

DOI: 10.17516/1999-494X-0436

УДК 697.8

Calculation of Gas Velocity in the Shafts of Four-Barrel Smokestacks

Alexander M. Gribkov*,
Kirill M. Mirsalikhov and Natalia D. Chichirova
*Kazan State Power Engineering University
Kazan, Russian Federation*

Received 23.10.2022, received in revised form 09.11.2022, accepted 05.12.2022

Abstract. A review and analysis of the methods for designing chimneys of thermal power plants (TPPs) is made. It is shown that the main provisions of the methodology developed back in the USSR are relevant at the present time. The main feature of those provisions of the methodology is that the value of money was taken constant. Taking into account modern economic conditions and changes in prices for electricity, materials and wages, it was possible to develop a more general methodology that is more effective than the best foreign analogues.

In Thermal Engineering this technique was modernized in terms of calculating 3-barrel chimneys with shafts of various diameters. For this, for the first time, an analytical dependence was obtained for calculating the diameter of the outer reinforced concrete shell for 3 shafts of different diameters.

In this work, a further extension of the application of this technique to 4-barrel pipes is made. It was possible for the first time to obtain an analytical solution for finding the diameter of a reinforced concrete chimney for 4 shafts of different diameters. It is shown that the gas velocities must be chosen depending on the flow rate and temperature in each barrel.

The analysis of the main modern price support for the construction of 4-barrel chimneys is given. Multivariate exemplary calculations are given for both real and prospective cases of flue gas evacuation.

Keywords: multi-stem chimney, thermal power plant, economics, methodology, calculation method, optimal gas velocity.

Citation: Gribkov, A.M., Mirsalikhov, K.M., Chichirova, N.D. Calculation of gas velocity in the shafts of four-barrel smokestacks. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(8), 900–914. DOI: 10.17516/1999-494X-0436

Расчет скорости газов в стволах четырехствольной дымовой трубы

А. М. Грибков, К. М. Мирсалихов, Н. Д. Чичирова
Казанский государственный энергетический университет
Российская Федерация, Казань

Аннотация. Сделан обзор и выполнен анализ методик проектирования дымовых труб тепловых электростанций (ТЭС). Показано, что основные положения разработанной еще в СССР методики актуальны и в настоящее время. Основной особенностью тех положений методики является то, что стоимость денег принималась постоянной. Учет современных экономических условий и изменений в ценах на электроэнергию, на материалы и на зарплату позволил разработать более общую методику, которая более эффективна, чем лучшие зарубежные аналоги.

В работе Thermal Engineering была проведена модернизация этой методики в части расчета 3-ствольных дымовых труб со стволами различных диаметров. Для этого впервые была получена аналитическая зависимость расчета диаметра наружной ж/б оболочки для 3-х стволов различного диаметра.

В данной работе сделано дальнейшее расширение применения этой методики на 4-ствольные трубы. Удалось впервые получить аналитическое решение нахождения диаметра ж/б дымовой трубы и для 4 стволов различного диаметра. Показано, что скорости газов должны выбираться в зависимости от расхода и температуры в каждом стволе.

Приведен анализ основного современного ценового обеспечения строительства 4-ствольных дымовых труб. Приведены многовариантные примерные расчеты как для реальных, так и для перспективных случаев эвакуации дымовых газов.

Ключевые слова: многоствольная дымовая труба, тепловая электростанция, экономика, методика, расчетный метод, оптимальная скорость газов.

Цитирование: Грибков А. М. Расчет скорости газов в стволах четырехствольной дымовой трубы / А. М. Грибков, К. М. Мирсалихов, Н. Д. Чичирова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(8). С. 900–914. DOI: 10.17516/1999-494X-0436

Постановка задачи. При проектировании 4-ствольных дымовых труб чаще всего применяются стволы одинакового диаметра и с одинаковыми характеристиками дымовых газов. Для этих условий методика выбора скорости дымовых газов по стволам работает без замечаний. Но если диаметры стволов разные, то труба рассчитывалась и проектировалась по наибольшему диаметру ствола. На рис. 1 приведен рисунок из [5, рис. 8–9, с. 286], где три больших ствола предназначены для подключения энергетических котлов, а 4-й, меньшего диаметра, для подключения водогрейных котлов. Диаметры стволов и ж/б оболочки находились из условия, что скорости газов на номинальном (зимнем) режиме во всех стволах одинаковы, а скорость эта выбиралась по минимальному значению расчетных затрат. В результате вокруг ствола меньшего диаметра создавалось лишнее пространство.

Проф. Л. А. Рихтер привел формулы для расчета диаметра ж/б оболочки для стволов одинакового диаметра. Попытка найти решение для стволов различного диаметра ему не удалась. По этому поводу он написал: «При разных диаметрах стволов аналитическое решение для нахождения минимального диаметра наружной оболочки значительно усложняется и может быть найдено из геометрического построения» [5, с. 264]. Чтобы найти диаметр оболочки для одного

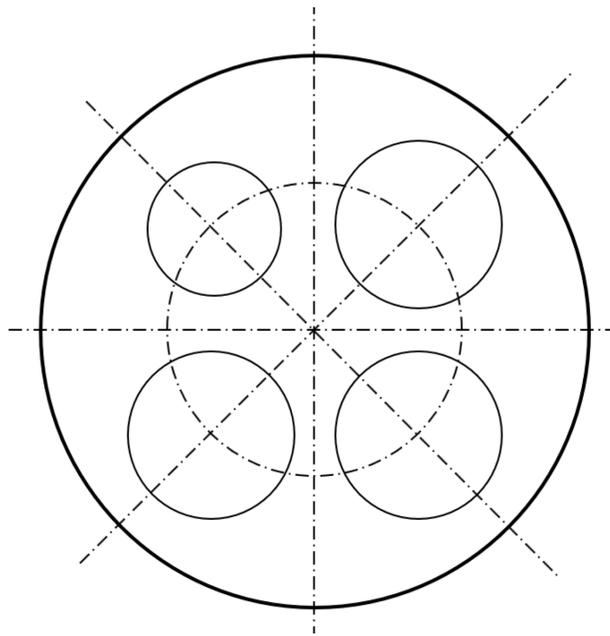


Рис. 1. Диаметр наружной оболочки найден по наибольшему стволу

Fig. 1. The diameter of the outer shell is found along the largest trunk

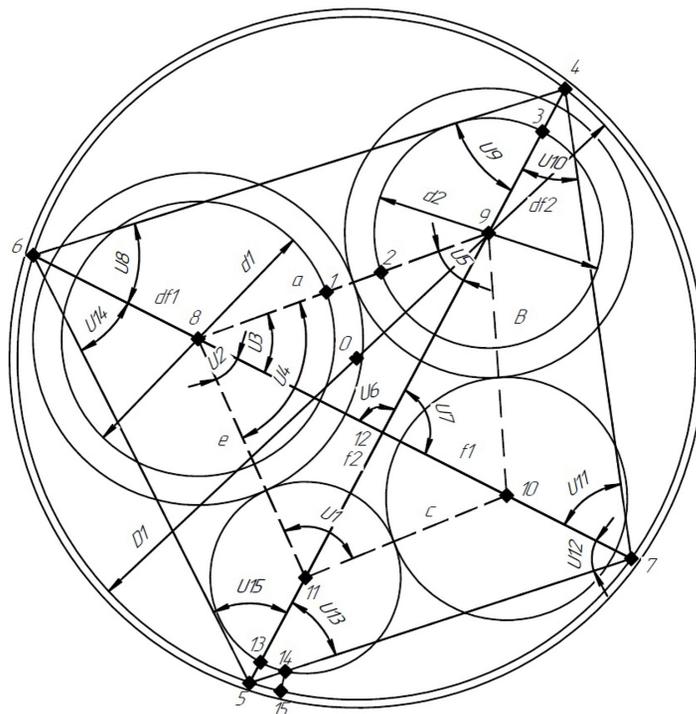


Рис. 2. Диаметр наружной оболочки найден по заданным расстояниям между стволами и между стволами и оболочкой

Fig. 2. The diameter of the outer shell is found by the specified distances between the trunks and between the trunks and the shell

варианта из геометрического построения, даже с использованием современных графических программ, потребуется, при определенном навыке, порядка 15 минут, что совершенно неприемлемо для многовариантных расчетов на компьютере.

Нам удалось найти аналитическое решение нахождения диаметра наружной оболочки сначала для 3-ствольных труб с разными стволами [4], а сейчас и для 4-ствольной трубы.

Для этого была составлена и решена система из 31 алгебраического и тригонометрического уравнения с 31 неизвестной величиной.

Стволы нужно расположить таким образом, чтобы выполнялось условие

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

Задаваясь углом U_1 , получаем промежуточные результаты для всех неизвестных величин и проверяем решение уравнения (1). В 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 4-угольника со сторонами $L(4-6)$, $L(4-7)$, $L(5-6)$ и $L(5-7)$, по формуле Парамешвары [6] найдем ее диаметр.

Для этого обозначим

$$Z_1 = L(5-6) \cdot L(4-6) + L(4-7) \cdot L(5-7), \quad (2)$$

$$Z_2 = L(4-7) \cdot L(4-6) + L(5-6) \cdot L(5-7), \quad (3)$$

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

$$p_0 = (L(5-7) + L(4-6) + L(5-6) + L(4-7))/2, \quad (5)$$

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

запишем

$$D_1 = 0,5 \sqrt{\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot Z_3}{Z_4}}. \quad (7)$$

Далее вводится поправка на смещение осей.

Обозначим

$$t_1 = L(8-12)/L(12-10) \quad (8)$$

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

В результате получаем

$$D = D_1 + 0,8 (t^{0,8} - 1), \quad (10)$$

где $t = (t_1 + t_2)/2$.

Правильность полученных результатов проверялась с помощью программы «Компас». Решение находится численным методом и встроено в программу расчета суммарных дисконтированных затрат по методике, изложенной в [3]. При этом рассчитывается и внутреннее межтрубное пространство, которое может быть использовано для размещения лифта и лестничной клетки.

Использование найденного решения позволяет обеспечить условия сопоставимости рассматриваемых вариантов по заданным интервалам между ограничивающими поверхностями и обеспечить более точное проектирование дымовой трубы, позволяющее найти более дешевый вариант ее исполнения. Так, например, для варианта, приведенного на рис. 1. стоимость оболочки на ТЭЦ может быть снижена на 5–6 % в зависимости от характеристик дымовой трубы.

Анализ многовариантных расчетов также показал, что диаметр оболочки зависит и от порядка расположения стволов. Минимальный диаметр может быть получен только в том случае, если большие стволы расположены друг против друга.

Дополнительное снижение суммарных дисконтированных затрат может быть получено, если учитывать особенности работы каждого ствола. Если в стволах дымовые газы имеют различную температуру, или через них проходят различные объемные расходы, то и скорости в них должны быть различными. Эти скорости на выходе из дымовой трубы для формирования условий безвихревого объединения могут быть выравнены с помощью установки диффузоров или конфузоров с малыми углами раскрытия или сужения.

Влияние объемных расходов. Температуры газов одинаковые, а расходы по стволам разные. Стволы стальные размещаем оптимальным образом – большие стволы друг против друга. Примем: расход газов по стволам: $V_1 = 1000 \text{ м}^3/\text{с}$; $V_2 = 380 \text{ м}^3/\text{с}$; $V_3 = 630 \text{ м}^3/\text{с}$; $V_4 = 260 \text{ м}^3/\text{с}$. Температура газов по стволам: $t_{1-4} = 135 \text{ }^\circ\text{C}$. Выбросы по стволам в пересчете на оксиды азота: $M_1 = 1300 \text{ г/с}$; $M_2 = 500 \text{ г/с}$; $M_3 = 850 \text{ г/с}$; $M_4 = 40 \text{ г/с}$. Концентрация вредных веществ в пересчете на оксиды азота, которая может быть создана этой дымовой трубой $C_{\text{тр}} = 0,07 \text{ мг/м}^3$.

Другие исходные данные: температура воздуха $t_{\text{в}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; коэффициент температурной стратификации $A = 160$; коэффициент осаждения примеси $F = 1$; ветровой район – 2; цена материала ж/б оболочки – 16600 руб./м³; цена ж/б фундамента – 14200 руб./м³; модуль прочности грунта – 1; число часов работы в году – 8000; цена материала стального ствола – 430000 руб./м³; толщина стенок ствола – 0,014 м; абсолютная шероховатость ствола – 0,001 м; коэффициент нагрузки котлов за рабочий период – 0,75; себестоимость электроэнергии – 1,25 руб./кВт·ч; доля заемных средств – 0,4; собственные средства – 0,6; кредит взят под 0,15; инфляция – 0,08; стоимость рабочего дня – 3000 руб.; коэффициент ветровой для оболочки – 1; коэффициент ветровой для фундамента – 1; кпд тягодутьевых машин – 0,7; кпд двигателей – 0,98.

Сначала ищем оптимальную одинаковую скорость газов. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

№	W_1-1000	W_2-380	W_3-630	W_4-260	$z_{\text{д}}$
1	29,9	29,9	29,9	29,9	479,211
2	30,0	30,0	30,0	30,0	479,192
3	30,1	30,1	30,1	30,1	479,198

В табл. 1: W_1-1000 – скорость газов в стволе № 1 при расходе $1000 \text{ м}^3/\text{с}$; в остальных стволах аналогично; z_d – суммарные дисконтированные затраты, млн руб. Как видно из табл. 1, при скорости газов в стволах $30,0 \text{ м/с}$ эти затраты минимальны и составляют $479,192$ млн руб.

Далее изменяем скорость газов в стволе № 1 таким образом, чтобы получить уменьшение суммарных дисконтированных затрат. Результаты расчетов в табл. 2.

Путем увеличения скорости газов в стволе № 1 с $30,0$ до $30,3 \text{ м/с}$ суммарные дисконтированные затраты уменьшились с $479,192$ до $479,169$ млн руб. В табл. 3 приведены основные расчетные параметры работы дымовой трубы.

По наибольшему стволу – диаметр оболочки рассчитывается так, как если бы все стволы были одинакового и наибольшего из всех стволов размера.

Изменение режима работы стволов приведено в табл. 4.

Высокие дымовые трубы, через которые выбрасываются горячие дымовые газы, создают высокое разрежение в газоходах перед трубой, что позволяет частично компенсиро-

Таблица 2

Table 2

№	W_1-1000	W_2-380	W_3-630	W_4-260	z_d
1	29,9	29,9	29,9	29,9	479,170
2	30,3	30,0	30,0	30,0	479,169
3	30,1	30,1	30,1	30,1	479,172

Таблица 3

Table 3

№	Параметр	По расчету		По наибольшему стволу	
		было	стало	было	стало
1	Высота дымовой трубы, м	297,4	297,2	297,4	297,2
2	Внутренний диаметр оболочки, м	15,29	15,27	19,42	19,35
3	Внутреннее пространство, м	1,04 x 5,31	1,06 x 5,29	3,99 x 3,99	3,98 x 3,98
4	Суммарные дисконтированные затраты, млн руб.	479,192	479,162	530,174	529,487
5	Трудовые затраты на оболочку, млн руб.	83,157	83,003	95,990	95,668
6	Стоимость ж/б оболочки, млн руб.	241,825	241,376	279,143	278,206
7	Трудовые затраты на фундамент, млн руб.	3,846	3,838	4,283	4,269
8	Стоимость фундамента, млн руб.	94,857	94,674	105,637	105,314
9	Трудовые затраты на монтаж стволов, млн руб.	44,789	44,689	44,789	44,689
10	Стоимость стволов, млн руб.	151,785	151,446	151,785	151,446
11	Трудовые затраты суммарные, млн руб.	131,792	131,530	145,061	144,626
12	Стоимость трубы, млн руб.	488,468	487,497	536,564	534,966

Таблица 4

Table 4

№	Параметр	Ствол № 1		Ствол № 2		Ствол № 3		Ствол № 4	
		было	стало	было	стало	было	стало	было	стало
1	Диаметр ствола, м	6,51	6,48	4,02	4,02	5,17	5,17	3,32	3,32
2	Потери на трение, Па	220,6	226,3	403,8	403,6	294,4	294,3	511,9	511,6
3	Потери на местные сопротивления, Па	38,9	39,7	38,9	38,9	38,9	38,9	38,9	38,9
4	Потери с выходной скоростью, Па	389,3	397,2	389,3	389,3	389,3	389,3	389,3	389,3
5	Самотяга стволов, Па	990,7	990,2	990,7	990,2	990,7	990,2	990,7	990,2
6	Разрежение внизу ствола, Па	341,8	327,0	158,6	158,3	268,0	267,6	50,5	50,2
7	Экономия мощности, кВт	498,3	476,6	87,9	87,7	246,1	245,8	19,1	19,0

вать затраты электроэнергии на транспорт по тракту дымовых газов от котла до дымовой трубы.

Как видно из табл. 4, наибольшие изменения режима работы имеют место в стволе № 1, в котором произошло увеличение скорости газов. Это в первую очередь касается потерь на трение, где потери увеличились. За счет увеличения скорости газов в стволе № 1 снизилась необходимая высота дымовой трубы. За счет этого потери на трение в остальных стволах несколько уменьшились. Потери на местные сопротивления в стволе № 1 увеличились, в остальных стволах остались без изменения. Потери с выходной скоростью в стволе № 1 увеличились, в остальных стволах остались без изменения. Самотяга за счет уменьшения высоты дымовой трубы во всех стволах снизилась. Разрежение внизу во всех стволах уменьшилось. Наибольшее снижение имеет место в стволе № 1 как за счет уменьшения высоты трубы, так и за счет увеличения потерь. В остальных стволах разрежение уменьшилось только из-за снижения высоты дымовой трубы. Экономия мощности на всех стволах тоже уменьшилась по тем же причинам, что и разрежение внизу стволов.

Суммарная экономия мощности трубой была: $\Delta N_{\text{тр}} = 851,4$ кВт; стала $\Delta N_{\text{тр}} = 829,2$ кВт. Эффект от экономии мощности трубой был: И = 4,789 млн руб.: стал И = 4,664 млн руб.

Как видно из сопоставления, диаметр ствола № 1 и высота трубы уменьшились, что привело к уменьшению диаметра оболочки и ее стоимости. Снизилась также стоимость фундамента и стволов. В результате стоимость трубы снизилась на $488,468 - 487,497 = 0,971$ млн руб.

Однако при этом увеличились издержки из-за того, что возросли потери на трение в стволе № 1, хотя в остальных стволах из-за снижения высоты дымовой трубы они немного уменьшились. Увеличились потери с выходной скоростью в стволе № 1. Немного уменьшилась самотяга в стволах. Уменьшилось разрежение внизу ствола № 1 за счет увеличения потерь напора и снижения самотяги, а также и в остальных за счет снижения самотяги. В основном из-за снижения разрежения в стволе № 1 уменьшилась экономия мощности дымовой трубой на $851,4 - 829,2 = 22,2$ кВт или на $4,789 - 4,664 = 0,125$ млн руб. за первый год.

Далее изменяем скорость газов в стволе № 2 таким образом, чтобы получить уменьшение суммарных дисконтированных затрат. Результаты расчетов в табл. 5.

Путем увеличения скорости газов в стволе № 2 с 30,0 до 30,3 м/с суммарные дисконтированные затраты уменьшились с 479,169 млн руб. до 479,158 млн руб.

Далее изменяем скорость газов в стволе № 3 таким образом, чтобы получить дальнейшее уменьшение суммарных дисконтированных затрат. Результаты расчетов в табл. 6.

В данном случае для уменьшения суммарных дисконтированных затрат скорость газов в стволе № 3 пришлось снизить с 30,0 до 29,4 м/с. Суммарные дисконтированные затраты при этом уменьшились с 479,158 млн руб. до 479,071 млн руб.

Далее изменяем скорость газов в стволе № 3 таким образом, чтобы получить уменьшение суммарных дисконтированных затрат. Результаты расчетов в табл. 7.

Из табл. 7 видим, что скорость газов в стволе № 4 $W_4 = 30,0$ м/с менять не нужно, она и так является оптимальной.

Еще раз уточняем скорости газов в стволах уже с учетом полученных изменений. Уточняем скорость газов в стволе № 1, табл. 8.

Таблица 5

Table 5

№	W_1-1000	W_2-380	W_3-630	W_4-260	$z_d,$
1	30,3	30,2	30,0	30,0	479,160
2	30,3	30,3	30,0	30,0	479,158
3	30,3	30,4	30,0	30,0	479,158
4	30,3	30,5	30,0	30,0	479,159

Таблица 6

Table 6

№	W_1-1000	W_2-380	W_3-630	W_4-260	$z_d,$
1	30,3	30,3	29,3	30,0	479,072
2	30,3	30,3	29,4	30,0	479,071
3	30,3	30,3	29,5	30,0	479,073

Таблица 7

Table 7

№	W_1-1000	W_2-380	W_3-630	W_4-260	$z_d,$
1	30,3	30,3	29,4	29,7	479,073
2	30,3	30,3	29,4	29,8	479,071
3	30,3	30,3	29,4	30,0	479,071
4	30,3	30,3	29,4	30,1	479,073

Увеличение скорости газов в стволе № 1 с 30,3 до 30,4 м/с позволяет снизить суммарные затраты с 479,071 до 479,066 млн руб.

Далее уточняем скорости газов в стволах №№ 2, 3, 4. Получаем табл. 9.

Теперь сравним вариант табл. 1 с оптимально одинаковыми скоростями в стволах с табл. 9 с оптимально различными скоростями газов в стволах, табл. 10.

Стоимость дымовой трубы после оптимизации скоростей по стволам снизилась с $K_{тр} = 488,468$ до 488,324 млн руб., т.е. на 0,144 млн руб. Экономия средств на эксплуатации в первый год тоже снизилась, но немного: от $I = 4,789$ до 4,787 млн руб., т.е. на 0,002 млн руб. Таким образом, экономический эффект за первый год эксплуатации от перераспределения скоростей по стволам составляет $144 - 2 = 142$ тыс. руб.

Но если оболочку рассчитывать по действующей методике, т.е. по размеру наибольшего ствола, то стоимость трубы увеличивается с 488,324 млн руб. до $K_{тр} = 536,564$ млн руб., или на 48,24 млн руб., что составляет 9,0 % с перерасходом средств на $\frac{1}{3}$ в первый год $I = 4,787$ млн руб./год.

Таблица 8

Table 8

№	W_1-1000	W_2-380	W_3-630	W_4-260	$z_{д}$
1	30,2	30,3	29,4	30,0	479,084
2	30,3	30,3	29,4	30,0	479,071
3	30,4	30,3	29,4	30,0	479,066
4	30,5	30,3	29,4	30,0	479,072

Таблица 9

Table 9

№	W_1-1000	W_2-380	W_3-630	W_4-260	$z_{д}$
1	30,4	30,4	29,2	29,7	479,061
2	30,4	30,4	29,2	29,8	479,059
3	30,4	30,4	29,2	29,9	479,059
4	30,4	30,4	29,2	30,0	479,060

Таблица 10

Table 10

№	W_1-1000	W_2-380	W_3-630	W_4-260	$z_{д}$
1	30,0	30,0	30,0	30,0	479,192
2	30,4	30,4	29,2	29,9	479,059

Если же сравнивать эффективность перераспределения скоростей по расчетным затратам по предлагаемой методике, то снижение составит всего 0,028 %. Отсюда можно сделать вывод, что, если при оптимально одинаковых скоростях диаметры стволов различаются не более чем в $(30,4/29,2)^{0,5} = 1,02$ раза, скорости газов в этих стволах можно не уточнять, а стволы принимать одинакового диаметра по условиям унификации. Если же диаметры отличаются значительно, то уточнять скорости газов нужно, так как все равно стволы нужно изготавливать различных диаметров, и такое их уточнение дает пусть не очень большой, но все же эффект.

Влияние стоимости трубы. Повторим расчеты для низких труб. Для этого выбросы мазутных котлов уменьшаем в два раза. Концентрацию вредных веществ в пересчете на оксиды азота, которая может быть создана этой дымовой трубой, увеличиваем с 0,07 до $C_{тр} = 0,12$ мг/м³.

Последовательность расчета повторим как в предыдущем варианте. Тогда исходные данные: $V_1 = 1000$ м³/с; $V_2 = 380$ м³/с; $V_3 = 630$ м³/с; $V_4 = 260$ м³/с. Температура газов по стволам: $t_{1-4} = 135$ °С. Выбросы по стволам в пересчете на оксиды азота: $M_1 = 650$ г/с; $M_2 = 250$ г/с; $M_3 = 425$ г/с; $M_4 = 40$ г/с. Концентрация вредных веществ в пересчете на оксиды азота, которая может быть создана этой дымовой трубой, $C_{тр} = 0,07$ мг/м³.

Другие исходные данные остаются прежние.

Сначала ищем оптимальную одинаковую скорость газов, табл. 11.

Оптимальная одинаковая скорость газов снизилась с 30,0 до 22,9 м/с. Отсюда следует, что чем больше стоит труба, тем большие скорости газов в стволах следует принимать. Изменение режима работы трубы по сравнению с предыдущим вариантом приведено в табл. 12.

Изменение режима работы стволов приведено в табл. 13.

Суммарная экономия мощности трубой была: $\Delta N_{тр} = 851,4$ кВт, стала $\Delta N_{тр} = 574,3$ кВт. Эффект от экономии мощности трубой было: И = 4,789 млн руб., стало И = 3,230 млн руб.

Суммарные дисконтированные затраты по предлагаемой методике оказались на 15,182 млн руб. меньше, чем по действующей, что составляет 8,3 %, а стоимость трубы снизилась на 14,323 млн руб., что составляет 7,3 %.

Эффективность применения данной методики для дорогих дымовых труб несколько выше, чем для низких, для которых снижение стоимости трубы в данных примерах составляет 9,0 и 7,3 % соответственно.

Далее проводим оптимизацию скоростей по стволам, табл. 14.

За счет оптимизации скоростей газов по стволам суммарные дисконтированные затраты снизились с 167.395 до 167.305 млн руб. или на 0,05 %, а стоимость трубы уменьшилась с $C_{тр} = 182,472$ до 182.117 млн руб., или на 0,19 %.

Таблица 11

Table 11

№	W_1-1000	W_2-380	W_3-630	W_4-260	$z_d,$
1	22,8	22,8	22,8	22,8	167,407
2	22,9	22,9	22,9	22,9	167,395
3	23,0	23,0	23,0	23,0	167,418

Таблица 12

Table 12

№	Параметр	По расчету		По наибольшему стволу	
		было	стало	было	стало
1	Высота дымовой трубы, м	297,4	149,8	297,4	149,8
2	Внутренний диаметр оболочки, м	15,29	16,95	19,42	21,70
3	Внутреннее пространство, м	1,04 x 5,31	1,01 x 5,88	4,00 x 4,00	4,39 x 4,39
4	Суммарные дисконтированные затраты, млн руб.	479,192	167,395	530,174	182,577
5	Трудовые затраты на оболочку, млн руб.	83,157	25,866	95,990	29,993
6	Стоимость ж/б оболочки, млн руб.	241,825	75,218	279,143	87,222
7	Трудовые затраты на фундамент, млн руб.	3,846	0,800	4,283	0,894
8	Стоимость фундамента, млн руб.	94,857	19,739	105,637	22,058
9	Трудовые затраты на монтаж стволов, млн руб.	44,789	25,824	44,789	25,824
10	Стоимость стволов, млн руб.	151,785	87,515	151,785	87,515
11	Трудовые затраты суммарные, млн руб.	131,792	52,361	145,061	56,712
12	Стоимость трубы, млн руб.	488,468	182,472	536,564	196,795

Таблица 13

Table 13

№	Параметр	Ствол № 1		Ствол № 2		Ствол № 3		Ствол № 4	
		было	стало	было	стало	было	стало	было	стало
1	Диаметр ствола, м	6,51	7,46	4,02	4,60	5,17	5,92	3,32	3,80
	Скорость газов в стволах, м/с	30,0	22,9	30,0	22,9	30,0	22,9	30,0	22,9
2	Потери на трение, Па	220,6	54,9	403,8	100,5	294,4	73,3	511,9	127,4
3	Потери на местные сопротивления, Па	38,9	22,7	38,9	22,7	38,9	22,7	38,9	22,7
4	Потери с выходной скоростью, Па	389,3	226,9	389,3	226,9	389,3	226,9	389,3	226,9
5	Самотяга стволов, Па	990,7	499,0	990,7	499,0	990,7	499,0	990,7	499,0
6	Разрежение внизу ствола, Па	341,8	194,6	158,6	149,0	268,0	176,2	50,5	122,1
7	Экономия мощности, кВт	498,3	283,7	87,9	82,5	246,1	161,8	19,1	46,3

Таблица 14

Table 14

№	W_1-1000	W_2-380	W_3-630	W_4-260	z_d
1	22,7	23,5	22,4	23,9	167,3072
2	22,7	23,5	22,5	23,9	167,305
3	22,7	23,5	22,6	23,9	167,313

Выводы, сделанные на примере дорогой трубы, сохраняют свое значение и для менее дорогих дымовых труб.

Влияние температуры газов. Принимаем, что через каждый ствол проходит одинаковый расход с одинаковым выбросом вредности, но с разной температурой.

$V_{1-4} = 380 \text{ м}^3/\text{с}$; $M_{1-4} = 500 \text{ г/с}$; $t_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_2 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_3 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_4 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$. Сохраняем $C_{\text{тр}} = 0,12 \text{ мг/м}^3$.

Сначала найдем оптимальную одинаковую скорость газов в стволах, табл. 15.

В табл. 15: W_{1-100} – скорость газов в стволе № 1 при температуре $100 \text{ }^\circ\text{C}$; в остальных стволах аналогично; z_d – суммарные дисконтированные затраты, млн руб. Как видно из табл. 15, при скорости газов в стволах $27,9 \text{ м/с}$ эти затраты минимальны и составляют 221.5477 млн руб.

Далее уточняем скорости газов по каждому стволу, табл. 16.

Уточнение скоростей по отдельным стволам позволяет уменьшить суммарные дисконтированные затраты с 221.5477 до 221.3301 млн руб., или на $0,1 \%$. Увеличилась стоимость дымовой трубы с 231.107 до 231.199 млн руб., или на $0,005 \%$, но увеличилась, и экономия мощности с $516,938$ до $523,891$ кВт, или на $1,3 \%$, и снизились эксплуатационные издержки на $0,039$ млн руб./год, или на $0,013 \%$.

Итак, оптимальное распределение скоростей газов:

$W_1 = 26,6 \text{ м/с}$; $d_1 = 4,265 \text{ м}$;

$W_2 = 27,7 \text{ м/с}$; $d_2 = 4,179 \text{ м}$;

$W_3 = 28,2 \text{ м/с}$; $d_3 = 4,142 \text{ м}$;

$W_4 = 29,2 \text{ м/с}$; $d_4 = 4,078 \text{ м}$.

При одинаковых скоростях $d_{1-4} = 4,164 \text{ м}$.

Отношение максимальной скорости газов в стволах к минимальной составило $29,2/26,6 = 1,1$, а отношение диаметров $1,05$.

Таблица 15

Table 15

№	W_{1-100}	W_{2-150}	W_{3-200}	W_{4-250}	z_d
1	27,8	27,8	27,8	27,8	221,5497
2	27,9	27,9	27,9	27,9	221,5477
3	28,0	28,0	28,0	28,0	221,5584

Таблица 16

Table 16

№	W_{1-100}	W_{2-150}	W_{3-200}	W_{4-250}	z_d
1	26,6	27,7	28,2	29,1	221,33112
2	26,6	27,7	28,2	29,2	221,33010
3	26,6	27,7	28,2	29,3	221,33011

В связи с тем что снижение суммарных дисконтированных затрат невелико, в данном случае можно ограничиться равномерным распределением скоростей по стволам в целях унификации диаметров и выполнить все стволы диаметром $d_{1-4} = 4,164$ м.

Таким образом, и в этом случае подтверждается вывод о том, что оптимизация скоростей газов по стволам целесообразна только в том случае, если предполагается выполнение нескольких типоразмеров стволов.

Влияние расходов и температуры газов. Наиболее распространенным случаем, когда следует провести оптимизацию скоростей газов по стволам, является подключение на три ствола энергетических котлов, а на 4-й – пиковых.

Рассмотрим вариант: на 3 ствола подключены по 2 котла ТГМЕ-464 на мазуте, а на 4-й два водогрейных котла КВГМ-100 на газе.

$V_{1-3} = 380$ м³/с; $M_{1-3} = 500$ г/с; $t_{1-3} = 135$ °С; $V_4 = 140$ м³/с; $M_4 = 10$ г/с; $t_4 = 160$ °С. Сохраняем $C_{тр} = 0,07$ мг/м³.

Сначала найдем оптимальную одинаковую скорость газов в стволах, табл. 17.

В табл. 17: W_{1-380} – скорость газов в стволе № 1 при расходе газов 380 м³/с, остальные аналогично. 100 °С; в остальных стволах аналогично; z_d – суммарные дисконтированные затраты, млн руб. Как видно из табл. 17, при скорости газов в стволах 30,3 м/с эти затраты минимальны и составляют 312,212 млн руб.

В результате оптимизации скоростей газов по стволам получаем табл. 18.

В табл. 19 приведено сопоставление основных показателей при предлагаемом способе проектирования (стало) с проектированием по схеме рис. 1 (было).

Как видно из табл. 19, предлагаемый более точный способ проектирования рассмотренного варианта позволяет уменьшить суммарные приведенные затраты на 2,4 %, а стоимость трубы снизить на 7,29 млн руб., что тоже составляет 2,4 %.

Таблица 17

Table 17

№	W_{1-380}	W_{2-380}	W_{3-380}	W_{4-140}	z_d
1	30,2	30,2	30,2	30,2	312,21464
2	30,3	30,3	30,3	30,3	312,21192
3	30,4	30,4	30,4	30,4	312,21268

Таблица 18

Table 18

№	W_{1-380}	W_{2-380}	W_{3-380}	W_{4-140}	z_d
1	30,3	30,3	30,3	29,8	312,20276
2	30,4	30,4	30,4	29,8	312,20057
3	30,5	30,5	30,5	29,8	312,20144

Таблица 19

Table 19

№	Параметр	Было	Стало
1	Суммарные приведенные затраты, млн руб.	319,846	312,20057
2	Высота трубы, м	242,210	242,175
3	Стоимость трубы, млн руб.	303,342	296,050
4	Внутренний диаметр ж/б оболочки, м	13,344	12,535
5	Экономия на издержках, млн руб.	0,211	0,200
6	Экономия мощности, кВт.	37,449	35,577
7	Диаметры стволов № 1–3, м	3,996	3,989
9	Диаметр ствола № 4, м	2,425	2,446
10	Внутреннее пространство, м	2,95 x 3,74	1,90 x 3,61

На выбор скорости газов в стволах влияют исходные данные, в частности, довольно сильное влияние оказывает себестоимость производства электроэнергии. Если себестоимость в данном примере увеличить с 1,25 до 2,0 руб. / кВт · час, то скорости газов в стволах 1–3 нужно будет снизить с 30,4 до 25,1 м/с, а в стволе № 4 с 29,8 до 24,9 м/с.

Влияние остальных исходных данных на оптимальные скорости газов в стволах описано в [3].

Выводы

1. Найдено аналитическое решение для определения минимально возможного внутреннего диаметра наружной ж/б оболочки для 4-ствольной дымовой трубы для стволов произвольного диаметра при заданных зазорах между стволами и между стволами и оболочкой и с расчетом свободного пространства для размещения лифта и лестничной клетки.

2. Проведен анализ современных уровней цен на материалы и услуги, необходимые при сооружении дымовых труб со стволами из металла и из кислотоупорных бетонов.

3. Показано, что при различных расходах и температурах газов в стволах 4-ствольной трубы скорости газов в них следует принимать тоже разными. Показаны также условия, при которых в целях унификации стволов этого можно не делать.

4. Приведен анализ влияния различных объемных расходов и различных температур газов по стволам на скорости газов в стволах как при раздельном, так и при совместном действии.

5. Показано, что расчет диаметра оболочки по предлагаемой методике с оптимизацией скоростей газов по каждому стволу обеспечивает более точное проектирование и снижение капитальных затрат и эксплуатационных издержек на величину от 2,4 до 9 %.

Список литературы / References

- [1] Мирсалихов К.М., Грибков А.М., Чичирова Н.Д. Аналитический обзор методик выбора оптимальных параметров дымовых труб. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*, 2021, 23(1), 131–145. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-131-145> [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 (in Rus.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-131-145>].

[2] Рихтер Л.А., Волков Э.П., Гаврилов Е.И., Лебедев В.Г., Прохоров В.Б. Определение стоимости дымовых труб ТЭС и оптимизация скоростей газов в газоотводящем стволе. *Теплоэнергетика*. 1975, № 4. 12–16 [Richter L. A., Volkov E. P., Gavrilov E. I., Lebedev V. G., Prokhorov V. B. Determination of the cost of chimneys of thermal power plants and optimization of gas velocities in the exhaust shaft. *Thermal Engineering*. 1975, No. 4. 12–16 (in Rus.)].

[3] Zroichikov N. A., Gribkov A. M., Saparov M. I., Mirsalikhov K. M. A General-Purpose Procedure for the Calculation of the Optimum Gas Velocity in Gas Exhaust Ducts of Stacks at Thermal Power Stations, *Thermal Engineering*, 2020, 67(3), 157–164. https://doi.org/10.1134/S_0040601520030064

[4] Zroichikov N. A., Gribkov A. M., Saparov M. I., Mirsalikhov K. M. Analysis of the Benefits of TPP's Three-Barrel Smokestacks. *Thermal Engineering*, 2020, 67(9), 610–616. https://doi.org/10.1134/S_0040601520090116

[5] Рихтер Л.А. *Тепловые электрические станции и защита атмосферы*, М., Энергия, 1975. 312 [Richter L. A. Thermal power stations and atmosphere protection, Moscow, Energia, 1975, 312 (in Rus.)].

[6] Википедия. Вписанный четырехугольник. Формула Перамешвары. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Вписанный_четырёхугольник – Заглавие с экрана. [Wikipedia. Cyclic quadrilateral. Parameshvara's circumradius formula [Electronic resource]– Access: https://en.wikipedia.org/wiki/Cyclic_quadrilateral