенности. Шахта лифта и лифтового оборудования находятся в центральной части строения. При этом ко всему пространственному каркасу примыкают элементы диафрагм, необходимые для создания пространственной жесткости вытяжной башни. При таком решении удачно примыкают обслуживающие и переходные площадки, расположенные по высоте строения. Недосток такого решения – несколько увеличенные размеры в плане башни в ее нижней части. Однако с другой стороны, при внут-

реннем расположении стальных труб это решение более экономичное по расходу стали.

Вытяжная трубчатая башня (рисунок 1, б). Здесь башня имеет другое конструктивное решение при сходной компоновке в плане и по ее высоте. Высота башни составляет 180 м, она запроектирована для химкомбината и имеет два стальных ствола диаметром 3 м, которые проходят вдоль пространственной конструкции. Четырехгранная башня выполнена с наклонными элементами, позволяющими удобно закрепить переходную площадку и конструкции обслуживающего оборудования. Сечения основных элементов башни трубчатые, монтажные соединения преимущественно сварные. Положительные качества – практически все несущие элементы одинаковы, узловые сопряжения одностипны, простота конструкции. В некоторых случаях решение высотного сооружения с подкосами снижает массу башни и соответственно, они экономичнее по расходу металла. Этот факт необходимо учитывать при строительстве башен в сложных условиях.

Конструктивные формы вытяжной башни с двумя газоотводящими стволами (рисунок 1, в) практически не отличаются от башен, имеющих один газоотводящий ствол. Наибольшее распространение получили невысокие четырехгранные

башни. По высоте башня может иметь один или несколько переломов по ее высоте. Особенно это важно для многогранной башни.

На рисунке 1, в показана вытяжная пространственная башня высотой 280 м, которая имеет шесть граней. Диаметр окружности основания равен 50 м, а верхней решетчатой конструкции – 22 м. Стальные стволы диаметром 8 м каждый. Все элементы строения выполнены из стальных труб, а монтаж выполнен с помощью высокопрочных болтов. Недостатком такого решения является трудоемкость в изготовлении и сложность в монтаже из-за большого количества элементов и расположения поясов нижней части под определенным уклоном. При большой высоте такое решение принимать нецелесообразно.

Конструктивное решение каркаса башни для поддержания газоотводящих труб Углегорской ГРЭС представлено на рисунке 1, г. Опора представляет собой свободно стоящую решетчатую башню высотой 291 м, к которой на отметке 281 м прикреплены три стальных трубы диаметром 7,8 м и высотой 320 м каждая. Все элементы высотного строения выполнены из трубчатых профилей. Основными несущими элементами башни являются пояса. Для всех участков поясов используется один диаметр труб с варьированием в зависимости от величины расчетных усилий, это упрощает осуществление как заводских, так и монтажных стыков. Все элементы выполнены из высокопрочной стали.

Вытяжная башня высотой 150 м запроектирована для Подмосковского горно-химического комбината, в которой газоотводящие стволы расположены с внешней стороны несущей башни (рисунок 1, д). Такая компоновочная схема имеет определенные достоинства при создании многоствольных вытяжных башен. Несущая башня включает крупногабаритные панели и раскосную решетку. При этом решетка принята несимметричной с перегибами. Переходные площадки имеют скользящие опоры, что позволяет перемещаться стволу при переменном температурном режиме окружающей среды. При этом обеспечивается передача на башню ветровых нагрузок. Необычная конструкция основных несущих элементов стальных консольных площадок позволяет выполнять ремонт стальных стволов или устанавливать новые стволы и оборудование, что является достоинством данного типа сооружения.

Это особенно важно, поскольку необходим постоянный осмотр строения и выполнение ремонтных работ, а мониторинг таких сооружений является одним из важных вопросов для продления срока жизни всех элементов пространственной стальной конструкции.

Таким образом, анализ конструктивных решений башенных сооружений позволил принять конструкцию стальной шестигранной решетчатой башни высотой 200 м по типу представленной на рисунке 1, г, которая обладает рядом достоинств. Точки опирания ног в плане на фундаменты расположены по окружности диаметром 100 м. Район строительства – г. Кострома.

**Расчет башни и анализ влияния типа профилей на ее несущую способность.** Рассмотрим варианты выполнения элементов башни из различных профилей: круглой трубы, двутавра, одиночного уголка, швеллера. Проведем анализ влияния типа профилей на несущую способность башни: перемещения, напряжения, усилия в стержнях и т. п. при следующих исходных данных: высота металлической башни  $H_1 = 200$  м; высота дымовых труб  $H_2 = 210$  м, подвешенных на отметке 180 м; количество газоотводящих стволов  $n = 3$  шт.; диаметр газоотводящих стволов  $d = 7,8$  м; толщина стенки ствола  $t_{cm} = 6$  мм; размеры шестигранной башни в осях  $a \times b = 32 \times 28$  м (рисунок 1, г); расчетная длина сжатых элементов поясов призматической части башни –  $L = 10000$  мм.

При анализе эффективности применения профилей в башенных конструкциях приняли четыре разных варианта выполнения элементов башни из различных профилей [7]. Расчет выполнен в программном комплексе ЛИРА-САПР [8, 9]. Расчет в ПК ЛИРА-САПР основан на МКЭ (метод конечных элементов). Решение строится методом перемещений. Эта форма обладает простотой решения и представлением результатов расчета. За основу принимается принцип возможных перемещений:

$$a(u, v) = (f, v),$$

где  $u$  – искомое точное решение решаемой задачи;  $v$  – перемещение исследуемого стержня;  $a(u, v)$ ,  $(f, v)$  – работа внутренних и внешних сил в рассматриваемом элементе.

Расчетная часть конструкции была разбита на конечные элементы  $\Omega_i$ . При этом обозначались узлы и назначались их степени свободы  $L_i$  (перемещения узлов и углы их поворота во всем пространстве рассматриваемой конструкции).

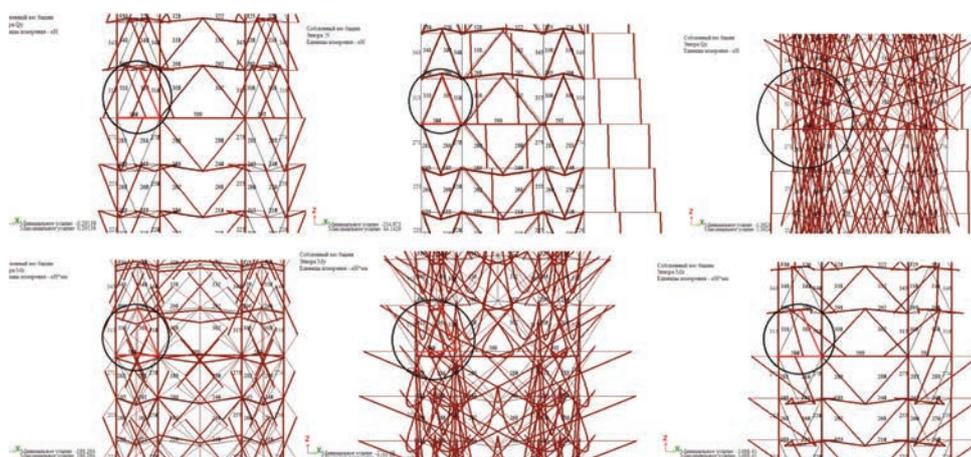


Рисунок 2 – Фрагмент эпюр усилий для трубчатого сечения на отметке 100 м

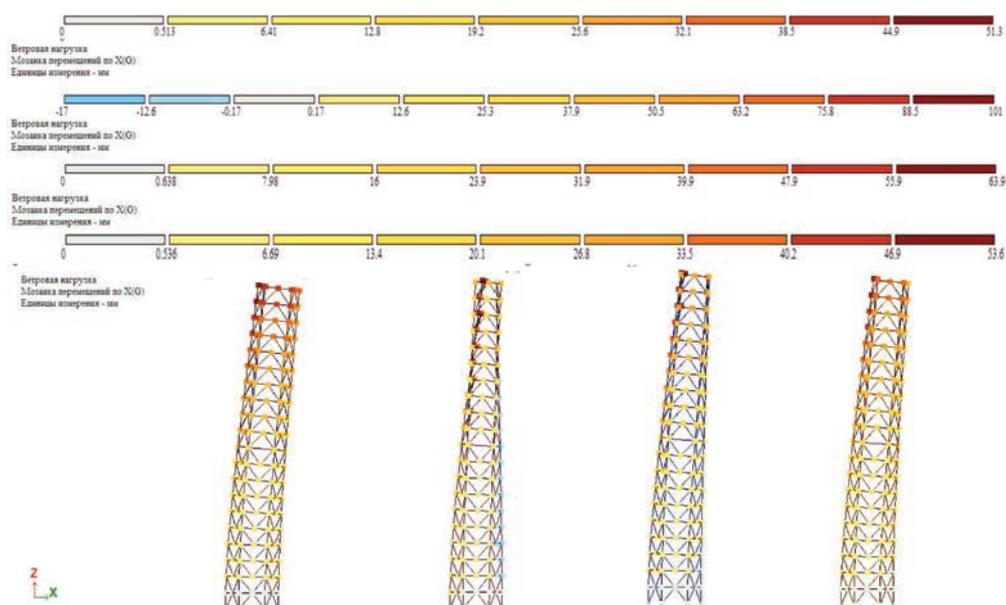


Рисунок 3 – Изополя перемещений от ветровой нагрузки соответственно для трубы, двутавра, уголка, швеллера

Степени свободы должны соответствовать базисной функции  $\mu_i$  удовлетворяющей следующей системе:

$$L_i \mu_i = \begin{cases} 1, i = j \\ 0, i \neq j \end{cases}$$

Решение  $U_h$  находилось в виде линейной комбинации базисных функций:

$$U_h = \sum_{i=1}^N u_i \mu_i,$$

удовлетворяющей главным (кинетическим) условиям, где  $u_i$  – число;  $N$  – количество степеней свободы.

На рисунке 2 представлены эпюры усилий в башне для трубчатого сечения, а на рисунке 3 – изополя перемещений элементов башни.

Анализ показал, что по перемещениям от ветровой нагрузки (рисунок 3) и усилиям в раскосах  $N$  и  $Q_z$  на отметке 100 м наиболее оптимальным является трубчатое поперечное сечение (рисунок 4):

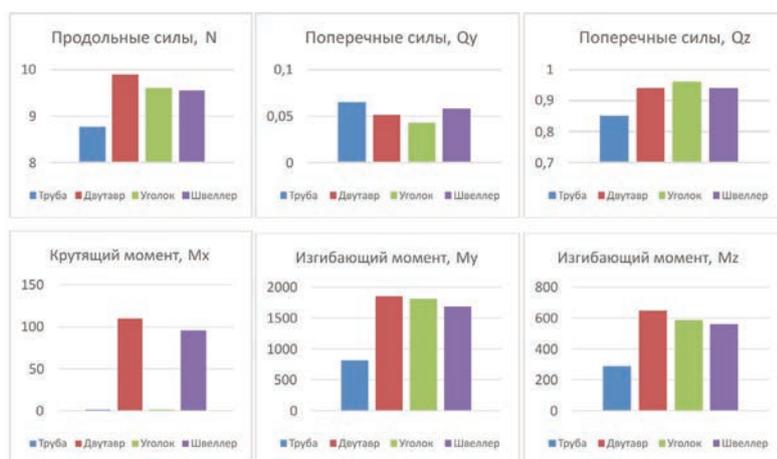


Рисунок 4 – Усилия в раскосах (по профилям) на отметке 100 м

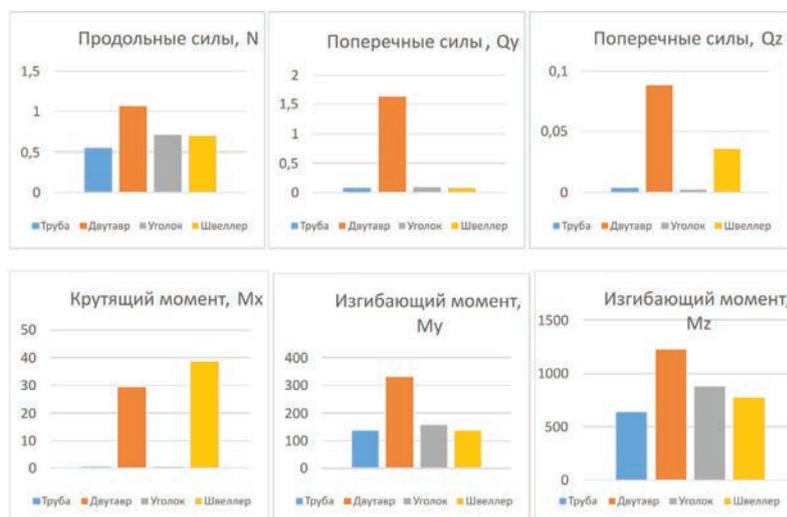


Рисунок 5 – Усилия в поясах (по профилям) на отметке 100 м

- 1) при сравнении данных трубчатого и швеллерного профилей процент расхождения по усилиям  $N$  составляет 8 %; по поперечным силам  $Q_z$  – 9 %; при этом усилия  $Q_y$  в уголконом профиле меньше на 22 %, то есть он заметно выгоднее трубчатого сечения;
- 2) при сравнении результатов расчета по крутящим моментам круглый профиль занимает лидирующую позицию. При этом процент расхождения по крутящим моментам  $M_x$  между уголковым и трубчатым профилями составляет не более 0,4 %; по изгибающим моментам  $M_y$  между трубчатым сечением и швеллерным расхождение составляет 43,5 %; а по изгибающим моментам  $M_z$  – 43,3 %. Анализ показал, что по уси-

лиям в раскосах  $N$  наиболее оптимальным является трубчатое сечение.

В поясах значения усилия  $Q_y$  в профилях из уголка, трубы и швеллера имеют практически одинаковые значения с разницей между ними в 3 % (рисунок 5). Также в поперечных силах  $Q_z$  и крутящем моменте  $M_x$  профили из трубы и уголка имеют минимальный процент расхождения и их усилия сведены к нулю. В изгибающем моменте  $M_y$  профили из круга и швеллера занимают лидирующую позицию, процент расхождения 0,4 %; в изгибающем моменте  $M_z$  трубчатое сечение является наиболее выгодным. Анализ данных гистограммы показал, что по усилиям  $N$  в поясах (рисунок 5) наиболее оптимальным является трубчатое сечение.

**Выводы.** Анализ конструктивных решений стальных башен позволил установить следующее:

- наиболее целесообразным является конструктивное решение стальной вытяжной башни для проектируемой тепловой электростанции;
- сравнительный расчет в ПК “ЛИРА-САПР” и анализ полученных данных показал влияние типа профилей на несущую способность башни;
- наиболее оптимальным профилем для стержней решетки высотного сооружения проектируемого уникального высотного сооружения является трубчатый профиль.

Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании стальных вытяжных башен с газоотводящими трубами на объектах энергетики.

#### **Литература**

1. Павловский В.Ф. Стальные башни (проектирование и монтаж) // В.Ф. Павловский, М.П. Кондра. Киев: Будівельник, 1979. 200 с.
2. Солодарь М.Б. Металлические конструкции вытяжных башен / М.Б. Солодарь, М.В. Кузнецова, Ю.С. Плишкин. Л.: Стройиздат, 1975. 186 с.
3. Васильев А.А. Металлические конструкции / А.А. Васильев. М.: Стройиздат, 1975. 227 с.
4. База патентов. URL: <https://findpatent.ru/> (дата обращения: 12.10.2019).
5. Жербин М.М. Высокопрочные строительные стали (характеристики, область применения, расчет и проектирование) / М.М. Жербин. Киев: Будівельник, 1974. 160 с.
6. СП 43.13330.2012. Сооружения промышленных предприятий. Актуализированная редакция СНиП 2.09.03-85\*. URL: [http://www.adm44.ru/i/u/43.13330.2012\\_2.09.03-85\\_1.pdf](http://www.adm44.ru/i/u/43.13330.2012_2.09.03-85_1.pdf) / (дата обращения: 12.10.2019).
7. Компания “Стройсталь”. URL: <https://www.stroymetall.ru/metal-roll/> (дата обращения: 20.10.2019).
8. Шакирзянов Р.А. Динамический расчет моста МКЭ / Р.А. Шакирзянов. Казань: КГАСУ, 2009. 24 с.
9. Городецкий Д.А. Программный комплекс ® ЛИРА-САПР 2013 / Д.А. Городецкий, М.С. Барабаш, Р.Ю. Водопьянов, В.П. Титок, А.Е. Артамонова. URL: <http://www.tnu.in.ua/study/refs/d188/file1427301.html> / (дата обращения: 29.10.2019).