

**ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО,
ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА
И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ**

АНАЛИЗ ПРЕИМУЩЕСТВ ТРЕХСТВОЛЬНЫХ ДЫМОВЫХ ТРУБ ТЭС

© 2020 г. Н. А. Зройчиков^{а, *}, А. М. Грибков^{б, **}, М. И. Сапаров^{а, ***}, К. М. Мирсалихов^{б, ****}

^аЭнергетический институт им. Г.М. Кржижановского, Ленинский просп., д. 19, Москва, 119991 Россия

^бКазанский государственный энергетический университет, Красносельская ул., д. 51, г. Казань, 420066 Россия

*e-mail: zroichikov@eninnet.ru

**e-mail: gribkovalmi@mail.ru

***e-mail: saparov@eninnet.ru

****e-mail: mirsalihovkm@gmail.com

Поступила в редакцию 15.01.2020 г.

После доработки 18.02.2020 г.

Принята к публикации 19.02.2020 г.

Проведено сравнение конструкций трех- и четырехствольных дымовых труб с привлечением метода суммарных дисконтированных затрат. Выявлено, что при современных соотношениях стоимостных показателей практически во всем диапазоне используемых характеристик дымовых труб трехствольные трубы оказываются выгоднее, чем четырехствольные. Приведены формулы для расчета диаметра оболочки дымовой трубы с двумя одинаковыми и третьим, отличающимся по размеру, стволами. Разработана методика расчета диаметра оболочки трехствольной трубы со стволами различных диаметров. Во всех вариантах сравнения были заложены одинаковые расстояния между соседними стволами и стволом и оболочкой. Впервые предложена методика выбора оптимальных размеров трехствольной дымовой трубы, учитывающая индивидуальные условия транспорта газов по каждому стволу, позволяющая найти оптимальное распределение скоростей газов по стволам трехствольной трубы и рассчитать минимальные суммарные дисконтированные затраты для дымовых труб со стволами разных диаметров, различными расходами и температурами газов в них. Показано, что учет особенностей гидродинамики в стволах с различными скоростями газов позволяет предложить решения, снижающие суммарные приведенные затраты на 7–8% по сравнению с традиционными решениями. В том случае если оптимальным решением оказывается обеспечение разных скоростей в стволах, то для предотвращения неравномерности поля скоростей в устье дымовой трубы и возможного вихреобразования при слиянии потоков дымовых газов от разных стволов при работе трубы на максимальной нагрузке предусматривается установка конфузоров на каждый ствол с индивидуальными и достаточно малыми углами сужения.

Ключевые слова: трехствольные и четырехствольные дымовые трубы, периметры стволов и железобетонной оболочки, многоствольные трубы с разными диаметрами стволов, различные температуры газов в стволах, оптимальная скорость дымовых газов в каждом стволе

DOI: 10.1134/S004036362009012X

Первая многоствольная дымовая труба высотой 200 м для подключения четырех энергоблоков мощностью по 500 МВт была построена в Англии на ТЭС “Эггборо”, Северный Йоркшир, в 1967 г. и работает до настоящего времени. С тех пор многоствольные дымовые трубы нашли широкое применение в мировой энергетике. Их преимущества были оценены и в СССР. Многоствольные дымовые трубы эффективны на крупных ТЭС, работающих на сернистом топливе, и в том числе на ТЭЦ с большой промышленной нагрузкой [1]. При их сооружении требуются более высокие затраты по сравнению с одноствольными дымовыми трубами, но при этом они обеспечивают более надеж-

ную эксплуатацию газоздушных трактов ТЭС. Это достигается благодаря тому, что практически отсутствуют ограничения по длительности эксплуатации несущей железобетонной оболочки, а также возможен ремонт расположенных в ней газоотводящих стволов по очереди без отключения всего оборудования, подсоединенного к трубе. Для этого внутри железобетонной оболочки имеется зона обслуживания, пригодная также для ремонта одного из стволов при работе остальных. На уровне наружных светофорных площадок устанавливаются и внутренние сплошные площадки, которые сообщаются между собой посредством проходного проема в оболочке. Между соседними стволами и

между стволом и оболочкой на внутренней площадке имеются проходные зазоры. Стволы чаще всего выполняются из стали. Тепловая изоляция стволов позволяет обеспечить температуру их внутренней стенки выше температуры точки росы, что предотвращает или существенно замедляет низкотемпературную коррозию даже при работе на сернистом топливе.

Наиболее часто применяются трех- и четырехствольные дымовые трубы. Если количество подключаемых котлов кратно трем, то выбирается трехствольная труба, если четырем – четырехствольная. Однако при таком обосновании выбора количества стволов не учитываются некоторые существенные факторы, которые рассмотрены в данной статье.

В соответствии с требованиями [2] ширина свободного прохода площадок должна быть не менее 600 мм, а для обслуживания контрольно-измерительных приборов и другого оборудования – не менее 800 мм. С учетом запаса для теплоизоляции минимальное расстояние между соседними стволами принимается равным 1.2 м, а минимальное расстояние между стволом и железобетонной оболочкой – 1.0 м. Стоимость несущей железобетонной оболочки составляет примерно 50%, стволов – 40%, фундамента – 10% стоимости многоствольной трубы высотой 200–250 м. Эти соотношения зависят от периметров оболочки и стволов. Далее в настоящей статье доля стоимости фундамента принята постоянной и равной 10%.

УСЛОВИЯ СОПОСТАВИМОСТИ ВАРИАНТОВ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ К ДЫМОВОЙ ТРУБЕ

Если к трубе подключается однотипное оборудование, стволы выполняются одинаковых размеров. На рис. 1 показаны поперечные сечения трех- и четырехствольной дымовых труб в самом узком месте на верхней площадке.

Для расчета периметров трех- и четырехствольных труб со стволами одинаковых диаметров необходимо воспользоваться соотношением между диаметрами стволов и железобетонной оболочки при принятых допущениях

$$D = \frac{d + 1.2}{\sin \frac{180}{N}} + d + 2, \quad (1)$$

где d – диаметр ствола трубы; N – количество стволов (три или четыре).

При одинаковых суммарных площадях поперечных сечений стволов отношение суммарного периметра стволов трехствольной трубы P_3 к суммарно-

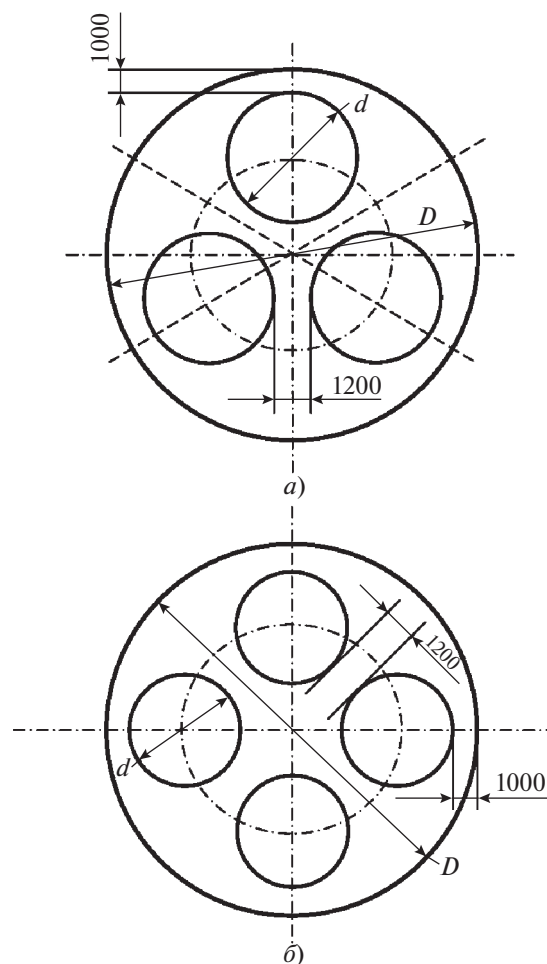


Рис. 1. Поперечное сечение трехствольной (а) и четырехствольной (б) дымовой трубы. D – диаметр железобетонной оболочки; d – диаметр ствола

му периметру стволов четырехствольной трубы P_4 не зависит от размеров стволов и составляет

$$\frac{P_3}{P_4} = \sqrt{\frac{3}{4}} \approx 0.866. \quad (2)$$

Доля стоимости стволов в общей стоимости дымовой трубы растет с увеличением суммарной площади поперечного сечения стволов f , так как увеличивается отношение периметров стволов $P_{ст}$ к периметру оболочки $P_{об}$ (рис. 2).

На основании рис. 2 и формулы (2) можно показать, что отношение $P_{об3}/P_{об4}$ (здесь $P_{об3}$, $P_{об4}$ – периметр оболочки трехствольной и четырехствольной трубы) при изменении суммарной площади поперечного сечения от 10 до 100 м² (что соответствует подключению на один ствол минимум одного водогрейного котла ПТВМ-100 и максимум одного котла энергоблока К-500) изменяется

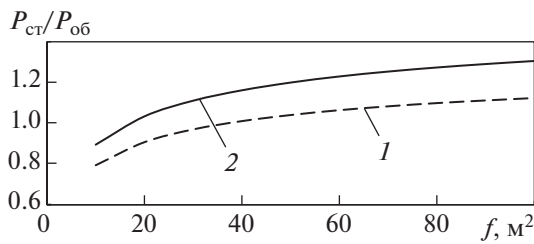


Рис. 2. Зависимость отношения периметров стволов к периметру оболочки от суммарной площади поперечного сечения стволов для трехствольной (1) и четырехствольной (2) трубы

от 0.978 до 1.006. Следовательно, периметр оболочки трехствольной трубы во всем рассматриваемом диапазоне f практически не превышает периметра оболочки четырехствольной трубы. Таким образом, вместо четырехствольной дымовой трубы следует применять трехствольную, так как стоимость трехствольной трубы примерно на 6% меньше стоимости четырехствольной за счет меньшего периметра стволов. Кроме этого, затраты на транспорт газов в трехствольной трубе будут меньше из-за увеличенных диаметров стволов.

При четырех котлах возможно подключение двух котлов каждый на свой ствол и двух котлов на один общий ствол, при пяти котлах – одного котла на отдельный ствол, а четырех других по два котла на один ствол. Если принять, что скорость газов во всех стволах одинакова, то площадь поперечного сечения большого ствола будет в 2 раза больше площади малого ствола.

Поперечное сечение трехствольной дымовой трубы, площади двух малых стволов которой такие же, как четырехствольной трубы, а площадь поперечного сечения третьего (большого) ствола в 2 раза больше площади малого ствола с теми же проходными зазорами, показано на рис. 3.

Расстояние $b = AC$ вычисляется по формуле

$$b = \frac{d_6}{2} + \frac{d_M}{2} + 1.2. \quad (3)$$

Расстояние $a = BC$ можно рассчитать по выражению

$$a = \frac{d_M}{2} + 0.6. \quad (4)$$

Для определения высоты $h = AB$ прямоугольного треугольника ACB можно использовать выражение

$$h = \sqrt{(b^2 - a^2)}. \quad (5)$$

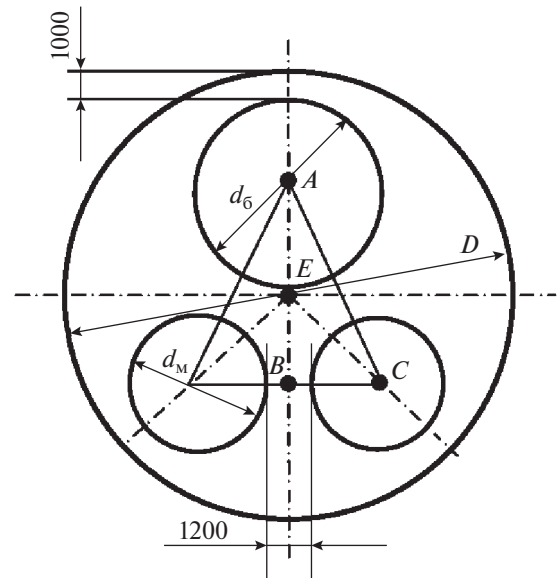


Рис. 3. Поперечное сечение трехствольной дымовой трубы с двумя малыми и одним большим стволом. d_6, d_M – диаметры большого и малого стволов

Если задано расстояние $s = AE$, тогда расстояния $e = BE$ и $c = EC$ можно вычислить по формулам

$$e = h - s; \quad (6)$$

$$c = \sqrt{(e^2 + a^2)}. \quad (7)$$

Из условия равенства радиусов оболочки можно получить

$$s + \frac{d_6}{2} + 1 = \sqrt{[(h - s)^2 + a^2]} + \frac{d_M}{2} + 1 \quad (8)$$

или

$$s = \frac{h^2 + a^2 - \left(\frac{d_6}{2} - \frac{d_M}{2}\right)^2}{2\left(\frac{d_6}{2} - \frac{d_M}{2} + h\right)}. \quad (9)$$

После ввода обозначения

$$u = \frac{d_6}{2} - \frac{d_M}{2} \quad (10)$$

формулу (9) можно представить в виде

$$s = \frac{h^2 + a^2 - u^2}{2(h + u)}. \quad (11)$$

С учетом (3)–(11) формула для расчета диаметра железобетонной оболочки приобретает вид

$$D = 2s + d_6 + 2. \quad (12)$$

Если нужно подключить пять одинаковых котлов к трехствольной трубе, устанавливают два

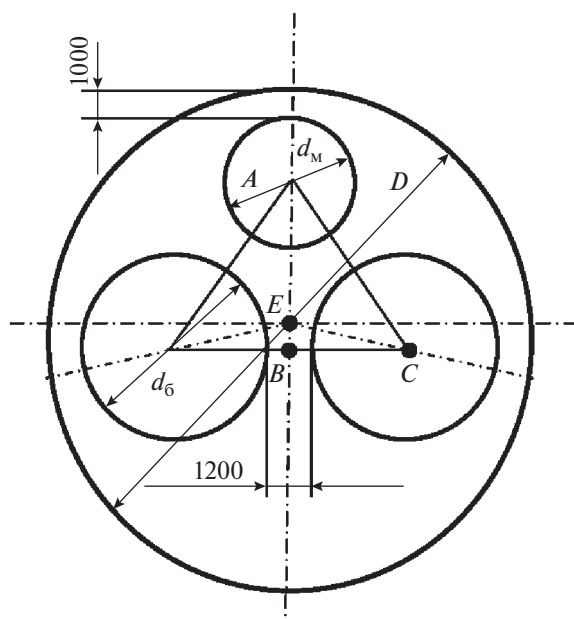


Рис. 4. Поперечное сечение трехствольной дымовой трубы с двумя большими и одним малым стволом. Обозначения см. рис. 3

больших ствола и один ствол меньшего диаметра (рис. 4).

По аналогии с предыдущими рассуждениями можно записать

$$s = \frac{h^2 + a^2 - u^2}{2(h - u)}, \quad (13)$$

где

$$a = \frac{d_6}{2} + 0.6. \quad (14)$$

Диаметр оболочки такой трубы вычисляют по формуле

$$D = 2s + d_m + 2. \quad (15)$$

При проверке преимущества трехствольной трубы перед четырехствольной условием сопоставимости вариантов следует считать одинаковую суммарную площадь поперечного сечения стволов. Отношение периметров стволов трехствольной трубы с двумя малыми и одним большим стволом (вариант 1) к периметру стволов четырехствольной трубы уменьшается с 0.866 до 0.854, а для трубы с одним малым и двумя большими стволами (вариант 2) — до 0.856. Это значит, что снижение стоимости стволов будет еще более значительным, чем для трубы с одинаковыми стволами в обоих вариантах.

Диаметр оболочки трехствольной трубы в варианте 1 при изменении суммарной площади

поперечного сечения стволов от 10 до 100 м² будет таким же, как для трехствольной трубы с одинаковыми стволами, и меньше, чем диаметр четырехствольной трубы с одинаковыми стволами, в интервале $f = 10-60$ м². При $f = 100$ м² диаметр железобетонной оболочки трехствольной трубы D_3 будет немного больше, чем четырехствольной D_4 : $D_3 = 17.42$ и $D_4 = 17.32$ м. Таким образом, можно ожидать, что стоимость трехствольной трубы в варианте 1 будет меньше стоимости четырехствольной трубы с одинаковыми стволами на 5–6%. Аналогичными будут результаты и для варианта 2.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Более точные данные можно получить при расчете суммарных дисконтированных затрат по методике, приведенной в [3] и реализованной в программном комплексе [4] на примере четырехствольной трубы Костромской ГРЭС, у которой на каждый ствол подключен энергоблок 300 МВт (вариант 3), и трехствольной трубы с двумя малыми стволами, на которые подключаются по одному энергоблоку, и одним большим стволом с подключением к нему двух энергоблоков (вариант 4).

Исходные данные для расчета приведены далее:

Объемный расход дымовых газов на трубу V , м ³ /с	1600
Массовый выброс вредных веществ M , г/с, при работа на мазуте	
в пересчете на оксиды азота	2400
Температура, °С:	
воздуха t_b	20
уходящих газов t_r	130
Максимальная концентрация вредных веществ на уровне дыхания, создаваемая дымовой трубой $c_{тр}$, мг/м ³	0.1
Коэффициент осаждения примеси F	1.0
Средняя толщина стенок стволов δ , м	0.014
Абсолютная шероховатость стенок стволов Δ , м	0.002
Стоимость железобетона, тыс. руб/м ³ , израсходованного на изготовление:	
оболочки трубы $\Pi_{ж/б}$	24
фундамента $\Pi_{ф}$	17
Стоимость металла (стали), из которого изготовлены стволы Π_c , тыс. руб/м ³	585
Стоимость электроэнергии $a_{эн}$, руб/(кВт · ч)	2.0

Результаты расчета параметров и стоимости сооружения дымовой трубы

Параметр, затраты	Вариант 3	Вариант 4
Высота трубы H , м	252.1	251.5
Оптимальная скорость дымовых газов в стволах на выходе из трубы w_0 , м/с	25.2	25.7
Диаметр ствола d_c , м:	4.5	—
малого d_m	—	4.45
большого d_b	—	6.30
Диаметр железобетонной оболочки D , м	14.56	14.47
Стоимость трубы $K_{тр}$, млн руб.	453.4	427.2
Суммарные дисконтированные затраты Z_d , млн руб.	442.4	410.5

Доля заемных средств $E1$ 0.8
 Инфляция $E2$, %5.0
 Процент кредитования $E3$, %10.0
 Стоимость рабочего дня $\Pi_{рд}$, тыс. руб./сут3.0

Результаты расчета параметров дымовой трубы приведены в таблице.

Зависимость суммарных дисконтированных затрат от скорости выхода дымовых газов показана на рис. 5. Как видно из рисунка, суммарные дисконтированные затраты для трехствольной трубы по сравнению с четырехствольной уменьшаются на 31.93 млн руб., или на 7.2%.

Результаты второй оптимизации при постоянной высоте трубы 251.5 м, которая была получена при первой оптимизации, представлены далее:

w_0 , м/с21.6
 $K_{тр}$, млн руб.450.4
 Z_d , млн руб.403.7
 d_m , м4.86
 d_b , м6.87
 D , м15.48

Однако при этом приземная концентрация вредных веществ превысит допустимую и составит $c_{тр} = 0.108$ мг/м³.

Чтобы обеспечить концентрацию $c_{тр} = 0.1$ мг/м³, нужно сохранить скорость газов в устье трубы $w_0 = 25.7$ м/с, а для этого в выходной части стволов на длине 5 м необходимо установить конфузоры с малым углом сужения. Диаметр малых стволов следует уменьшить с 4.86 до 4.45 м, а большого — с 6.87 до 6.30 м. Угол сужения для малых стволов составит 2.3°, для большого ствола —

3.3°. При этом как стоимостные, так и аэродинамические характеристики дымовой трубы практически не изменяются. Таким образом, снижение скорости газов в стволах трехствольной трубы с 25.7 до 21.6 м/с позволяет уменьшить суммарные приведенные затраты еще на 6.763 млн руб., или всего на 8.7%. В итоге стоимость дымовой трубы снизилась с 453.4 до 450.4 млн руб.

Если главной целью является уменьшение не суммарных дисконтированных затрат, а стоимости дымовой трубы, тогда можно остановиться на варианте со скоростью газов в стволах $w_0 = 25.7$ м/с. При этом стоимость трубы снижается с 453.4 до 427.2 млн руб., или на 6%. В этом случае можно оптимизировать также и скорости газов в стволах. Если в малых стволах скорость газов уменьшить на 1.5% (до 25.3 м/с), а в большом стволе увеличить на 1.5% (до 26.2 м/с), то суммарные дисконтированные затраты снизятся допол-

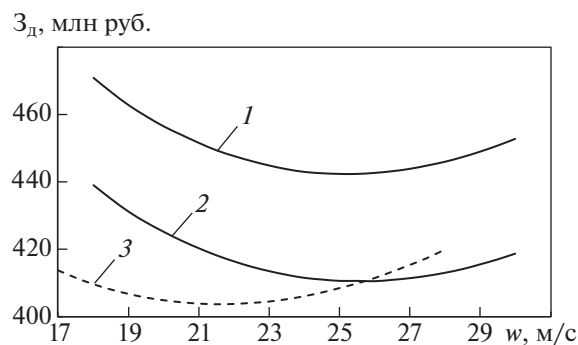


Рис. 5. Зависимость суммарных дисконтированных затрат от скорости выхода газов для четырехствольной (1) и трехствольной (2) трубы при постоянных приземных концентрациях вредных веществ и для трехствольной трубы при ее постоянной высоте (3)

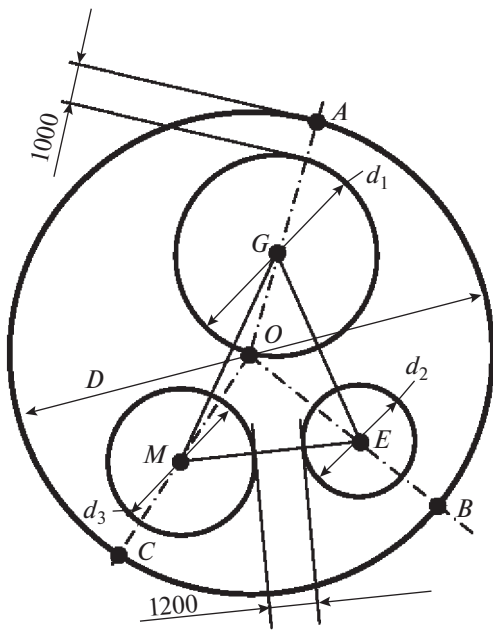


Рис. 6. Поперечное сечение трехствольной дымовой трубы с тремя разными стволами.
 d_1, d_2, d_3 – диаметры стволов

нительно на 72 тыс. руб. (с 410.490 до 410.418 млн руб.).

Если приземную концентрацию вредных веществ потребуется снизить с 0.10 до 0.06 мг/м³, то высота дымовой трубы будет равна 334.1 м, а оптимальная скорость газов составит 28.2 м/с при суммарных дисконтированных затратах 662.7 млн руб. В этом случае увеличение скорости газов в большом стволе с 28.2 до 28.9 м/с при снижении их скорости в малых стволах с 28.2 до 27.6 м/с позволяет уменьшить суммарные дисконтированные затраты на 235 тыс. руб. (с 662.753 до 662.518 млн руб.).

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХСТВОЛЬНЫХ ТРУБ СО СТВОЛАМИ РАЗНЫХ ДИАМЕТРОВ

Далее приведен пример для расчета параметров трехствольной дымовой трубы со стволами трех разных диаметров d_1, d_2 и d_3 , поперечное сечение которой показано на рис. 6, минимальные расстояния между стволами принимаются равными 1.2 м, между стволами и оболочкой – 1.0 м.

Вначале нужно разработать методику расчета внутреннего диаметра железобетонной оболочки дымовой трубы. Здесь применены следующие условные обозначения: O – центр окружности оболочки; R – радиус оболочки; $OA = OB = OC = R$; $GE = l = \frac{d_1}{2} + \frac{d_2}{2} + 1.2$; $EM = g = \frac{d_2}{2} + \frac{d_3}{2} + 1.2$;

$MG = e = \frac{d_3}{2} + \frac{d_1}{2} + 1.2$; $\frac{d_1}{2} - 1 = c_1$; $\frac{d_2}{2} - 1 = c_2$;
 $\frac{d_3}{2} - 1 = c_3$; p_1, p_2, p_3 – полупериметры треугольников OGE, OEM, OMG ; S_1, S_2, S_3 – площади треугольников OGE, OEM, OMG .

Полупериметр p треугольника GEM можно вычислить по формуле

$$p = (l + g + e)/2.$$

Площадь S треугольника GEM в соответствии с формулой Герона может быть представлена так:

$$S = \sqrt{p(p-l)(p-g)(p-e)}. \quad (16)$$

Согласно рис. 6 $OG = R - c_1$, $OE = R - c_2$, $OM = R - c_3$.

Полупериметры треугольников можно рассчитать по следующим формулам:

$$p_1 = (OG + l + OE)/2;$$

$$p_2 = (OE + g + OM)/2;$$

$$p_3 = (OM + e + OG)/2.$$

Площади треугольников вычисляются по выражениям

$$S_1 = \sqrt{p_1(p_1 - l)(p_1 - OE)(p_1 - OG)}; \quad (17)$$

$$S_2 = \sqrt{p_2(p_2 - g)(p_2 - OE)(p_2 - OM)}; \quad (18)$$

$$S_3 = \sqrt{p_3(p_3 - e)(p_3 - OG)(p_3 - OM)}. \quad (19)$$

Для определения оптимального радиуса оболочки трубы необходимо сравнить площадь S с суммой площадей:

$$S_{\text{сум}} = S_1 + S_2 + S_3. \quad (20)$$

Задача решается методом последовательных приближений. Сначала нужно задать радиус оболочки заведомо больший, чем требуется, например $R = d_1 + d_2 + d_3$, рассчитать площади S и $S_{\text{сум}}$ и сравнить их. Если разность $\Delta S = S - S_{\text{сум}}$ велика, следует уменьшать значение R до тех пор, пока ΔS не снизится до приемлемого значения, например до 0.0005 м. После этого радиус и, следовательно, диаметр оболочки трубы считаются найденными.

Результат получается верным, если каждое из значений S_1, S_2 и S_3 больше нуля или равно нулю. Если подкоренное выражение в формулах (17)–(19) оказывается меньше нуля, это означает, что уменьшение диаметра данного ствола уже не при-

водит к уменьшению диаметра оболочки. Например, при $d_1 = d_2 = d_3 = 5$ м диаметр оболочки $D = 14.159$ м, при диаметре ствола $d_3 = 3.15$ м диаметр оболочки становится $D = 13.218$ м. Дальнейшее уменьшение диаметра этого ствола к изменению диаметра оболочки не приведет. При $d_3 = 3.15$ м и $d_2 = 2.33$ м диаметр оболочки составляет $D = 11.362$ м. При дальнейшем уменьшении диаметра ствола d_2 диаметр оболочки не изменяется.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ГАЗОВ

Далее приведен пример расчета оптимальной скорости газов в стволах разных диаметров. При суммарном расходе газов в трубе $V = 1600$ м³/с расход по стволам можно распределить следующим образом: $V_1 = 300$, $V_2 = 500$ и $V_3 = 800$ м³/с. В этом случае оптимальная скорость газов при одинаковых скоростях в стволах окажется равной $w_0 = 25.7$ м/с, а суммарные дисконтированные затраты будут $Z_d = 411.884$ млн руб. Но если провести оптимизацию по каждому стволу, то скорости газов в стволах составят: $w_1 = 24.1$, $w_2 = 25.7$, $w_3 = 26.3$ м/с, а суммарные дисконтированные затраты уменьшатся до $Z_d = 410.551$ млн руб., т.е. снизятся на 1.333 млн руб.

При перераспределении скоростей по стволам нужно обеспечить постоянство количества движения wV . При равных скоростях в стволах $wV = 25.7 \times 1600 = 41120$ м⁴/с², при разных скоростях $wV = 24.1 \times 300 + 25.7 \times 500 + 26.3 \times 800 = 41120$ м⁴/с², т.е. условие постоянства количества движения выполняется и подъем дымового факела от трубы не изменится. Точное равенство выходных скоростей по стволам можно обеспечить изменением площади поперечного сечения стволов на выходном участке трубы, длина которого составляет 5 м.

Разработанная авторами методика расчета параметров дымовой трубы позволяет также учесть возможные различия температуры газов по стволам. Это можно показать на примере рассмотренного выше варианта расчета, в котором к одному стволу (№ 1) подключаются пиковые водогрейные котлы с объемным расходом газов $V_{\text{п}} = 400$ м³/с и температурой $t_{\text{п}} = 180^\circ\text{C}$. К двум другим стволам (№ 2, 3) подключаются по два энергетических котла с расходом газов на ствол $V_s = 800$ м³/с и температурой $t_s = 120^\circ\text{C}$. Если принять, что скорости газов в стволах одинаковы, то оптимальной оказывается средняя скорость $w_0 = 24.4$ м/с, а суммарные дисконтированные затраты составят $Z_d = 388.81$ млн руб. В данном случае при повыше-

нии температуры в стволе № 1 или увеличении диаметров стволов № 2, 3 возможен рост скорости газов в них по сравнению со средней. Преобладание того или иного фактора зависит от конкретных условий. В данном случае преобладающим оказалось влияние увеличенных диаметров и оптимальные скорости распределяются следующим образом: $w_1 = 24.0$, $w_2 = w_3 = 24.5$ м/с. Суммарные дисконтированные затраты уменьшились до $Z_d = 388.775$ млн руб.

Если принять, что температура газов по стволам будет одинаковой и равной средневзвешенной, т.е. $t = 132^\circ\text{C}$, при сохранении такого же распределения расходов газа, то при одинаковых скоростях газов в стволах оптимальной оказывается средняя скорость $w_0 = 24.3$ м/с, а суммарные дисконтированные затраты составят $Z_d = 387.352$ млн руб. В данном случае фактор, влияющий на увеличение скорости газов в стволе № 1, отсутствует, поэтому при оптимизации большее уменьшение скорости газов получается в стволе № 1: $w_1 = 23.1$ при $w_2 = w_3 = 24.6$ м/с. Суммарные дисконтированные затраты снизились до $Z_d = 387.081$ млн руб. Таким образом, можно найти оптимальное решение с учетом индивидуальных условий работы отдельных стволов.

ВЫВОДЫ

1. Расчеты по разработанной авторами сравнительной методике показали преимущества трехствольных дымовых труб над четырехствольными. Для обеспечения оптимальной скорости газов и выравнивания скоростей газов по стволам в устье трубы предлагается на каждый ствол устанавливать конфузоры с малыми углами сужения.
2. При переходе с четырехствольных дымовых труб на трехствольные суммарные приведенные затраты снижаются на 7–8%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков Э.П., Гаврилов Е.И., Дужих Ф.П. Газоотводящие трубы ТЭС и АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. СНиП II-35-76. Свод правил. Котельные установки. М.: Стандартинформ, 2017.
3. Экономика энергетики: учеб. пособие / Н.Д. Рогалев, А.Г. Зубкова, И.В. Мастерова, Г.Н. Курдюкова, В.В. Бологова, О.Ю. Пономарева; под ред. Рогалева Н.Д. М.: Изд-во МЭИ, 2005.
4. Универсальная методика определения оптимальной скорости газов в газоотводящих стволах дымовых труб ТЭС / Н.А. Зройчиков, А.М. Грибков, М.И. Сапаров, К.М. Мирсалихов // Теплоэнергетика. 2020. № 3. С. 15–23.
<https://doi.org/10.1134/S0040363620030066>