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

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОСТВОЛЬНЫХ ДЫМОВЫХ ТРУБ

© 2025 г. А. М. Грибков^а, *, Н. А. Зройчиков^б, **, М. И. Сапаров^с, ***

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

^бНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

^сНекоммерческое партнерство “Научно-технический совет Единой энергетической системы”,
проезд Завода “Серп и Молот”, д. 10, Москва, 111250 Россия

*e-mail: Gribkovalmi@mail.ru

**e-mail: ZroychikovNA@mpei.ru

***e-mail: saparov.mikhail51@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.08.2024 г.

После доработки 07.02.2025 г.

Принята к публикации 28.02.2025 г.

Наиболее распространенным типом многоствольных дымовых труб в России являются трубы со стальными стволами, установленными внутри железобетонной оболочки, которая защищена от воздействия дымовых газов и при правильной эксплуатации может практически неограниченное время выполнять свои функции. Основные повреждения дымовой трубы происходят вследствие коррозии стальных стволов, особенно если в дымовых газах содержатся оксиды серы. Рассмотрена возможность уменьшить коррозию стальных стволов дымовой трубы путем изменения режимов их эксплуатации. Предложен новый метод повышения надежности и эффективности работы многоствольных дымовых труб посредством исключения стояночной коррозии стволов и увеличения вклада дымовой трубы в разгрузку дымососов благодаря оптимальному использованию самотяги стволов. Рассмотрены основные методы, применяемые для уменьшения коррозии металлических газоотводящих стволов многоствольных дымовых труб. Предложены новое конструктивное исполнение цокольной части металлических стволов, которое во время эксплуатации котельного оборудования позволяет перераспределять потоки газов по стволам дымовой трубы, а также режимы работы дымовой трубы, при которых исключается стояночная коррозия стальных стволов и снижается нагрузка дымососов за счет увеличения суммарной самотяги стволов. Разработана компьютерная программа для расчета таких режимов. Проведены варианты расчетов показателей режимов работы дымовой трубы с учетом реальных условий эксплуатации. Установлено, что расход электроэнергии на привод дымососов работающих котлов при использовании самотяги ствола, от которого отключены котлы, уменьшается на 5–10%, при этом исключается стояночная коррозия стальных стволов дымовой трубы.

Ключевые слова: многоствольные дымовые трубы, коррозия металлических стволов, цоколь ствола, самотяга ствола дымовой трубы, дымосос, собственные нужды котла, варианты расчетов режимов

DOI: 10.56304/S0040363625700924

При сжигании высокосернистого топлива скорость коррозии поверхностей нагрева котлов, газоходов, включая дымовую трубу, составляет более 1 мм/год. Этот процесс влияет на продолжительность вынужденных остановов котлов, увеличение затрат на ремонтно-восстановительные работы, экономичность энергоустановок [1].

Решение проблемы коррозии многоствольных дымовых труб имеет особое значение. Главный эксплуатационный дефект таких труб — коррозионный износ внутренних стенок металлических

стволов. Верхние части стволов подвергаются коррозии, как правило, в большей степени, чем нижние. При этом весьма важным является состояние наружной теплоизоляции ствола. Интенсивность коррозионного износа зависит от марок использованных сталей, агрессивности и влагосодержания дымовых газов, их температуры и других эксплуатационных факторов.

Стояночная коррозия металлических стволов дымовых труб связана с графиком нагрузок электростанции. В различных режимах останова кот-

ла металлический ствол трубы подпадает под воздействие атмосферного воздуха. Происходящая при этом коррозия является самым распространенным видом разрушения металла. Ей подвергаются все элементы дымовой трубы, изготовленные из углеродистых и низколегированных сталей. Коррозия, как правило, проявляется в виде язв диаметром до 5–10 мм, зачастую покрытых слоем ржавчины.

Главное внимание в статье уделено зависимости процессов коррозии от режимных и конструктивных параметров, недопущению стояночной коррозии металлических стволов дымовых труб и снижению расхода электроэнергии на собственные нужды электростанции.

Многоствольные дымовые трубы используют главным образом на ТЭЦ [2]. На крупнейших электростанциях ПАО «Мосэнерго»: ТЭЦ-23, ТЭЦ-25, ТЭЦ-26 — установлены многоствольные дымовые трубы. Практически на всех ТЭЦ, работающих на природном газе, в качестве резервного топлива применяется мазут, в том числе высокосернистый. Так как отпуск тепла обычно не резервируется, эксплуатационная надежность газоотводящих труб ТЭЦ должна быть весьма высокой благодаря возможности выполнять ремонты одного ствола при функционировании остальных. Разработано немало конструкций многоствольных дымовых труб, имеющих стволы одинаковых диаметров [3]. Однако, если к стволам подключают котлы различной мощности, например наряду с энергетическими подсоединяют и пиковые водогрейные котлы, возможно выполнение многоствольной дымовой трубы со стволами разных диаметров. На выбор диаметра стволов влияет также температура уходящих газов [4].

Значительное воздействие на интенсивность серно-кислотной коррозии стволов оказывает температурный режим работы ствола, а именно разность температур газ — стенка [5]. Даже незначительное колебание температуры газов приводит к существенному изменению скорости серно-кислотной коррозии.

Однако до настоящего времени вопрос защиты стальных стволов дымовой трубы от стояночной коррозии не решен. В процессе эксплуатации на внутренних поверхностях газоотводящих стволов дымовых труб образуются гигроскопичные и агрессивные налеты сажи, золы, конденсата серной кислоты и продуктов коррозии. Через 2–4 ч после останова подключенных котлов газоотводящий ствол остывает и слой налета начинает интенсивно впитывать влагу, в результате чего образуется раствор серной кислоты, разрушающий ствол. Применяемые схемы сушки ствола горя-

чим воздухом малоэффективны из-за сложностей организации подвода в ствол горячего воздуха с необходимым его расходом [6]. Известно, что скорость низкотемпературной (стояночной) коррозии на остановленном котле примерно вдвое выше скорости коррозии в период эксплуатации [7].

ОПИСАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО РЕШЕНИЯ

Поставленная задача может быть решена путем создания такой конструкции цокольной части стволов дымовой трубы, при которой цоколи всех стволов соединяются перепускными газоходами (рис. 1). На перепускных газоходах устанавливаются по два отключающих шибера со стороны каждого из цоколей. Между этими шиберами располагаются люки на верхней и нижней стенках перепускного газохода.

Если по условиям обслуживания не требуется отключение какого-либо ствола, при всех режимах работы трубы шибера остаются открытыми и во всех стволах устанавливается одинаковое разрежение. Если к каждому стволу подключено по одному одинаковому котлу и один из котлов остановлен, то дымовые газы от него перестают поступать в соответствующий ствол. Скорость газов в этом стволе начинает быстро падать, в результате чего потери на трение и местные сопротивления уменьшаются, но температура газов остается еще прежней. Разрежение в цоколе этого ствола увеличивается, и в него поступают дымовые газы из соседних стволов. В результате скорости газов во всех стволах становятся

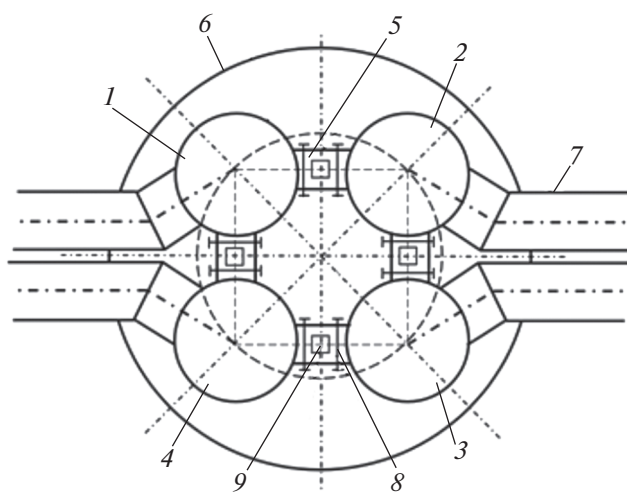


Рис. 1. Поперечное сечение цокольной части четырехствольной дымовой трубы.

1–4 — цоколь ствола; 5 — перепускной газоход; 6 — железобетонная оболочка; 7 — внешний газоход; 8 — отключающий шибер; 9 — люк

ниже исходных, гидравлические потери в них уменьшаются, а дымососы работающих котлов будут разгружены из-за увеличившейся тяги дымовой трубы.

Кроме этого, ствол при отключении подсоединенных к нему котлов остается в горячем состоянии, внутри него находятся дымовые газы, содержание кислорода в которых составляет 2–4% и отсутствует конденсация паров воды. Все это практически предотвращает возможность коррозии данного ствола. Очевидно, что расходы на ремонт стволов при таком режиме работы трубы должны будут значительно уменьшиться.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА

Для количественной оценки эффективности предлагаемого решения была создана компьютерная программа, позволяющая рассчитать переходные процессы с учетом как технических, так и экономических показателей. В основу этой программы заложено условие равенства между разницей статических давлений в соседних стволах и потерями на местные сопротивления задаваемого перетока газов по перепускному газоходу между этими стволами. Чтобы решить эту задачу, необходимо предварительно задать площадь поперечного сечения перепускного газохода.

Скорость газов в перепускном газоходу $w_{\text{пер}}$, м/с, можно вычислить по формуле

$$w_{\text{пер}} = V_{\text{пер}} / f_{\text{пер}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{пер}}$ — переток газа, м³/с; $f_{\text{пер}}$ — площадь поперечного сечения газохода, м².

Перепад давления $\Delta p_{\text{пер}}$, Па, необходимый для организации перетока газа, рассчитывали по выражению

$$\Delta p_{\text{пер}} = \zeta_{\text{пер}} \rho_{\text{г}} \frac{w_{\text{пер}}^2}{2}, \quad (2)$$

где $\zeta_{\text{пер}}$ — коэффициент сопротивления перепускного газохода; $\rho_{\text{г}}$ — плотность газов, кг/м³.

Плотность газов в перепускных газоходах вычисляли по формуле

$$\rho_{\text{г}} = 1.293 \frac{273}{273 + t_{\text{г}}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{г}}$ — температура газов в газоходу, из которого осуществляется переток, °С.

Статическое давление в цоколях дымовой трубы на уровне перепускных газоходов в стволах Δh_i , Па, определяли по формуле

$$\Delta h_i = \Delta h_{\text{тр}} + \Delta h_{\text{м.с}} - \Delta h_{\text{с}}, \quad (4)$$

где $\Delta h_{\text{тр}}$ — потери на трение в стволах, Па; $\Delta h_{\text{м.с}}$ — потери на местные сопротивления в стволах, Па; $\Delta h_{\text{с}}$ — самотяга в стволах, Па; i — номер ствола.

Потери на трение вычисляли по выражению

$$\Delta h_{\text{тр}} = \lambda_i \frac{H}{d_i} h_{\text{д}}, \quad (5)$$

где λ_i — коэффициент трения в стволах; H — высота дымовой трубы, м; d_i — внутренний диаметр стволов, м; $h_{\text{д}}$ — динамический напор (давление) дымовых газов в стволах, Па.

Коэффициенты трения рассчитывали по формуле

$$\lambda_i = 0.114 \sqrt{\frac{\Delta}{d_i} + \frac{68}{\text{Re}_i}}, \quad (6)$$

где Re_i — число Рейнольдса потока газов в стволах.

Динамический напор в стволах определяли по соотношению

$$h_{\text{д}} = \rho_{\text{г}} \frac{w_i^2}{2}, \quad (7)$$

где w_i — скорость газов в стволах, м/с; $\rho_{\text{г}}$ — плотность газов в стволах, кг/м³.

Плотность газов в стволах вычисляли так:

$$\rho_{\text{г}} = 1.293 \frac{273}{273 + t_{\text{г}}}, \quad (8)$$

где $t_{\text{г}}$ — температура газов в стволах, °С.

Скорость газов в стволах рассчитывали по формулам

$$w_1 = \frac{V_{1\text{н}} \pm V_{2-1} \pm V_{4-1}}{f_1}, \quad (9)$$

$$w_2 = \frac{V_{2\text{н}} \pm V_{1-2} \pm V_{3-2}}{f_2}, \quad (10)$$

$$w_3 = \frac{V_{3\text{н}} \pm V_{2-3} \pm V_{4-3}}{f_3}, \quad (11)$$

$$w_4 = \frac{V_{4\text{н}} \pm V_{1-4} \pm V_{3-4}}{f_4}, \quad (12)$$

где $V_{1\text{н}}$, $V_{2\text{н}}$, $V_{3\text{н}}$, $V_{4\text{н}}$ — начальные объемные расходы газов в стволах 1–4, м³/с; V_{2-1} , V_{4-1} — перетоки газов из стволов 2, 4 в ствол 1, м³/с; V_{1-2} , V_{3-2} — перетоки газов из стволов 1, 3 в ствол 2, м³/с; V_{2-3} , V_{4-3} — перетоки газов из стволов 2, 4 в ствол 3, м³/с; V_{1-4} , V_{3-4} — перетоки газов из стволов 1, 3 в ствол 4, м³/с; f_1 , f_2 , f_3 , f_4 — площадь поперечного сечения стволов, м².

Для расчета температуры дымовых газов в стволах использовали формулы

$$t_{\text{г}} = \frac{V_{1\text{н}} t_{1\text{н}} \pm V_{2-1} t_{2\text{н}} \pm V_{4-1} t_{4\text{н}}}{V_{1\text{н}} \pm V_{2-1} \pm V_{4-1}}, \quad (13)$$

$$t_{2г} = \frac{V_{2н}t_{2н} \pm V_{1-2}t_{1н} \pm V_{3-2}t_{3н}}{V_{2н} \pm V_{1-2} \pm V_{3-2}}; \quad (14)$$

$$t_{3г} = \frac{V_{3н}t_{3н} \pm V_{2-3}t_{2н} \pm V_{4-3}t_{4н}}{V_{3н} \pm V_{2-3} \pm V_{4-3}}; \quad (15)$$

$$t_{4г} = \frac{V_{4н}t_{4н} \pm V_{1-4}t_{1н} \pm V_{3-4}t_{3н}}{V_{4н} \pm V_{1-4} \pm V_{3-4}}; \quad (16)$$

где $t_{1н}$, $t_{2н}$, $t_{3н}$, $t_{4н}$ — начальная температура газов в стволах 1–4, °С.

Потери напора на местные сопротивления в стволах вычисляли по выражению

$$\Delta h_{м.с} = \sum \zeta_i h_{гд}, \quad (17)$$

где $\sum \zeta_i$ — суммарный коэффициент местных сопротивлений в стволах.

Суммарный коэффициент местных сопротивлений рассчитывали по формулам

$$\sum \zeta_1 = \frac{V_{1н}\zeta_{вх} + V_{2-1}\zeta_{пер} + V_{4-1}\zeta_{пер}}{V_{1н} + V_{2-1} + V_{4-1}}; \quad (18)$$

$$\sum \zeta_2 = \frac{V_{2н}\zeta_{вх} + V_{1-2}\zeta_{пер} + V_{3-2}\zeta_{пер}}{V_{2н} + V_{1-2} + V_{3-2}}; \quad (19)$$

$$\sum \zeta_3 = \frac{V_{3н}\zeta_{вх} + V_{2-3}\zeta_{пер} + V_{4-3}\zeta_{пер}}{V_{3н} + V_{2-3} + V_{4-3}}; \quad (20)$$

$$\sum \zeta_4 = \frac{V_{4н}\zeta_{вх} + V_{3-4}\zeta_{пер} + V_{1-4}\zeta_{пер}}{V_{4н} + V_{3-4} + V_{1-4}}; \quad (21)$$

где $\zeta_{вх}$, $\zeta_{пер}$ — коэффициент сопротивления на входе газов в ствол и перепускного газохода.

Для расчета самотяги стволов использовали выражение

$$h_{гс} = 9.81H(\rho_v - \rho_{гг}), \quad (22)$$

где ρ_v — плотность наружного воздуха.

После вычисления статических давлений определяют их разницу в стволах, между которыми происходит переток газов, и сравнивают ее с вычисленным заранее необходимым перепадом давления для осуществления перетока. Если полученный перепад статических давлений равен необходимому, вычисления заканчиваются.

При расчете разгрузки дымососа за счет самотяги ствола учитываются необходимый перепад давления $\Delta h_{гп}$, Па, для транспортировки дымовых газов и потери напора с выходной скоростью $\Delta h_{гв.с}$, Па ($\zeta_{вых} = 1.0$):

$$\Delta h_{гп} = \Delta h_{гтр} + \Delta h_{гм.с} + \Delta h_{гв.с} - \Delta h_{гс}. \quad (23)$$

Мощность самотяги ствола $N_{гс}$ вычисляли по формуле

$$N_{гс} = \frac{V_i \Delta h_{гп}}{\eta_{дв} \eta_{д}} \times 10^{-3}, \quad (24)$$

где V_i — объемный расход дымовых газов через ствол после установившихся перетечек, м³/с; $\eta_{дв}$, $\eta_{д}$ — коэффициент полезного действия двигателя и дымососа.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДЫМОВОЙ ТРУБЫ

Расчет показателей режимов работы дымовой трубы выполняли с учетом следующих условий.

При работе дымовой трубы в режиме I:

к каждому стволу четырехствольной дымовой трубы подключено по одному котлу П50-Р энергоблоков К-300;

высота трубы $H = 240$ м;

диаметр стволов от цоколя до устья $d_i = 4.5$ м;

площадь поперечного сечения перепускных газоходов $f = 6$ м²;

расход газов в каждом стволе $V_i = 420$ м³/с; температура дымовых газов в каждом стволе $t_i = 130^\circ\text{C}$;

коэффициент сопротивления перепускных газоходов $\zeta_{пер} = 1.0$;

потерями на трение в перепускных газоходах пренебрегали;

абсолютная шероховатость внутренней поверхности стволов $\Delta = 1.0$ мм;

коэффициент местного сопротивления поворота на входе газов из внешнего газохода в цоколь с учетом сопротивления перехода от сечения цоколя к сечению ствола $\zeta_{вх} = 0.6$;

температура атмосферного воздуха $t_v = 20^\circ\text{C}$;

режим работы стволов одинаков и на уровне перепускных газоходов разрежение в них тоже одинаковое $h_i = -369$ Па;

перетоки между стволами отсутствуют.

На рис. 2 показаны схемы перетоков газов между стволами.

В режиме II котел, подключенный к стволу I, был остановлен, при этом суммарный расход газов составил 1260 м³/с (см. таблицу). Для этого режима можно принять следующие значения перетоков, м³/с: $V_{2-1} = 101.5$, $V_{3-2} = 28.5$, $V_{3-4} = 28.5$, $V_{4-1} = 101.5$.

Для принятых условий разность статических давлений между стволами в газоходах Г1 и Г4

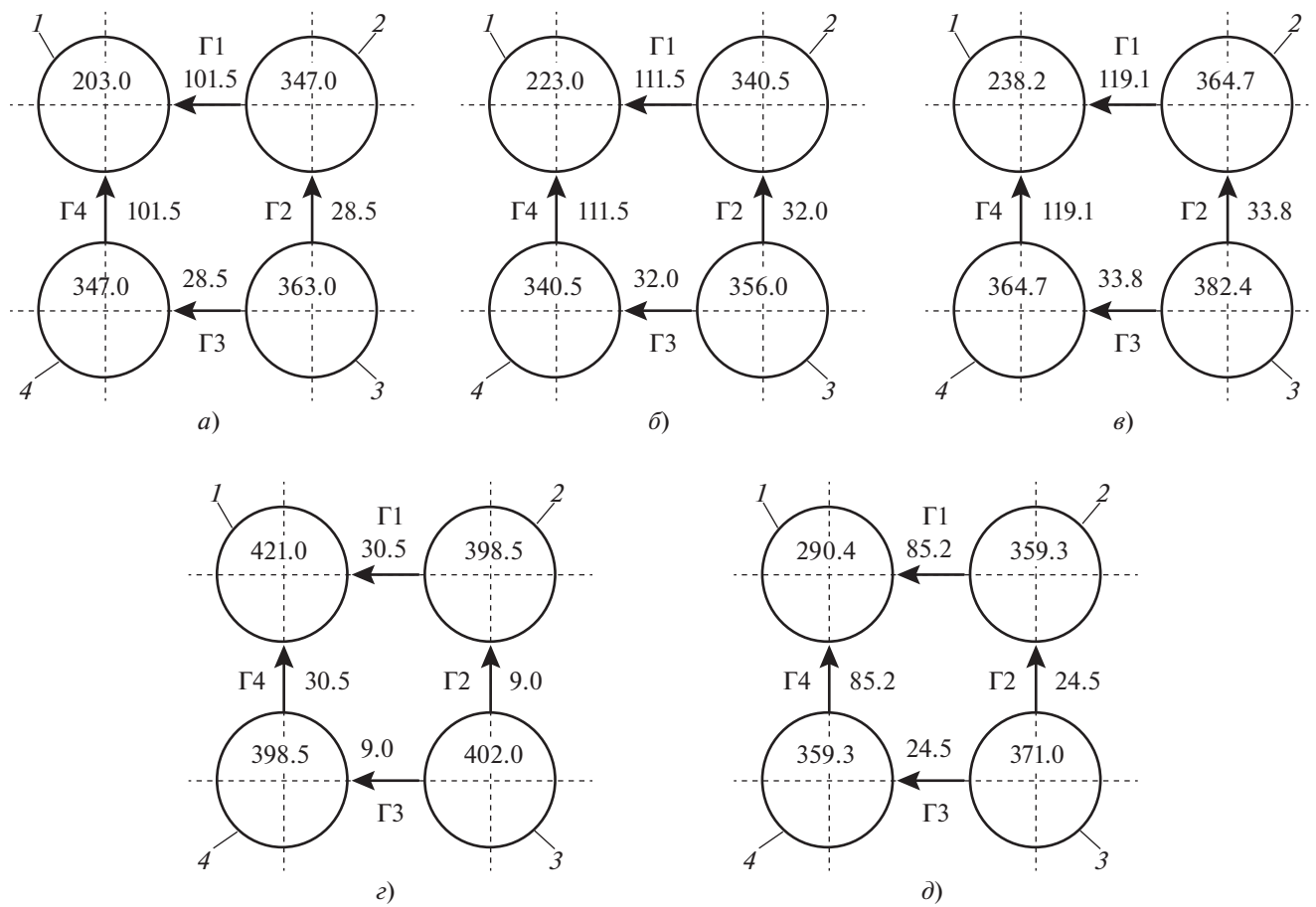


Рис. 2. Схемы перетоков газов между стволами в режимах II (а), III (б), V (в), VII (г), VIII (д).
1–4 – номер ствола; перепускной газоход: Г1 – между стволами 1, 2; Г2 – между стволами 2, 3; Г3 – между стволами 3, 4; Г4 – между стволами 4, 1

Показатели режимов работы стволов дымовой трубы

Показатель	Режим I	Режим II				
	номер ствола	номер ствола				
	1–4	1	2	3	4	
$V_i, \text{ м}^3/\text{с}$	420	203	347	363	347	
$w_i, \text{ м/с}$	26.4	12.8	21.8	22.8	21.8	
$\Delta h_{ib,c}, \text{ Па}$	305	71	208	228	208	
$\zeta_{вх}$	0.6	1.6	0.682	0.6	0.682	
$\Delta h_{im,c}, \text{ Па}$	183	114	142	137	142	
λ_i	0.0136	0.0138	0.0137	0.0137	0.0137	
$\Delta h_{itp}, \text{ Па}$	222	53	152	166	152	
$\Delta h_{ic}, \text{ Па}$	774	774	774	774	774	
$\Delta h_i, \text{ Па}$	–369	–606	–480	–470	–480	
$\Delta h_{in}, \text{ Па}$	–63	–536	–272	–243	–272	
$N_{ic}, \text{ кВт}$	–34	–140	–120	–112	–120	
$\Delta N, \text{ кВт}$	34	–	181	130	181	

должна составить $\Delta p_{\text{пер}} = 126$ Па, между стволами в газоходах Г2 и Г3 $\Delta p_{\text{пер}} = 10$ Па.

Как следует из таблицы, разность статических давлений между стволами 2 и 1, 4 и 1 составляет 126 Па, между стволами 3 и 2, 3 и 4 – 10 Па, что обеспечивает принятый расход через перепускные газоходы.

Далее приведены результаты расчетов сопротивлений параллельных трактов:

ствол 3, $\Delta h_{3\text{м.с}} + \Delta h_{3\text{тр}} = 137 + 166 = 303$ Па;

стволы 2 и 4, $\Delta h_{2,4\text{м.с}} + \Delta h_{2, \text{тр}} + \Delta p_{\text{пер}1} = 142 + 152 + 10 = 304$ Па;

ствол 1, $\Delta h_{4\text{м.с}} + \Delta h_{4\text{тр}} + \Delta p_{\text{пер}1} + \Delta p_{\text{пер}2} = 114 + 53 + 10 + 126 = 303$ Па.

Разница в результатах вычислений, равная 1 Па, возникла вследствие округления промежуточных данных до 1 Па. При более точном расчете она составила 0.1 Па.

При $\eta_{\text{д}} = 0.8$, $\eta_{\text{дв}} = 0.98$ из-за разрежения, создаваемого самотягой трубы (отрицательный полный перепад давления), разгрузка каждого дымососа будет равна ΔN (см. таблицу).

Мощность самотяги ствола 1 обеспечивается потоками газов, которые проходят через дымососы стволов 2 и 4. Поэтому эту мощность делили поровну и распределяли ее на между указанными дымососами. В свою очередь, часть мощности самотяги стволов 2 и 4 приходится на поток газов, проходящих через дымосос ствола 3. Пропорционально расходам эту мощность относили на дымосос ствола 3. Суммарная мощность самотяги стволов равняется суммарной разгрузке работающих дымососов всех стволов. Наибольшая разгрузка – на дымососах стволов соседних к тому, от которого отключен котел.

Таким образом, работа дымовой трубы в режиме II позволяет разгрузить дымососы на 390 кВт по сравнению с работой в режиме I.

Значительное влияние на режим работы стволов оказывает площадь сечения перепускного газохода. Например, если площадь перепускных газоходов увеличить с 6 до 8 м², то перетоки по ним также увеличатся (режим III) (см. рис. 2, б). Суммарная разгрузка дымососов в этом случае возрастет с 390 до 407 кВт.

В ряде случаев, например при сжигании высокосернистого мазута, температура уходящих газов может быть существенно выше, чем в приведенном примере. При $t_{1, 2, 3, 4} = 160^\circ\text{C}$ объемный расход дымовых газов в каждом стволе составит 450 м³/с при скорости газов 28.3 м/с (режим IV).

Мощность самотяги каждого из четырех стволов при независимом режиме работы увеличива-

ется с 34 до 90 кВт, а трех стволов при отключении одного в независимом режиме – 270 кВт. Суммарная мощность самотяги четырех стволов при отключении одного котла с открытыми перепускными газоходам также увеличивается и составляет 736 кВт (режим V) (см. рис. 2, в).

Разность в экономии мощности между режимами V и IV возрастает до 466 кВт. При сравнении суммируются показания только трех стволов при работе всех четырех стволов в независимом режиме.

В режиме VI на три ствола подключены котлы энергоблоков Т-250 с расходом газов по стволам $V_{1, 2, 3} = 420$ м³/с и температурой дымовых газов $t_{1, 2, 3} = 130^\circ\text{C}$, а на четвертый – три водогрейных котла КВГМ-180 с общим расходом газов 360 м³/с и температурой 180°C . Диаметры стволов, к которым подключены энергетические котлы, составляют $d_{1, 2, 3} = 4.5$ м, а диаметр ствола для пиковых котлов $d_4 = 4.2$ м. При независимой работе самую большую тягу имеет ствол, к которому подсоединены водогрейные котлы. На уровне перепускных газоходов статическое давление составляет $\Delta h_1 = -643$ Па, $\Delta h_{2, 3, 4} = -369$ Па. Мощность самотяги стволов составит $\Delta N_{c1} = 171$ кВт, $\Delta N_{c2, 3, 4} = 34$ кВт, суммарная мощность $\Delta N_{\Sigma} = 273$ кВт.

Если открыть перепускные газоходы (режим VII), то между стволами начнутся перетоки газов (см. рис. 2, г). Температура газов в стволе пиковых котлов снизится до 173°C . Суммарная мощность самотяги уменьшится с 273 до 217 кВт. Статическое давление в стволе 1 увеличится с -643 до -410 Па. Нагрузка на дымососы пиковых котлов повысится на 148 кВт, а на дымососы энергетических котлов уменьшится на 31 кВт. Такой режим экономически не обоснован, и шиберы должны быть закрыты. Применяться такой режим может в том случае, если какой-нибудь энергетический котел временно не может работать с полной нагрузкой вследствие недостатка разрежения и наличия резерва мощности дымососов пиковых котлов.

В режиме VIII (см. рис. 2, д) работает только один водогрейный котел, $V_1 = 120$ м³/с, $t_{1\text{г}} = 180^\circ\text{C}$, при независимой работе самую большую тягу имеет ствол с подключенными водогрейными котлами. На уровне перепускных газоходов $\Delta h_1 = -960$ Па. В остальных стволах $\Delta h_{2, 3, 4} = -369$ Па. Мощность самотяги стволов составит $\Delta N_{c1} = 142$ кВт, $\Delta N_{c2, 3, 4} = 34$ кВт, суммарная мощность $\Delta N_{\Sigma} = 244$ кВт. Если открыть перепускные газоходы, то расход газов в стволе 1 увеличится со 120.0 до 290.4 м³/с, температура газов в нем снизится до 151°C , суммарная мощность самотяги повысится

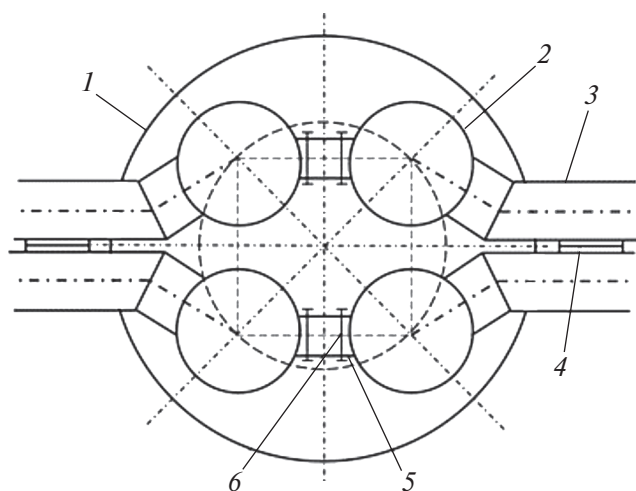


Рис. 3. Упрощенная схема перепускных газоходов.
1 – железобетонная оболочка; 2 – цоколь ствола;
3 – внешний газоход; 4 – вынесенный перепускной
газоход; 5 – внутренний перепускной газоход; 6 – от-
ключающий шибер

и составит $\Delta N_{\Sigma} = 444$ кВт. Однако статическое давление в стволе I возрастет с -960 до -122 Па. Этот режим экономически оправдан, но зависит от запаса по разрежению у дымососа пикового котла.

На результаты работы влияет коэффициент местных сопротивлений перепускных газоходов. Его максимальное значение для рассмотренной схемы с прямоугольным поперечным сечением при острых входных кромках может составлять $\sum \zeta = 1.5$ и состоять из местных сопротивлений на входе газа в ствол ($\zeta_{\text{вх}} = 0.5$) и выходе из него под напором ($\zeta_{\text{вых}} = 1.0$).

Скругление входных кромок позволяет снизить сопротивление на входе до $\zeta_{\text{вх}} = 0.1-0.2$, из-за отсоса газа в прямой канал потери давления отсасываемой струи отсутствуют, поэтому коэффициент сопротивления в данном случае существенно меньше, чем при движении под напором [8–10].

При параллельном подводе внешних газоходов к дымовой трубе можно рекомендовать более простую схему ее реконструкции (рис. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предложенное решение по режимам работы многоствольных дымовых труб позволяет значительно снизить коррозию стальных стволов. Благодаря перепуску в неработающий ствол горячих дымовых газов из соседних работающих стволов дымовой трубы практически исключаются режимы, приводящие к стояночной коррозии стволов.

При этом всегда имеется возможность отключить любой ствол для ревизии или ремонта.

В большинстве случаев шиберы на перепускных газоходах должны оставаться открытыми, за исключением некоторых режимов работы ствола, в которых подключаются водогрейные котлы. Тогда становится возможной выгодная работа этого ствола в независимом режиме. Но при отключении водогрейных котлов перепускные газоходы к этому стволу должны открываться.

Далее проводится сравнение влияния режимов работы стволов дымовой трубы в режимах I и II на приземные концентрации вредных веществ в соответствии с данными, представленными в таблице.

Средняя по площади скорость выхода дымовых газов в режиме I составляет 26.4 м/с, в режиме II – 19.8 м/с. С одной стороны, скорость выхода газов в режиме II ниже, что должно привести к уменьшению подъема дымового факела в атмосферу и увеличению приземных концентраций, но, с другой стороны, и выброс вредных веществ в этом режиме меньше, так как котлы, работавшие на один из стволов, остановлены.

Опасная скорость ветра на уровне флюгера в режиме I составляет 6.67 м/с, в режиме II – 5.89 м/с [11]. При этом подъем дымового факела в режиме I составляет 99.6 м, в режиме II – 72.0 м [12].

Приземные концентрации обратно пропорциональны квадрату эффективной высоты дымовой трубы. При геометрической высоте дымовой трубы 240 м ее эффективная высота в режиме I составит 340 м, в режиме II – 312 м. При одинаковых выбросах вредных веществ приземная концентрация в режиме II увеличится в $(340/312)^2 = 1.185$ раз, или на 18.5% . Но в режиме II эмиссия вредных веществ составляет только 75% их количества, выбрасываемого в режиме I. Поэтому в режиме II, несмотря на уменьшение скорости выхода дымовых газов, приземные концентрации снижаются на 11% .

К тому же нужно учесть, что если бы один из стволов оставался незадействованным, то скорости газов в каждом из действующих трех стволов составляли бы 26.4 м/с. Формирующийся в этом случае трехствольный факел оказывал бы значительное аэродинамическое сопротивление сносному ветровому потоку, особенно при направлении ветра со стороны неработающего ствола, что привело бы к уменьшению подъема дымовых газов. В то же время, когда в этом стволе также появляется поток газов, параллельный остальным стволам, он создает аэродинамический экран, что не только улучшает обтекаемость дымового факела

ла ветровым потоком, но и увеличивает подъем дымовых газов от остальных стволов.

Предложенное решение применимо при использовании любого топлива. Наибольший эффект будет получен при сжигании мазута, но и при работе на газообразном топливе скорость стояночной коррозии будет выше скорости коррозии на работающем оборудовании. В любом случае если в стволе отсутствуют капельная влага и кислород, то скорость коррозии будет снижаться. К тому же чисто газовых электростанций практически нет. На них резервным топливом является мазут, который приходится периодически сжигать.

При работе на твердом топливе достаточно будет в нижнюю плоскость перепускного короба встроить небольшой бункер для улавливания сепарируемой золы, который время от времени нужно будет опорожнять.

Внедрение данного предложения наиболее эффективным будет при проектировании и строительстве новых многоствольных дымовых труб. Предложение о внесении его в нормативно-техническую документацию по проектированию дымовых труб было поддержано в рамках Международной научно-технической конференции [13].

Однако и реконструкция действующих дымовых труб вполне возможна. Основная трудность при этом заключается в размещении габаритного отключающего устройства в перепускном газоходе. Это связано с тем, что длина таких газоходов по схеме, приведенной на рис. 1, составляет всего от 1.0 до 1.5 м. При этом может понадобиться разработка специальной шиберной заслонки, для уменьшения габаритов которой можно вместо одного перепускного короба выполнить два параллельных, а также увеличить длину газохода до 2–3 м, если разместить его не в узком месте, а по тангенциальному подводу к цоколям. Могут быть реализованы и другие решения.

ВЫВОДЫ

1. Новое конструктивно-режимное решение для многоствольной дымовой трубы — перепуск в неработающий ствол горячих дымовых газов из работающих стволов — позволяет исключить стояночную коррозию металлических стволов. При этом температура газов во всех стволах поддерживается выше температуры точки росы.

2. При использовании дополнительной самотяги остающегося в работе ствола можно снизить расход электроэнергии на собственные нужды котла за счет разгрузки дымососов примерно на 5–10%.

3. Предложенное конструктивно-режимное решение для многоствольной дымовой трубы может рассматриваться как перспективная технология, направленная на повышение надежности и экономичности работы ТЭЦ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Магадеев В.Ш.** Коррозия газового тракта котельных установок. М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. **Дужих Ф.П., Осоловский В.П., Ладыгичев М.Г.** Промышленные дымовые и вентиляционные трубы: справ. изд. / под ред. Ф.П. Дужих. М.: Теплотехник, 2004.
3. **Пергаменщик Б.К., Лесников И.А.** Газоотводящие (дымовые) трубы ТЭС: возведение, ремонт, реконструкция, демонтаж: учеб. пособие. М.: МГСУ, 2014.
4. **Грибков А.М., Мирсалихов К.М., Чичирова Н.Д.** Расчет скорости газов в стволах четырехствольной дымовой трубы // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2022. № 15 (8). С. 900–914. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0436>
5. **Жидович О.В., Альшевский В.Н., Дужих Ф.П.** Охлаждение газов в дымовых трубах // Теплоэнергетика. 1977. № 9. С. 44–47.
6. **Пат. SU 808783 A1.** Многоствольная дымовая труба / Ю.В. Салов // БИ. 1981. № 8.
7. **РД 34.26.105.** Методические указания по предупреждению низкотемпературной коррозии поверхностей нагрева и газоходов котлов. М.: Минэнерго СССР, 1984.
8. **Идельчик И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М.О. Штейнберга. М.: Машиностроение, 1992.
9. **Аэродинамический** расчет котельных установок (нормативный метод) / под ред. С.И. Мочана. Л.: Энергия, 1977.
10. **Идельчик И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975.
11. **Приказ Минприроды России от 06.06.2017 № 273** “Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе” (Зарегистрировано в Минюсте России 10.08.2017 № 47734.)
12. **Берлянд М.Е.** Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1975.
13. **О целесообразности** дополнения нормативно-технической документации по проектированию дымовых труб с учетом современных разработок / А.М. Грибков, Н.А. Зройчиков, М.И. Сапаров, К.М. Мирсалихов // Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. “Техническое перевооружение ТЭС — масштабы и приоритеты. Совершенствование основного и вспомогательного оборудования, технологических схем и систем”. Москва, 29 октября–2 ноября 2024 г. / под общ. ред. Д.В. Тарадая. М.: АО ВТИ, 2024. С. 50–58.

Achieving More Reliable and Efficient Use of Multibarrel Smoke Stacks

A. M. Gribkov^{a, *}, N. A. Zroichikov^{b, **}, and M. I. Saparov^{c, ***}

^a Kazan State Power Engineering University, Kazan, 420066 Russia

^b National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

^c Noncommercial Partnership Scientific-Technical Council of Unified Energy System, Moscow, 111250 Russia

*e-mail: Gribkovalmi@mail.ru

**e-mail: ZroychikovNA@mpei.ru

***e-mail: saparov.mikhail51@yandex.ru

Abstract—Stacks with steel barrels installed inside of a reinforced concrete shell are the most widely used type of multibarrel smoke stacks in Russia. The reinforced concrete shell of such stacks is protected against the effect of flue gases, and with correctly conducted operation, it can perform its functions for an almost unlimited period of time. The smoke stack main damages occur as a consequence of steel barrel corrosion, especially if flue gases contain sulfur oxides. The possibility to decrease corrosion of the smoke stack steel barrels by changing their operation conditions is considered. A new method for achieving more reliable and efficient operation of multibarrel smoke stacks is proposed, according to which the barrel shutdown corrosion is eliminated, and measures are taken for the smoke stack to help unload the exhaust fans to a greater extent through optimal use of the barrel stack effect. The main methods applied to decrease corrosion of the metal gas removing barrels used in multibarrel smoke stacks are considered. A new design of the metal barrel base part is proposed, which in the course of boiler equipment operation makes it possible to redistribute the gas flows among the smoke stack barrels. In addition, the smoke stack operation modes are proposed, in which the steel barrel shutdown corrosion is eliminated, and the exhaust fans are unloaded due to an increased total stack effect of the barrels. A computer program for calculating such operation modes has been developed. Variants calculations of the smoke stack operation mode performance parameters have been carried out with taking into account the real operation conditions. It has been determined that in the case of using the stack effect of the barrel from which the boilers are disconnected, the electricity consumption for driving the exhaust fans of operating boilers decreases by 5–10%; in addition, with such operation, the possibility of shutdown corrosion to occur in the smoke stack steel barrels is excluded.

Keywords: multibarrel smoke stacks, metal barrel corrosion, barrel base, smoke stack barrel stack effect, exhaust fan, boiler auxiliaries, operation mode variants calculations