

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 697.8

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-1-3-13

## ВЫБОР КОНФИГУРАЦИИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ МНОГООТВОЛЬНОЙ ДЫМОВОЙ ТРУБЫ С ЧЕТЫРЬМЯ СТВОЛАМИ РАЗЛИЧНОГО ДИАМЕТРА

Грибков А.М., Мирсалихов К.М., Чичирова Н.Д.

Казанский государственный энергетический университет,  
г. Казань, Россия

*gribkovalmi@mail.ru, mirsalihovkm@gmail.com, ndchichirova@mail.ru*

**Резюме:** Несмотря на широкое распространение одностовольных дымовых труб, благодаря возможности увеличения подъема дымовых газов в атмосфере за счет близкого расположения отдельных стволов в общей оболочке и обеспечения высокой надежности этой оболочки за счет изоляции ее от дымовых газов, все более широкое применение находят многоствольные дымовые трубы. Для минимизации их стоимости необходимо определить такую компоновку стволов, при которой диаметр оболочки дымовой трубы будет минимальным. **ЦЕЛЬ.** Рассмотреть основные типы многоствольных дымовых труб, применяемых в мировой практике. Получить аналитическое решение для определения минимально возможного диаметра железобетонной оболочки четырехствольной дымовой трубы со стволами произвольного диаметра. **МЕТОДЫ.** Графические и аналитические методы с использованием компьютерного моделирования, а также применение средств систем автоматизированного проектирования. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Получено аналитическое решение для определения минимально возможного диаметра железобетонной оболочки четырехствольной дымовой трубы со стволами различного диаметра при заданных расстояниях между стволами и между стволами и защитной оболочкой как решение системы алгебраических и тригонометрических уравнений. Расстояния между стволами и между стволами и защитной оболочкой могут быть заданы любые. В данной работе, разработана новая методика и программа расчета для четырехствольных дымовых труб. Показано, что диаметр оболочки зависит от порядка размещения стволов различных диаметров. Стволы с наибольшими диаметрами, при отсутствии ограничений в пространстве шахт, следует размещать друг против друга. Полученная методика определения диаметра оболочки за счет более точного проектирования и при выполнении всех заданных условий позволяет уменьшить стоимость оболочки на 4 - 9 % по сравнению с действующей методикой определения диаметра оболочки.

**Ключевые слова:** многоствольные дымовые трубы; стволы с разными диаметрами; минимальный диаметр оболочки; зазоры между стволами; компоновка стволов.

**Для цитирования:** Грибков А.М., Мирсалихов К.М., Чичирова Н.Д. Выбор конфигурации поперечного сечения многоствольной дымовой трубы с четырьмя стволами различного диаметра // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 1. С. 3-13. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-3-13.

## SELECTION OF THE CONFIGURATION OF THE CROSS-SECTION OF A MULTI- FLUE STACKS WITH FOUR INNER FLUES OF DIFFERENT DIAMETERS

AM. Gribkov, KM. Mirsalikhov, ND. Chichirova

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

*gribkovalmi@mail.ru, mirsalihovkm@gmail.com, ndchichirova@mail.ru*

**Abstract:** Despite the widespread use of single-flue stacks, due to the possibility of increasing the rise of flue gases into the atmosphere due to the close location of individual flues in a common shell and ensuring the high reliability of this shell by isolating it from flue gases, multi-flue stacks are increasingly being used. To minimize their cost, it is necessary to determine such an arrangement of flues, in which the diameter of the stack shell will be minimal. **THE PURPOSE.** Consider the main types of multi-flue stacks used in world practice. Obtain an analytical solution for determining the minimum possible diameter of the reinforced concrete shell of a four-flue stack with flues of different diameter. **METHODS.** Graphical and analytical methods using computer modeling, as well as the use of computer-aided design systems. **RESULTS.** An analytical solution is obtained to determine the minimum possible diameter of the reinforced concrete shell of a four-flue stack with stems of different diameters at given distances between the flues and between the flues and the containment shell as a solution to a system of algebraic and trigonometric equations. The distances between the flues and between the flues and the containment can be set to any. In this paper, a new methodology and calculation program for four-flue stacks has been developed. It is shown that the shell diameter depends on the arrangement of flues of different diameters. In the absence of space restrictions for flues, flues with the largest diameters should be placed opposite each other. The obtained method for determining the shell diameter due to more accurate design and when all specified conditions are met, allows to reduce the cost of the shell by 4–9 % compared to the current method for determining the shell diameter.

**Keywords:** multi-flue stack; inner flues with different diameters; minimum flue gas stack diameter; clearances between flues; inner flue layout.

**For citation:** Gribkov AM, Mirsalikhov KM, Chichirova ND. Selection of the configuration of the cross-section of a multi-flue stacks with four inner flues of different diameters. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(1):3-13. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-3-13.

### **Введение (Introduction)**

Несмотря на то, что одноствольные дымовые трубы могут применяться на ТЭС для подключения мощности  $N = 2000$  МВт и более (на Запорожской ГРЭС на одноствольную дымовую трубу высотой 320 м с проходным зазором между стволом и оболочкой подключены три блока по 800 МВт), современные тенденции предполагают использование на новых ТЭС многоствольных дымовых труб [1].

Многоствольные дымовые трубы позволяют увеличить тепловую мощность выброса, что приводит к увеличению подъема дымовых газов в атмосфере, и обеспечивают максимальную надежность благодаря возможности ремонта отдельного ствола при работе остальных. Полная изоляция железобетонной оболочки от воздействия агрессивных дымовых газов и ее защита от атмосферных воздействий обеспечивает практически неограниченный срок ее службы.

Такие дымовые трубы имеют, как правило, от трех до шести стволов. Типичная конструкция трехствольной дымовой трубы высотой 180 м показана в [2]. В [3] описана шестиствольная дымовая труба высотой 250 м с одинаковыми круглыми стволами тепловой электростанции в Ополе (Польша). Каждый ствол имеет наружный диаметр 6,4 м, покрыт оцинкованным листом толщиной 1 см., затем слой минеральной ваты 5 см., затем опять оцинкованный лист толщиной 1 см, затем слой 4 см шлаковаты, затем радиальный кирпич 15 см, затем воздушная прослойка 68 см, затем еще один оцинкованный лист толщиной 1 см. Таким образом, внутренний диаметр составляет всего 4,5 м. Стволы защищены от атмосферных воздействий цилиндрической железобетонной оболочкой. Дымовая трубы аналогичной конструкции, но высотой 300 м в Белхатове (Польша) приведена в [4].

### **Литературный обзор (Literature Review)**

Разработано достаточно много различных конструкций многоствольных дымовых труб [5], но в основном это трубы с одинаковыми диаметрами стволов. Однако в ряде случаев возможно применение стволов с разными диаметрами. Такая потребность возникает, когда на стволы подключаются котлы различной мощности, имеющие различный расход и температуру дымовых газов, например, при подключении на отдельный ствол пиковых водогрейных котлов ТЭС. В [6] рассмотрена четырехствольная дымовая труба с одним стволом меньшего диаметра.

В [7] рассмотрена пятиствольная дымовая труба со стволами четырех различных диаметров. В [8] показана трехствольная труба с одним стволом меньшего диаметра. В [9]

рассмотрены различные формы железобетонных оболочек для многоствольных труб с одинаковыми стволами. Приведены описания и виды дымовых труб с компактной оболочкой в Гдыне и в Любляне.

Самым распространенным типом оболочки является оболочка с круглым поперечным сечением. Такое сечение обладает минимальным периметром при заданной поперечной площади, максимальной жесткостью и минимальным аэродинамическим сопротивлением при ветровых нагрузках.

Более подробно основные типы конструкций и методики выбора оптимальных параметров дымовых труб за рубежом представлены в [10].

Дымовые трубы ТЭС являются самым дорогостоящим видом вспомогательного оборудования на ТЭС, соизмеримого по стоимости с основным. В некоторых случаях стоимость дымовых труб может превышать 500 млн. руб. Поэтому важно правильно выбрать основные размеры дымовых труб.

Одним из самых дорогостоящих элементов дымовых труб является несущая железобетонная оболочка. Стволы, находящиеся внутри нее, располагаются с некоторыми зазорами между собой и между оболочкой. Для наиболее распространенного типа многоствольных дымовых труб в России применяются теплоизолированные стальные круглые стволы с зазорами между металлом стволов  $Ra_1 = 1,2$  м и между стволами и железобетонной оболочкой  $Ra_2 = 1,0$  м. При этом в обоих случаях при толщине теплоизоляции в 200 мм обеспечивается проходной зазор в 800 мм.

Основной проблемой при разработке методики технико-экономического анализа многоствольных дымовых труб с разными диаметрами стволов является определение минимально-возможного диаметра несущей железобетонной оболочки с учетом заданных условий по расстояниям  $Ra_1$  и  $Ra_2$ . До настоящего времени диаметр оболочки принимался как для всех стволов одинакового максимального размера. Это приводит к неоправданному перерасходу средств и не позволяет найти оптимальное решение для вариантов с разными расходами и температурами газов в различных стволах.

#### **Материалы и методы (Materials and methods)**

При выборе варианта выполнения дымовой трубы нужно учитывать эксплуатационные издержки и стоимость дымовой трубы. Если речь идет об одной и той же трубе при различных вариантах выходной скорости газов, то затраты на амортизацию можно не учитывать, так как они во всех вариантах будут примерно одинаковыми.

Чтобы правильно рассчитать эксплуатационные издержки, нужно знать потери напора в каждом из стволов, а для этого нужно знать аэродинамику потока, так как влияние конструкции ввода газохода в ствол на структуру потока дымовых газов для стволов различного диаметра будет разным. Исследования структуры потока в районе ввода газоходов проведены в [11], где показано, что в этих областях имеет место образование вихрей, в которых идет преобразование энергии движения газов в тепловую энергию, что приводит к необходимости увеличения затрат на транспорт дымовых газов.

Для правильного определения этих затрат, нужно методически правильно организовать замеры средней скорости по сечению в стволе дымовой трубы [12]. Таким образом, если задачу по исследованию аэродинамики потока дымовых газов в стволах дымовой трубы можно считать в основном решенной, то несколько сложнее обстоит дело с определением стоимости дымовой трубы.

Стоимость многоствольной дымовой трубы вычисляется по выражению:

$$K_{\text{тр}} = K_{\text{ф}} + K_{\text{об}} + K_{\text{с}},$$

где:

$K_{\text{ф}}$  – стоимость фундамента, руб.;

$K_{\text{об}}$  – стоимость оболочки, руб.;

$K_{\text{с}}$  – стоимость стволов, руб.

Основной вклад в стоимость трубы вносит стоимость оболочки. Поэтому важным является правильно эту стоимость определить.

Стоимость оболочки рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{об}} = V_{\text{ж/об}} \cdot \Pi_{\text{ж/б}},$$

где:

$\Pi_{\text{ж/б}}$  – стоимость материала железобетонного ствола, руб./м<sup>3</sup>;

$V_{\text{ж/об}}$  – объем железобетона в оболочке, м<sup>3</sup>.

Объем железобетонной оболочки вычисляется по формуле [14]

$$V_{ж/б} = 0,15H^{1,55}D_0^{0,65}\left(\frac{q_i}{q_1}\right)^{0,3},$$

где:

$H$  – высота дымовой трубы, м;

$D_0$  – внутренний диаметр оболочки многоствольной дымовой трубы в верхней ее части, м;

$q_i$  – скоростной напор для ветрового района расположения трубы;

$q_1$  – нормативный скоростной напор для первого ветрового района.

Задача для четырехствольной трубы со стволами различных диаметров до настоящего времени решена не была. В данной работе такое решение предлагается.

Вообще говоря, определить минимально возможный диаметр оболочки для четырех стволов различного диаметра возможно, например, средствами системы автоматизированного проектирования (САПР) «Компас». Для этого нужно: сначала в первом приближении откладываются диаметры стволов, затем из центра любого из диаметров откладывается окружность, которая будет определять расстояние между стволами. Согласно нашим условиям, это расстояние принято 1,2 метра. Затем центр диаметра следующего ствола переносится на отложенную окружность, аналогично откладываются следующие стволы. Центром последнего ствола будет, является точка пересечения из центра окружности противоположного ствола и окружности, определяющей расстояние между соседним стволом. Затем из центра полученных диаметров откладываются окружности, которые будут определять расстояние между стволами и оболочкой, по нашим условиям это расстояние принято 1 метр. После этого по трем полученным окружностям, касательно, строится окружность, которая и является диаметром оболочки. Затем методом последовательных приближений начинаем изменять угол между тремя стволами, таким образом, чтобы сократить расстояние между последним стволом (касательно которого не строилась окружность диаметра оболочки) и оболочкой. Приближение выполняем до тех пор, пока это расстояние не станет равным 1 метр. Однако этот процесс достаточно трудоемок и для многовариантных расчетов, особенно как встроенная часть более общих программ, он не подходит, хотя в качестве проверочного при разработке аналитической методики расчета нами использовался.

Предлагаемая методика лишена этих недостатков, а результаты расчетов по ней полностью совпадают с расчетами по САПР «Компас».

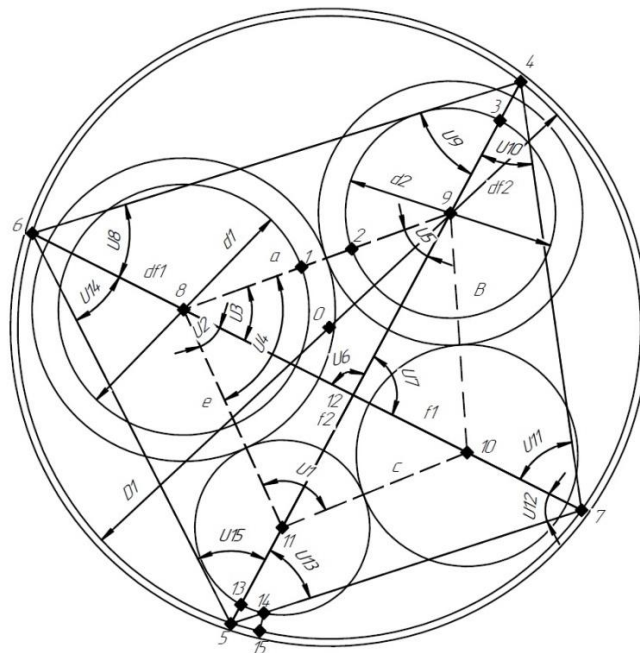


Рис. 1. Поперечное сечение четырехствольной дымовой трубы Fig. 1. Cross section of four-barrel stack

Рассмотрим рисунок 1, на котором изображены диаметры четырех стволов в порядке убывания по часовой стрелке  $d_1$ ,  $d_2$ , а также охватывающие окружности стволов  $d_3$  и  $d_4$  (сами стволы не показаны). Расстояние между точками 1 и 2 составляет  $Ra_1 = 1,2$  м, а

расстояние между точками 3 и 4 (линия 3-4) -  $Ra_2 = 1,0$  м. Охватывающими будем называть диаметры окружностей, позволяющие обеспечить зазор между стволами  $Ra_1 = 1,2$  м.

Проведем через центры противоположных стволов прямые 4-5 и 6-7. Обозначим линию 4-5 как  $df_1$ , а линию 6-7 как  $df_2$ . Центры стволов обозначим точками 8, 9, 10 и 11. Соединим их линиями 8-9, 9-10, 10-11 и 8-11. Исходя из заданных условий, отрезки линий 6-8, 4-9, 7-10 и 5-11 нам известны. Неизвестными являются отрезки 8-10 и 9-11. Отрезок линии 8-10 обозначим как  $f_1$ , а отрезок 9-11 как  $f_2$ . Линию 8-9 обозначим как «а», линию 9-10 как «в», линию 10-11 как «с», линию 8-11 как «е».

Четыре ствола различного диаметра должны быть размещены таким образом, чтобы вокруг них могла быть описана окружность. Такую окружность можно описать, если сумма противоположных углов вписанного четырехугольника составит ровно по 180 градусов. Таким четырехугольником в данном случае является четырехугольник 4-6-5-7.

Все линии при дальнейшем описании обозначаем буквой «L» по ограничивающим их точкам. Например, сторона 4-6 четырехугольника 4-6-5-7 обозначается как  $L(4-6)$  и т.д.

Все углы на рис. 1. обозначены как «U» с соответствующим номером:  $U_1$  – между линиями  $L(8-11)$  и  $L(10-11)$ ;  $U_2$  – между линиями  $L(8-11)$  и  $L(8-12)$ ;  $U_3$  – между линиями  $L(8-9)$  и  $L(8-12)$ ;  $U_4$  – между линиями  $L(8-9)$  и  $L(8-11)$ ;  $U_5$  – между линиями  $L(8-9)$  и  $L(9-12)$ ;  $U_6$  – между линиями  $L(8-12)$  и  $L(9-12)$ ;  $U_7$  – между линиями  $L(9-12)$  и  $L(10-12)$ ;  $U_8$  – между линиями  $L(4-6)$  и  $L(6-8)$ ;  $U_9$  – между линиями  $L(4-6)$  и  $L(4-9)$ ;  $U_{10}$  – между линиями  $L(4-7)$  и  $L(4-9)$ ;  $U_{11}$  – между линиями  $L(4-7)$  и  $L(7-10)$ ;  $U_{12}$  – между линиями  $L(5-7)$  и  $L(7-10)$ ;  $U_{13}$  – между линиями  $L(5-7)$  и  $L(5-11)$ ;  $U_{14}$  – между линиями  $L(5-6)$  и  $L(6-8)$ ;  $U_{15}$  – между линиями  $L(5-6)$  и  $L(5-11)$ .

#### Результаты (Results)

Учитывая, что для вписанного четырехугольника суммы противоположных углов должны быть равны друг другу и равняться по 180 градусов, можно записать первый этап задачи, то есть расположить стволы нужно расположить таким образом, чтобы выполнялось условие

$$U_8 + U_{14} + U_{11} + U_{12} = U_9 + U_{10} + U_{13} + U_{15} = 180. \quad (1)$$

Исходя из схемы рисунка 1, запишем:

$$a = (d_1 + d_2) / 2 + Ra_1 ;$$

$$b = (d_2 + d_3) / 2 + Ra_1 ;$$

$$c = (d_3 + d_4) / 2 + Ra_1 ;$$

$$e = (d_1 + d_4) / 2 + Ra_1 ,$$

при этом:

$$L(6-8) = d_1 / 2 + Ra_2 ;$$

$$L(4-9) = d_2 / 2 + Ra_2 ;$$

$$L(7-10) = d_3 / 2 + Ra_2 ;$$

$$L(5-11) = d_4 / 2 + Ra_2 .$$

Для уменьшения загроможденности рисунка стволы 3 и 4 и их диаметры  $d_3$  и  $d_4$  на рисунке не обозначены. Чтобы найти углы, входящие в уравнение (1), нужно решить систему геометрических и алгебраических уравнений, результат расчетов по которым будет зависеть от величины угла  $U_1$ .

Далее записываем решения для косоугольного треугольника 11-8-10:

$$U_1 = 2 \text{ArcTg} \sqrt{\frac{(p-e)(p-f_1)}{p(p-c)}} ;$$

$$f_1 = \sqrt{e^2 + c^2 - 2ec \cdot \cos U_1} ;$$

$$L(6-7) = df_1 = f_1 + L(6-8) + L(7-10),$$

где  $p$  – полупериметр этого треугольника, который определяется как:

$$p = (c + e + f_1) / 2 .$$

Затем рассматриваем косоугольный треугольник 8-9-10, в котором:

$$U_3 = 2 \operatorname{ArcTg} \sqrt{\frac{(p-a)(p-f_1)}{p(p-b)}} ,$$

где:

$$p = (a + b + f_1) / 2 ;$$

$$U_4 = U_2 + U_3 .$$

Далее аналогично решаем косоугольный треугольник 8-9-11:

$$L(9-11) = f_2 = \sqrt{e^2 + a^2 - 2ea \cdot \cos U_4} ;$$

$$U_5 = 2 \operatorname{ArcTg} \sqrt{\frac{(p-a)(p-f_2)}{p(p-e)}} ,$$

где:

$$p = (a + e + f_2) / 2 .$$

Теперь можно записать длину диагонали:

$$L(4-5) = df_2 = f_2 + L(5-11) + L(4-9),$$

при этом:

$$U_6 = 180 - U_5 - U_3 .$$

Из треугольника 8-9-12 найдем:

$$L(9-12) = a \frac{\sin(U_3)}{\sin(U_6)} ,$$

а затем найдем:

$$L(4-12) = L(9-12) + L(4-9),$$

и:

$$U_7 = 180 - U_6 .$$

Продолжая аналогичные вычисления, найдем:

$$L(4-7) = \sqrt{L(4-12)^2 + L(7-12)^2 - 2L(4-12) \cdot L(7-12) \cdot \cos U_7} ;$$

$$L(4-6) = \sqrt{L(4-12)^2 + L(6-12)^2 - 2L(4-12) \cdot L(6-12) \cdot \cos U_6};$$

$$L(5-7) = \sqrt{L(7-12)^2 + L(5-12)^2 - 2L(7-12) \cdot L(5-12) \cdot \cos U_6};$$

$$L(5-6) = \sqrt{L(6-12)^2 + L(5-12)^2 - 2L(6-12) \cdot L(5-12) \cdot \cos U_7}.$$

В полном варианте в результате получается система из тридцати одного уравнения с тридцатью одной неизвестной величиной. Система решается последовательной подстановкой неизвестных величин. Задаваясь углом  $U_1$ , получаем промежуточные результаты для всех неизвестных величин и проверяем решение уравнения (1). В том случае, если уравнение (1) не выполняется, задаемся новым значением угла. За решение принимается результат, при котором сумма углов по уравнению отличается от 180 не более, чем на 0,01 градуса.

Далее, получив условие существования описанной окружности вокруг четырехугольника со сторонами  $L(4-6)$ ,  $L(4-7)$ ,  $L(5-6)$  и  $L(5-7)$ , по формуле Парамешвары [14] найдем ее диаметр.

Для этого обозначим:

$$Z_1 = L(5-6) \cdot L(4-6) + L(4-7) \cdot L(5-7);$$

$$Z_2 = L(4-7) \cdot L(4-6) + L(5-6) \cdot L(5-7);$$

$$Z_3 = L(5-7) \cdot L(4-6) + L(5-6) \cdot L(4-7);$$

$$p_0 = (L(5-7) + L(4-6) + L(5-6) + L(4-7)) / 2;$$

$$Z_4 = (p_0 - L(4-6)) \cdot (p_0 - L(4-7)) \cdot (p_0 - L(5-6)) \cdot (p_0 - L(5-7)),$$

тогда запишем:

$$D_1 = 0,5 \sqrt{\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot Z_3}{Z_4}}.$$

Однако полученный диаметр оболочки не совсем точно обеспечивает заданный зазор между охватывающих стволы диаметров и оболочкой, равный 0,4 м. Это видно из сравнения отрезков (5-13) и (14-15) на рис.1. Полученное сужение зависит от смещения точки пересечения диагоналей  $df_1$  и  $df_2$  (точка 12) относительно центра окружности диаметра  $D$  (точка 0).

Обозначим следующие соотношения:

$$t_1 = L(8-12) / L(12-10);$$

$$t_2 = L(9-12) / L(11-12).$$

Графоаналитический анализ рисунка 1 показал, что для восстановления зазора до заданного, диаметр оболочки необходимо увеличить по уравнению:

$$D = D_1 + 0,8 (t^{0,8} - 1),$$

где:

$$t = (t_1 + t_2) / 2.$$

### Обсуждение (Discussions)

До настоящего времени при сооружении четырехствольной трубы с четвертым стволом меньшего диаметра, например в случае подключения, на него водогрейных котлов, диаметр оболочки выбирался как для всех стволов с максимальным диаметром. При этом вокруг ствола меньшего диаметра появлялось больше свободного пространства. Такое решение кажется не совсем оправданным с экономической точки зрения, а разработанный механизм позволяет учесть перерасход средств количественно. Для обеспечения одинаково свободного пространства вокруг всех стволов, несущую оболочку дымовой трубы можно сделать меньшего диаметра.

Заданное ограничение между стволами получается из условия толщины теплоизоляции ствола  $\Delta s = 200$  мм и расстояния в свету  $\Delta l = 800$  мм. Две толщины теплоизоляции соседних стволов и зазор между ними и дает нам принятое значение  $Ra_1 = 1,2$  м. Отсутствие теплоизоляции на несущей оболочке дымовой трубы позволяет принять  $Ra_2 = 1,0$  м.

Для четырехствольной трубы с одинаковыми стволами диаметром  $d_{1-4} = 5$  м, при заданных ограничениях расстояний потребуются оболочка диаметром  $D = 15768$  мм. При этом между стволами в центре оболочки получается свободное пространство  $3368 \times 3368$  мм. В этом пространстве может быть размещена шахта лифта.

Свободное пространство между стволами может быть найдено по уравнениям:

$$g_1 = f_1 - (d_1 + d_3) / 2;$$

$$g_2 = f_2 - (d_2 + d_4) / 2,$$

где  $g_1$  и  $g_2$  – величина проходного зазора между теплоизоляциями противоположных стволов;  $g_1$  – между стволами 1 и 3, а  $g_2$  – между стволами 2 и 4. Эти расстояния должны быть больше или равны расстояния в свету  $\Delta l = 800$  мм.

Если четвертый ствол имеет диаметр  $d_4 = 4$  м, то оболочку можно выполнить диаметром  $D = 15231$  мм. Учитывая, что стоимость оболочки зависит от ее диаметра в степени 0,65, получаем уменьшение стоимости оболочки на 2,32 %. Имея ввиду, что стоимость оболочки многоствольной дымовой трубы высотой порядка 200 м составляет примерно 50 млн. руб., получаем снижение стоимости оболочки более чем на миллион рублей только за счет более точного проектирования. Свободное пространство между стволами в центре оболочки в этом случае составляет  $2730 \times 3776$  мм.

Если четвертый ствол имеет диаметр  $d_4 = 3$  м, то оболочку можно выполнить диаметром  $D = 14723$  мм. В этом случае получаем уменьшение стоимости оболочки уже на 4,36 %, а свободное пространство между стволами в центре оболочки в этом случае составляет  $2022 \times 4208$  мм.

Еще больший эффект получается, если четвертый ствол имеет диаметр  $d_4 = 2$  м, В этом случае оболочку можно выполнить диаметром  $D = 14240$  мм. Уменьшение стоимости оболочки составит уже 6,41 %, а свободное пространство между стволами в центре оболочки в этом случае составляет  $1241 \times 4661$  мм.

Дальнейшего улучшения эффекта можно достичь, если вместо размещения двух меньших стволов в габариты стволов больших диаметров, определяется минимально возможный диаметр оболочки по настоящей методике и оптимальный для этого случая вариант размещения. Например, для четырех стволов диаметром  $d_{1-4} = 6$  м требуется оболочка диаметром  $D = 18162$  мм, с внутренним пространством между стволами  $3782 \times 3782$  мм. Если требуется размещение двух стволов диаметром  $d_{1-2} = 6$  м, и двух стволов диаметром  $d_{3-4} = 4$  м, то, если расположить большие стволы рядом, получим диаметр оболочки  $D = 16137$  мм, а если расположить большие стволы друг против друга, то диаметр оболочки получается еще меньше,  $D = 15711$  мм, а это уже снижение затрат на 9,15 % по сравнению с оболочкой для габаритов  $d_{1-4} = 6$  м. Свободное пространство между стволами составит  $1310 \times 5311$  мм.

В последнее время разрабатываются новые, более тонкослойные теплоизоляционные покрытия. В связи с этим рассчитаем, как изменится стоимость оболочки, если толщина теплоизоляции стволов уменьшится с 200 до 50 мм. В этом случае  $Ra_1 = 0,9$  м и  $Ra_2 = 0,85$  м.



Вариант четырехствольной трубы с одинаковыми стволами диаметром  $d_{1-4} = 5$  м, нами уже рассмотрен, это оболочка диаметром  $D = 15768$  мм со свободным пространством  $3368 \times 3368$  мм. Если применить тонкослойную теплоизоляцию, то диаметр оболочки можно уменьшить до  $D = 15043$  мм со свободным пространством  $3344 \times 3344$  мм, что уменьшает стоимость оболочки на 3 % (или на 1,5 млн. руб.).

Далее в таблице приведены результаты расчетов для стволов диаметрами 6, 5, 4, 3 м. при различных вариантах их расположения.

**Оптимальные диаметры оболочки многоствольных дымовых труб со стволами 6,5,4,3 м. при различных вариантах их расположения**

Диаметры стволов, м	6 6 6 6	6 6 6 5	6 6 6 4	6 6 6 3	6 5 6 5
Диаметр оболочки, мм	18182	17636	17114	16615	16962
Внутреннее пространство, м	3,78 x 3,78	3,15 x 4,19	2,46 x 4,62	1,70 x 5,06	2,56 x 4,56
Диаметры стволов, м	6 4 6 4	6 5 6 4	6 5 6 3	6 5 5 5	6 5 5 4
Диаметр оболочки, мм	15711	16400	15860	16441	15898
Внутреннее пространство, м	1,31 x 5,31	1,91 x 4,95	1,20 x 5,37	2,98 x 3,94	2,32 x 4,34
Диаметры стволов, м	6 5 5 3	6 4 5 4	6 4 5 3	6 4 4 4	6 4 4 3
Диаметр оболочки, мм	15384	15221	14664	14773	14250
Внутреннее пространство, м	1,63 x 4,75	1,75 x 4,70	1,09 x 5,07	2,22 x 4,01	1,57 x 4,38
Диаметры стволов, м	6 3 4 3	6 3 3 3	5 5 5 5	5 5 5 4	5 5 5 3
Диаметр оболочки, мм	13589	13256	15768	15231	14723
Внутреннее пространство, м	0,98 x 4,71	1,51 x 3,93	3,37 x 3,37	2,73 x 3,78	2,02 x 4,21
Диаметры стволов, м	5 4 5 3	5 3 5 3	5 4 4 4	5 4 4 3	5 3 4 3
Диаметр оболочки, мм	13989	13286	14041	13511	12825
Внутреннее пространство, м	1,49 x 4,54	0,89 x 4,89	2,57 x 3,52	1,92 x 3,91	1,33 x 4,27
Диаметры стволов, м	5 3 3 3	4 4 4 4	4 4 4 3	4 3 4 3	4 3 3 3
Диаметр оболочки, мм	12418	13354	12830	12128	11648
Внутреннее пространство, м	1,82 x 3,56	2,95 x 2,95	2,31 x 3,36	1,73 x 3,73	2,16 x 3,04

Стволы в таблице располагаются, начиная от первого и по часовой стрелке. Расчет сделан для наиболее компактного их расположения, то есть два самых больших ствола расположены напротив друг друга при выполнении условия, что зазоры во внутренней части стволов будут не менее 800 мм.

Однако это условие не выполняется для вариантов стволов 6 3 6 3, 6 4 6 3 и 6 3 5 3, поэтому для этих вариантов следует выбирать расположение 6 6 3 3 (диаметр оболочки 15322 мм, внутреннее пространство 3,02 x 3,02 м), 6 6 4 3 (диаметр оболочки 15704 мм, внутреннее пространство 2,56 x 3,78) и 6 5 3 3 (диаметр оболочки 14575 мм, внутреннее пространство 2,59 x 3,31 м).

#### **Заключение (Conclusions)**

1. Расчеты по разработанной авторами методике позволяют выбрать минимально возможный диаметр наружной оболочки железобетонной дымовой трубы с расположенными внутри нее четырех стволов произвольных диаметров.

2. Приведены рекомендации по порядку взаимного расположения стволов различного диаметра, что в ряде случаев позволяет уменьшить стоимость оболочки на 9 % и более.

3. Данная методика является наиболее общим решением для существующих способов определения диаметра оболочки стволов четырехствольной трубы и позволяет учесть задаваемые технологические ограничения по расстояниям между стволами и оболочкой и пространством для размещения шахт лифта и лестничной клетки.

4. Разработанная методика позволяет автоматизировать многовариантные технико-экономические расчеты по выбору основных размеров четырехствольных дымовых труб как для наиболее общего варианта исходных данных (различные расходы и различные температуры уходящих дымовых газов по стволам), так и для варианта с одинаковыми режимами работы стволов как частного случая данной методики.

### Литература

1. Зройчиков Н.А., Грибков А.М., Сапаров М.И. и др. Анализ преимуществ трехствольных дымовых труб ТЭС // Теплоэнергетика. 2020. №9. С. 27-34.
2. British Electricity International, editor. Station Planning and Design. 3rd ed. Pergamon, 1991, ISBN 978-0-08-040511-7.
3. Prabhaka, N. Kota multiflue chimney (India) // IABSE Structures C-42/87, IABSE Periodica 3/1987, ISSN 0377-7286.
4. Chmielewski T., Górski P., Beirow B. et al. Theoretical and experimental free vibrations of tall industrial chimney with flexibility of soil // Engineering Structures, 2005. V. 27. P. 25-34, ISSN 0141-0296.
5. Górski P. Investigation of dynamic characteristics of tall industrial chimney based on GPS measurements using Random Decrement Method // Engineering Structures, 2015. V. 83. P. 30-49, ISSN 0141-0296.
6. Пергаменщик Б.К., Лесников И.А., Газоотводящие (дымовые) трубы ТЭС: возведение, ремонт, реконструкция, демонтаж. 1-е изд. М.: НИУ МГСУ, 2014. С. 7-92.
7. Рихтер Л.А. Тепловые электрические станции и защита атмосферы. М.: Энергия, 1975. 312 с.
8. Wong H.Y., Heathcock C.R. Design against wind-induced vibration of multi-flue chimney stacks // Engineering Structures, 1985, Vol. 7, Pages 2-9, ISSN 0141-0296.
9. Ciesielski R., Flaga A. Wind load on multi-flue chimneys in truss or frame-truss housing // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1989. V. 32. P. 211-220, ISSN 0167-6105.
10. Słowik, M., Dobrowolska, M., Borzęcki, K. Dimensioning of reinforced concrete multi – flue chimneys // Budownictwo i Architektura, 3(2). P. 71-80.
11. Мирсалихов К.М., Грибков А.М., Чичирова Н.Д. Аналитический обзор методик выбора оптимальных параметров дымовых труб. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23(1). С.131-145.
12. Росляков П.В., Новожилова Л.Л., Егорова Л.Е. Организация мониторинга вредных выбросов из дымовых труб ТЭС на основе численных исследований // Вестник МЭИ. 2008. № 4. С. 28–39.
13. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Ионкин И.Л. и др. Обеспечение достоверного непрерывного инструментального контроля выбросов маркерных загрязняющих веществ ТЭС в атмосферу // Теплоэнергетика. 2022. № 1. С. 68–77.
14. Дужих Ф.П., Осоловский В.П., Ладыгичев М. Г. Промышленные дымовые и вентиляционные трубы: справочное издание. М.: Теплотехник, 2004. 464 с.
15. Hoehn, L. 84.02 Circumradius of a Cyclic Quadrilateral // The Mathematical Gazette, 2000;84(499):69–70.

### Авторы публикации:

**Грибков Александр Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Атомные и тепловые электрические станции», Казанский государственный энергетический университет.

**Мирсалихов Кирилл Маратович** – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

**Чичирова Наталья Дмитриевна** – д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой «Атомные и тепловые электрические станции», Казанский государственный энергетический университет.

#### References

1. British Electricity International, editor. *Station Planning and Design*. 3rd ed. Pergamon, 1991, ISBN 978-0-08-040511-7. doi:10.1016/B978-0-08-040511-7.50003-6.
2. Prabhaka, N. Kota multiflue chimney (India). *IABSE Structures C-42/87*. IABSE Periodica 3/1987, ISSN 0377-7286. doi: 10.5169/seals-2038.
3. Chmielewski T., Górski P., Beirow B. et al. Theoretical and experimental free vibrations of tall industrial chimney with flexibility of soil. *Engineering Structures*. 2005; 27:25-34, ISSN 0141-0296. doi: 10.1016/j.engstruct.2004.08.009.
4. Górski P. Investigation of dynamic characteristics of tall industrial chimney based on GPS measurements using Random Decrement Method. *Engineering Structures*. 2015; 83:30-49, ISSN 0141-0296. doi: 10.1016/j.engstruct.2014.11.006.
5. Pergamenschchik BK, Lesnikov IA. *Gazootvodyashchie (dymovye) truby TES: vozvedenie, remont, rekonstruktsiya, demontazh*. 1-e izd. Moscow: NIU MGSU, 2014. (In Russ.).
6. Rikhter LA. *Teplovye elektricheskie stantsii i zashchita atmosfery*. Moscow: Energiya, 1975. (In Russ.).
7. Wong H.Y., Heathcock C.R. Design against wind-induced vibration of multi-flue chimney stacks. *Engineering Structures*. 1985; 7:2-9, ISSN 0141-0296. doi: 10.1016/0141-0296(85)90030-6.
8. Ciesielski R., Flaga A. Wind load on multi-flue chimneys in truss or frame-truss housing. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1989; 32:211-220, ISSN 0167-6105. doi: 10.1016/0167-6105(89)90031-7.
9. Słowik, M., Dobrowolska, M., Borzęcki, K. Dimensioning of reinforced concrete multi – flue chimneys. *Budownictwo i Architektura*. 2008; 3(2):71-80. doi: 10.35784/bud-arch.2324.
10. Mirsalikhov K.M., Gribkov A.M., Chichirova N.D. Analysis of methods for selection of optimal parameters of stack. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021; 23(1):131-145. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-1-131-145.
11. Roslyakov PV, Novozhilova LL, Egorova LE. Organizatsiya monitoringa vrednykh vybrosov iz dymovykh trub TES na osnove chislennykh issledovaniy. *Vestnik MEI*. 2008; 4, 28–39.
12. Roslyakov, P.V., Kondrat'eva, O.E., Ionkin, I.L. et al. Ensuring Reliable Continuous Instrumental Emission Control of Marker Pollutants from Thermal Power Plants into the Atmosphere. *Therm. Eng.* 69, 57–65 (2022). doi:10.1134/S0040601521110045.
13. Duzhikh FP, Osolovskii VP, Ladygichev MG. *Promyshlennye dymovye i ventilyatsionnye truby: spravochnoe izdanie*. Moscow: Teplotekhnika, 2004.
14. Hoehn, L. 84.02 Circumradius of a Cyclic Quadrilateral. *The Mathematical Gazette*. 2000; 84(499):69–70. doi: 10.2307/3621477.

#### Authors of the publication

**Aleksandr M. Gribkov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Kirill M. Mirsalikhov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Natalia D. Chichirova** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Получено**

**13. 01.2023г.**

**Отредактировано**

**23.01.2023г.**

**Принято**

**27.01.2023г.**